

Bewertung und Berechnung von Fluglärm

Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr

FE-Nr. L-2/96-50144/96

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Strömungsmechanik

Abteilung Meßverfahren und Strömungsanalyse

Bunsenstraße 10

D-37073 Göttingen

Göttingen, Juli 1999

Institutsleiter:

Prof.Dr.rer.nat. G.E.A. Meier

Verfasser:

Dr.rer.nat. Ullrich Isermann

Dipl.-Phys. Rainer Schmid

Abteilungsleiter:

Dr.rer.nat. K.A. Bütetisch

Der Bericht enthält 128 Seiten, 45 Bilder, 15 Tabellen und 40 Literaturhinweise

Bewertung und Berechnung von Fluglärm

Kurzfassung:

Die Grundlagen der Fluglärmbewertung werden erläutert und unterschiedliche, gebräuchliche Fluglärmbewertungsmaße hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile diskutiert. Das Prinzip von konventionellen Fluglärmberechnungsverfahren sowie von Simulationsverfahren wird beschrieben. Spezielle Probleme beim Gebrauch von konventionellen Verfahren werden analysiert. Hierbei wird der Schwerpunkt auf das in Deutschland benutzte AzB-Verfahren gelegt. Die Genauigkeit von konventionellen Berechnungsverfahren wird untersucht. Die Resultate von vergleichenden Berechnungen mit 9 unterschiedlichen Verfahren, die im Rahmen des ICAO Task MODEL 1 durchgeführt wurden, werden vorgestellt. Der derzeitige Stand des Fluglärmproblems in Deutschland (Problemfelder, Novellierung des Fluglärmgesetzes) wird diskutiert und bewertet. Mögliche Verbesserungsvorschläge zum AzB-Verfahren werden beschrieben. Auf der Basis von 12 Flugbetriebsfällen werden Näherungsbeziehungen zwischen verschiedenen L_{eq} -Varianten aufgestellt.

Schlagwörter:

AzB, Fluglärm, Fluglärmbewertungsmaße, Fluglärmberechnungsverfahren, Fluglärmgesetz, Äquivalenter Dauerschallpegel L_{eq}

Description and Calculation of Aircraft Noise

Summary:

The fundamentals of aircraft noise description are explained. Different commonly used aircraft noise descriptors are discussed with respect to their advantages and disadvantages. The principles of conventional aircraft noise calculation procedures as well as the principles of simulation procedures are described. Specific problems related to the use of conventional calculation procedures are discussed with special attention paid to the German AzB-procedure. The accuracy of conventional procedures is analyzed. The results of a comparing investigation of 9 different calculation procedures — performed within ICAO task MODEL 1 — are presented. The current status of the aircraft noise problem in Germany (special problems, revision of the German air traffic noise act) is discussed, proposals for possible improvements are made. Approximate relationships between different forms of L_{eq} are derived from calculations based upon 12 different air traffic scenarios.

Keywords:

Aircraft Noise, Aircraft Noise Descriptors, Aircraft Noise Prediction Procedures, German Air Traffic Noise Act, Equivalent Sound Level L_{eq}

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Abkürzungen	5
1. Einleitung	8
2. Fluglärmbewertungsmaße	11
2.1. Allgemeines	11
2.2. Physikalische Basisgrößen	12
2.2.1. Maximalpegel und Geräuschkdauer	12
2.2.2. Frequenzbewertung	12
2.2.3. Ton- und Impulskorrekturen	14
2.2.4. Zeitbewertung	14
2.2.5. Einzelereignispegel	15
2.3. Klassifizierung von Fluglärmbewertungsmaßen	17
2.3.1. Äquivalente Dauerschallpegel	17
2.3.2. Mittlerer Maximalschallpegel	19
2.3.3. Schwellenwertkriterien	20
2.3.4. Andere Formen von Bewertungsmaßen	20
2.4. Die Empfehlungen der Europäischen Union	22
2.5. Bewertungsmaße: Anwendungsgebiete, Vor- und Nachteile	24
2.5.1. Äquivalente Dauerschallpegel	24
2.5.2. Mittlere Maximalpegel	25
2.5.3. Schwellenwertkriterien	27
2.6. Zur Wahl eines geeigneten Bewertungsmaßes	30
3. Fluglärmrechnungsverfahren	32
3.1. Allgemeines, Klassifizierung	32
3.2. Konventionelle Fluglärmprognoseverfahren	33
3.2.1. Übersicht, Anforderungen	33
3.2.2. Form der Datengrundlage	34
3.2.3. Berechnung des Maximalschallpegels am Immissionsort	36
3.2.4. Der Einfluß des Pegelschwellenwerts	38
3.2.5. Berechnung von Einzelereignispegeln	40
3.2.6. Modellierung der seitlichen Flugbahnstreuung	42
3.2.7. Die Rolle der Bodendämpfung	45
3.2.8. Richtwirkung, Modellierung des Startvorganges	46
3.2.9. Typenspezifische Pegelverteilungen	47
3.3. Simulationsverfahren	51
3.3.1. Prinzip	51
3.3.2. Vor- und Nachteile von Simulationsverfahren	52
3.4. Harmonisierung von Fluglärmrechnungsverfahren in der EU	54

4.	Genauigkeit konventioneller Fluglärmberechnungsverfahren	56
4.1.	Definition und Einflußfaktoren	56
4.2.	Genauigkeit konventioneller Rechenmodelle	58
4.3.	Zusammenfassung	60
5.	Der CAEP/2 Task MODEL 1	61
5.1.	Intention	61
5.2.	Die Untersuchungen zum Hybrid Airport	62
5.3.	Weitere Vorgehensweise	66
6.	Zur Fluglärmproblematik in Deutschland	68
6.1.	Die gesetzlichen Grundlagen	68
6.2.	Aktuell diskutierte Problemstellungen	69
6.2.1.	Allgemeines	69
6.2.2.	Wechsel des Bewertungsmaßes	69
6.2.3.	Die Situation der Lärmwirkungsforschung	71
6.2.4.	Berücksichtigung des nächtlichen Fluglärms	71
6.2.5.	Die Behandlung von Richt- und Grenzwerten	72
6.2.6.	Ziviler und militärischer Fluglärm	74
6.3.	Novellierung des Fluglärmgesetzes	75
7.	Überarbeitungsmöglichkeiten der AzB	77
7.1.	Modifikationen am bestehenden AzB-Verfahren	77
7.2.	Integration von bodengebundenem Verkehr in die AzB	80
7.3.	Simulationsverfahren als Alternative	81
8.	Literatur	82
Anhang:	Näherungsbeziehungen zwischen äquivalenten Dauerschallpegeln	A-1
A.1.	Untersuchungsgegenstand	A-1
A.2.	Vorgehensweise	A-1
A.3.	Beschreibung der durchgeführten Regressionsanalyse	A-3
A.4.	Diskussion der Ergebnisse	A-5
A.5.	Tabellenteil	A-8
A.6.	Abbildungsteil	A-17

Verwendete Abkürzungen

1. Allgemeine Abkürzungen

AzB	Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen an zivilen und militärischen Flugplätzen nach dem Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm vom 30. März 1971
ADV	Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen
BMV	Bundesministerium für Verkehr
BPR	Nebenstromverhältnis
CAEP	ICAO Committee on Aviation Environmental Protection
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DOT	U.S.-Department of Transportation
DUS	Flughafen Düsseldorf
ECAC	European Civil Aviation Conference
EU	Europäische Union
FAA	Federal Aviation Administration
FRA	Flughafen Frankfurt/Main
HBG	Flughafen Hamburg
ICAO	International Civil Aviation Organization
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
INM	Integrated Noise Model
MPI	Max-Planck-Institut
MTOM	Höchstabflugmasse
MUC	Flughafen München
SAE	Society of Automotive Engineers
UBA	Umweltbundesamt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

2. Formelzeichen

B	Kosten-Index
C	additive Normierungskonstante bei der L_{EQ} -Berechnung
$EPNL$	Effective Perceived Noise Level
g	tageszeitbezogener Wichtungsfaktor bei der L_{EQ} -Berechnung
k	Äquivalenzparameter
I_p	Index Psophique
L	Pegel
L_{AX}	Einzelereignispegel nach ISO 3891
L_{AZ}	Einzelereignispegel in Anlehnung an das Fluglärmsgesetz
L_{DEN}	Day-Evening-Night Sound Level
L_{DN}	Day-Night Average Sound Level
L_e	Effektivpegel
L_{EQ}	äquivalenter Dauerschallpegel (generische Bezeichnung)
L_{eq}	äquivalenter Dauerschallpegel (weitere Definition durch zusätzlichen Index)
$L_{eq(4,FLG)}$	äquivalenter Dauerschallpegel nach Fluglärmsgesetz
L_{EU}	European Environmental Noise Indicator
L_{max}	Maximalschallpegel
$\overline{L_{max}}$	mittlerer Maximalschallpegel
L_N	Lautstärkepegel
L_r	maßgebender Beurteilungspegel nach DIN 45645
L_{rFl}	maßgebender Fluglärmburteilungspegel nach DIN 45643
N	Lautheit
N_g	Anzahl an Geräuschen im Bezugszeitraum
NAT	Number Above Threshold
NEF	Noise Exposure Forecast
NNI	Noise and Number Index
PNL	Perceived Noise Level
$PNLT$	tonkorrigierter Perceived Noise Level
q	Halbierungsparameter
SEL	Sound Exposure Level

2. Formelzeichen (Fortsetzung)

t	Zeitkoordinate
t_g	Geräuschkdauer
t_0, t_1	Normierungszeiten
t_{10}	10 dB-down-time
t_e	effektive Dauer
T	Bezugszeitraum
$WECPNL$	Weighted Equivalent Continuous Perceived Noise Level

3. Indizes

$24h$	auf den Gesamttag (24 Stunden) bezogen
3	mit $q = 3$ berechnet (energieäquivalent)
4	mit $q = 4$ berechnet
A	A-bewertet
i	Laufindex
$Nacht$	auf die Nachtperiode bezogen
S	mit Zeitbewertung SLOW gemessen
Tag	auf die Tagesperiode bezogen

1. Einleitung

Die vorliegende Untersuchung befaßt sich mit allgemeinen Fragen und Problemstellungen der Fluglärmbewertung und -berechnung. Fluglärm in der Umgebung insbesondere von zivilen Verkehrsflughäfen stellt nicht nur in Deutschland, sondern auch europa- und weltweit eines der drängendsten mit dem zivilen Luftverkehr verknüpften Umweltprobleme dar.

In den letzten zwei Dekaden hat die Lärmbelastung im Umfeld der Verkehrsflughäfen trotz steigender Flugbewegungszahlen stark abgenommen. Dies ist in erster Linie auf die technologischen Fortschritte im Triebwerksbau zurückzuführen. So konnte der Einfluß von steigenden Bewegungszahlen durch den zunehmenden Einsatz leiseren Fluggeräts überkompensiert werden. Nunmehr ist allerdings ein Ende dieser Entwicklung abzusehen. Die derzeit am zivilen Luftverkehr teilnehmenden Flugzeugmuster sind fast durchweg moderner Bauart. So beträgt das Durchschnittsalter der Lufthansa-Flotte derzeit etwa 6 Jahre. Bei einer Betriebserwartung von etwa 20 bis 30 Jahren ist zu erwarten, daß die modernen Flugzeugmuster noch 15 bis 20 Jahre im Dienst bleiben. Gleichzeitig sind im Bereich der EU ältere Flugzeuge, die den Anforderungen der International Civil Aviation Organization ICAO an die strengste Stufe der Lärmzulassung (*Chapter 3*) nicht erfüllen bis zum Jahr 2002 auszumustern. Es ist also zu erwarten, daß aufgrund des prognostizierten steigenden Luftverkehrsaufkommens die Lärmbelastung in Zukunft steigen wird.

Deshalb ist eine umweltgerechte Planung für Verkehrsflughäfen dringend notwendig. Sowohl dem Gesetzgeber als auch den Flughäfen selbst müssen die dazu notwendigen Werkzeuge an die Hand gegeben werden. Hierzu zählen in erster Linie rechnerische Fluglärmprognoseverfahren, mit denen für die Planung geeignete *Lärmbewertungsmaße* ermittelt werden können.

Die Definition derartiger Bewertungsmaße setzt allerdings umfassende Kenntnisse über die Wirkung von Fluglärm voraus. Die Zusammenhänge zwischen physikalisch meßbaren Einflußparametern und subjektiv empfundener Lärmwirkung müssen bekannt sein. Im Abschnitt 2 dieses Berichtes wird sich daher mit den grundlegenden Fragen der Lärmbewertung auseinandergesetzt. Dies umfaßt eine Beschreibung der physikalischen Einflußgrößen, der derzeit national und international gebräuchlichen Bewertungsmaße sowie eine Diskussion von deren Vor- und Nachteilen.

Im Abschnitt 3 wird sich mit Fluglärmrechnungsverfahren auseinandergesetzt. Diese können in zwei Kategorien eingeteilt werden, *konventionelle Verfahren* und *Simulationsverfahren*. Weltweit sind fast durchweg konventionelle Verfahren im Einsatz. Diese basieren in

der Regel auf einer Reihe von vereinfachenden Annahmen bei der Beschreibung des Flugzeugs als Schallquelle und der Modellierung der Schallausbreitung. Im Abschnitt 3 werden diese Vereinfachungen beschrieben und ihre Auswirkungen anhand von Beispielen diskutiert. Im Rahmen dieser Diskussion wird ein besonderer Schwerpunkt auf das in Deutschland gesetzlich vorgeschriebene AzB-Verfahren gelegt. Dabei stellt sich heraus, daß das AzB-Verfahren — bedingt durch den Rechenformalismus — z.B. im Bereich von gekrümmten Flugstrecken-segmenten zu un stetigen Verläufen in den ermittelten Lärmkonturen führen kann. Hier sind Verbesserungen (z.B. in Anlehnung an den *Noise-Fraction-Algorithmus* des Integrated Noise Model) möglich. Ein weiterer Einflußfaktor, der vor allem bei der Ermittlung sog. *Schwellenwertkriterien* mit einbezogen werden muß, basiert auf der Tatsache, daß typenspezifische gemessene Pegelverteilungen eine gewisse Streuung aufweisen.

Auf die Genauigkeit von Fluglärm-berechnungsverfahren wird im Abschnitt 4 eingegangen. Hierbei wird sich im wesentlichen auf die konventionellen Rechenverfahren bezogen. Die verschiedenen die Rechengenauigkeit bestimmenden Einflußfaktoren werden diskutiert. Bei dem Begriff der Genauigkeit ist zwischen lokaler und globaler Genauigkeit zu unterscheiden. Erstere kann — bezogen auf einen speziellen Immissionsort — relativ gering sein, während letztere ein Mittel im gesamten Flughafenumfeld darstellt. Daß konventionelle Verfahren in der Praxis einen relativ hohen globalen Genauigkeitsgrad erreichen können, wird an einem Beispiel demonstriert.

Abschnitt 5 beschreibt eine Untersuchung, die im Rahmen von ICAO-Aktivitäten im Jahr 1997 initiiert wurde. Diese als *Task Model 1* bezeichnete Untersuchung befaßt sich mit einem Vergleich der unterschiedlichen international gebräuchlichen Fluglärm-berechnungsverfahren. Insbesondere wurden im Rahmen von MODEL 1 Vergleichsberechnungen mit 9 verschiedenen Rechenverfahren (einschließlich des in Deutschland benutzten Verfahrens) auf der Basis eines standardisierten Flugbetriebsfalles vorgenommen. Die Resultate zeigten, daß sich bei gleichen Randbedingungen sehr große Unterschiede in den von Lärmkonturen umschlossenen Flächen ergeben. Als wesentliche Gründe für diese Unterschiede wurden zum einen unterschiedliche Modellierungsalgorithmen für den als Bodenzusatzdämpfung bezeichneten Ausbreitungseffekt sowie maßgebliche Differenzen in den Datengrundlagen der unterschiedlichen Berechnungsmodelle identifiziert. Aufgrund dieser Resultate wurden schon erste Konsequenzen bezüglich der Modifikation international gebräuchlicher Richtlinien und Rechenprogramme gezogen. Die Aktivitäten von MODEL 1 werden fortgesetzt.

Der sechste Abschnitt befaßt sich mit dem derzeitigen Status des Fluglärmproblems in Deutschland. Die gesetzlichen Grundlagen werden beschrieben und aktuelle Problemstel-

lungen werden diskutiert. Es wird erläutert, daß die verschiedenen Formen von äquivalenten Dauerschallpegeln gleichwertig zur Beschreibung der längerfristigen Lärmbelastung herangezogen werden können. Allerdings sind sie nur begrenzt zur Beschreibung der nächtlichen Fluglärmbelastung geeignet. Hier sollten andere Kriterien (z.B. Schwellenwertkriterien) benutzt werden. Grundsätzlich müssen aber zunächst die bestehenden Defizite in der Lärmwirkungsforschung aufgeholt werden, um eine solide Grundlage für die Definition von Planungsgrenzwerten zu schaffen. Außerdem muß vermieden werden, Grenz- und Orientierungswerte bei der Beurteilung der Lärmbelastung zu vermischen. Eine separate Behandlung von militärischem und zivilem Fluglärm wird diskutiert. Alle diese Probleme stehen im Zusammenhang mit einer Empfehlung des Bundestages, in der jetzigen Legislaturperiode Verbesserungen im Bereich des Schutzes vor Fluglärm zu erarbeiten.

Im Abschnitt 7 wird auf Überarbeitungsmöglichkeiten der AzB im Zusammenhang mit einer eventuellen Novellierung des Fluglärmgesetzes eingegangen. Prinzipiell hat sich das AzB-Verfahren in den letzten Jahrzehnten bewährt. Allerdings können Verbesserungen bezüglich der Berechnungsvorschrift durchgeführt und auch relativ leicht eingearbeitet werden. Wichtig ist vor allem eine regelmäßige Überarbeitung der Datengrundlage. Falls auch die Einflüsse bodengebundenen Verkehrs (Rollvorgänge, Betrieb von Hilfsaggregaten, Standläufe) durch die AzB berücksichtigt werden sollen sind allerdings umfangreichere Modifikationen notwendig. Eine vollständige Umstrukturierung des AzB-Verfahrens in Richtung auf ein Simulationsmodell wäre alternativ denkbar. Hier werden aber sehr hohe Anforderungen an die Datengrundlagen gestellt.

Im Anhang wird eine Untersuchung zum Vergleich verschiedener L_{EQ} -Varianten präsentiert. Diese Untersuchung lehnt sich an eine vergleichbare Arbeit aus dem Jahr 1981 an. Auf der Basis von 12 unterschiedliche Flugbetrieben an 4 deutschen Flughäfen werden Korrelationen zwischen verschiedenen L_{EQ} -Varianten und dem äquivalenten Dauerschallpegel nach Fluglärmgesetz analysiert. Es zeigt sich, daß die verschiedenen Formen von äquivalenten Dauerschallpegeln hochgradig korreliert und durch Näherungsbeziehungen ineinander umrechenbar sind. Sie sind also aus wissenschaftlicher Sicht als gleichwertig hinsichtlich der Beschreibung von Fluglärm zu betrachten.

2. Fluglärmbewertungsmaße

2.1. Allgemeines

Generell dienen Fluglärmbewertungsmaße oder -deskriptoren zur Beschreibung und Quantifizierung der durch Luftfahrzeuge erzeugten Lärmbelastung im Umfeld von zivilen und militärischen Flugplätzen. Es gibt eine Reihe von verschiedenen Bewertungsmaßen, die sich hinsichtlich ihrer Form (insbesondere der zu ihrer Ermittlung benötigten physikalischen Parameter) und auch ihres Anwendungsbereiches (Beschreibung der mittleren Lärmbelastung über längere Zeiträume, Beschreibung der durch nächtlichen Luftverkehr verursachten Störwirkung etc.) z.T. beträchtlich unterscheiden.

In den meisten Fällen sind Fluglärmbewertungsmaße durch einen einzelnen Zahlenwert darstellbar (*Single Value Noise Descriptors*). In diesen Fällen müssen jeweils Grenzwerte zugeordnet werden, die Anhaltspunkte für den Grad der Störwirkung oder auch der gesundheitlichen Auswirkung des Fluglärms geben. Diesen Grenzwerten (die i.a. rechtlich verankert sind) können Isolinien konstanten Fluglärmbewertungsmaßes zugeordnet werden. Derartige *Lärmkonturen* bilden in der Regel die Grundlage für Siedlungsplanung und Entschädigungsmaßnahmen im Umfeld von Flugplätzen.

Neben den Deskriptoren, die durch Einzahlwerte darstellbar sind, sind insbesondere in Deutschland auch Kriterien gebräuchlich, die bestimmten Kombinationen von physikalisch meßbaren Parametern (z.B. Anzahl der Überschreitungen eines definierten Maximalpegelwertes) bestimmte gesundheitliche oder störende Wirkungen zuordnen. Auch derartige Kriterien sind durch Isolinien darstellbar. Die Definition eines Grenzwertes ist schon implizit in der Definition des Kriteriums enthalten. Derartige Kriterien stellen also eine Kombination von Deskriptor und Grenzwert dar. Im folgenden soll der Begriff *Bewertungsmaß* in etwas umfassenderer Form erläutert werden. Kombinationskriterien werden hier einbezogen.

Eine grundlegende Forderung, die an alle Fluglärmbewertungsmaße gestellt werden muß, ist ihre Überprüfbarkeit: Sie müssen sowohl durch Messung als auch durch Berechnung ermittelbar sein. Aus diesem Grunde beruhen alle Fluglärmdeskriptoren auf den an einem vorgegebenen Immissionsort während einer definierten Zeitperiode auftretenden, physikalisch meßbaren zeitlichen Pegelverläufen.

2.2. Physikalische Basisgrößen

2.2.1. Maximalpegel und Geräuschkdauer

Der zeitliche Schallpegelverlauf $L(t)$ eines Einzelgeräusches ist in Abb.2-1 schematisch dargestellt.

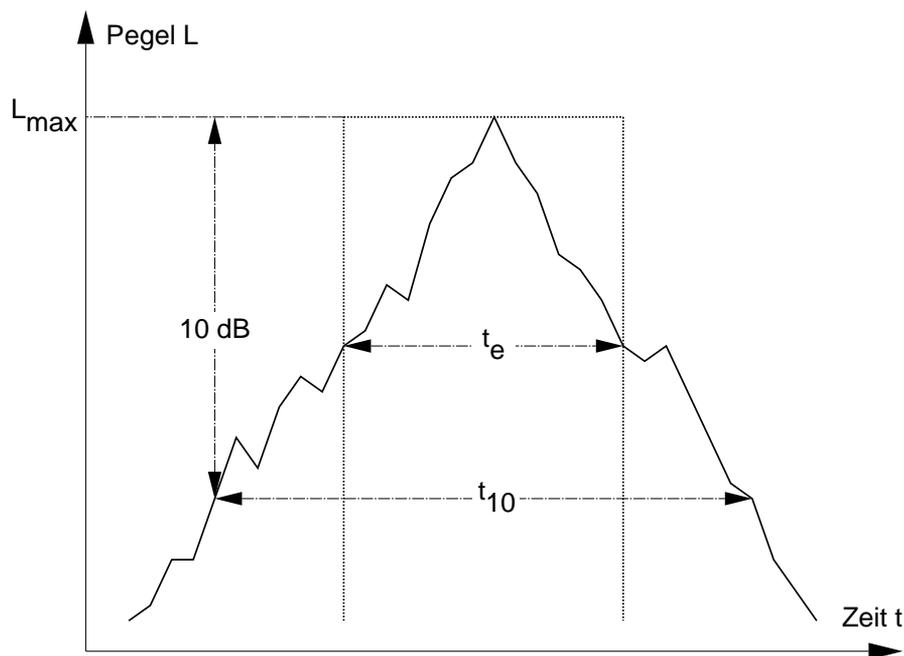


Abb.2-1: Zur Definition von Maximalpegel und Geräuschkdauer.

Der Zeitverlauf wird im wesentlichen durch seinen Maximalpegel L_{max} (wobei die Pegelgröße L in der Regel sowohl eine Frequenz- als auch eine Zeitbewertung beinhaltet) und eine typische Geräuschkdauer t_g charakterisiert. Für letztere sind zwei Definitionen gebräuchlich: Die *10dB-down-time* t_{10} ist diejenige Zeitspanne, während der der Wert $L(t)$ höchstens 10 dB kleiner als der Wert des Maximalpegels L_{max} ist. Die sog. *effektive Dauer* t_e ist durch die Gleichung

$$t_e \cdot 10^{L_{max}/10} = \int_{-\infty}^{\infty} 10^{L(t)/10} dt \quad (2-1)$$

definiert. Sie stellt also diejenige Dauer dar, die ein Geräusch mit dem konstanten Pegel L_{max} haben müsste, wenn es am Immissionsort dieselbe Schallenergie einstrahlen würde, wie das durch den zeitlichen Schallpegelverlauf $L(t)$ beschriebene Geräusch. Die effektive Dauer t_e ist in guter Näherung halb so groß wie die 10dB-down-time t_{10} .

2.2.2. Frequenzbewertung

Das menschliche Ohr besitzt gegenüber unterschiedlichen Frequenzen eine unterschiedliche Empfindlichkeit. So werden sehr hohe und sehr niedriger Frequenzen schlechter wahrgenommen als Frequenzen im mittleren Bereich um etwa 1000 Hz. Diese Frequenzabhängigkeit ist auch noch vom Schalldruckpegel abhängig: Die unterschiedliche Empfindlichkeit bezüglich der verschiedenen Frequenzen nimmt mit wachsendem Pegel ab.

Um dem Effekt der Frequenzabhängigkeit Rechnung zu tragen, wurden schon frühzeitig vier verschiedene Bewertungskurven (A, B, C und D) eingeführt [1,2], die durch additive, frequenzabhängige Zu- oder Abschläge zum Schallpegel realisiert werden. Die Abhängigkeit der Empfindlichkeit vom Schalldruckpegel wird dabei außer Acht gelassen. Die A-, B- und C-Bewertung — die sich im wesentlichen in der Beschreibung der tiefen Frequenzen unterscheiden — werden in der Regel für verschiedene Bereiche angewendet: Zum umfassendsten Einsatz kommt die A-Bewertung, die bei fast allen Fragen des Immissionsschutzes benutzt wird, während die Anwendungsbereiche der B- und C-Bewertung eher spezieller Natur sind (so wird die C-Bewertung z.B. zur Beurteilung niederfrequente Geräusche benutzt). Die A-Bewertung hat sich schon sehr früh aus praktischen Gründen (einfache Realisierung durch Filter im Meßbetrieb) im internationalen Rahmen etabliert. Solange keine Einzeltöne sondern breitbandige Geräusche (wie beim Fluglärm) betrachtet werden, ist sie der menschlichen Gehörempfindung in ausreichender Näherung angepaßt.

Es gibt allerdings Frequenzbewertungsverfahren, die der subjektiven Wahrnehmung besser entsprechen. Dazu gehört der sog. *Lautstärkepegel* L_N , der in phon angegeben wird [3]. Ein Geräusch hat den Lautstärkepegel von n phon, wenn es von einem normalhörenden Menschen als gleich laut empfunden wird wie ein reiner Ton der Frequenz 1000 Hz. Allerdings läßt sich mit Hilfe des Lautstärkepegels lediglich angeben, ob zwei Geräusche gleich oder unterschiedlich laut empfunden werden. Um feststellen zu können, wie stark ein solcher Unterschied empfunden wird, eignet sich eine andere Größe wesentlich besser. Dies ist die *Lautheit* N eines Geräusches, die in sone angegeben wird. Sie wird durch fortlaufende Verdoppelung oder Halbierung der Lautstärkeempfindung im Vergleich zu einem Standard-schall ermittelt [4]. Zwischen Lautstärkepegel und Lautheit besteht eine experimentell gut validierte Relation, beide Größen sind also ineinander umrechenbar [5]. Die sone-Skala ist dabei so normiert, daß der Lautheit von 1 sone ein Lautstärkepegel von 40 phon zugeordnet ist.

Die Berechnung des Lautstärkepegels ist relativ kompliziert. Aus diesem Grunde sind Verfahren entwickelt worden, mit deren Hilfe aus dem Geräuschspektrum ein *berechneter*

Lautstärkepegel L_{NG} bzw. eine berechnete Lautheit N_G mit guter Näherung bestimmt werden können [5]. Mittlerweile sind auch für den praktischen Einsatz geeignete Lautheitsmeßgeräte [6] verfügbar. Dies hat zu der Forderung geführt, die Lautheit anstelle des A-bewerteten Schallpegels als Basisgröße für die Beurteilung von Geräuschen heranzuziehen. Es ist allerdings fraglich, ob eine derartige Vorgehensweise zu einer Verbesserung der Lärmbeurteilung führt, da insbesondere ausreichende Grundlagenuntersuchungen zum Zusammenhang zwischen der Lautheit und den verschiedenen Lärmwirkungen fehlen.

Neben der A-Bewertung ist für Fluglärm noch der sog. *Perceived Noise Level* L_{PN} oder PNL von Bedeutung. Er wurde als Alternative zum Lautstärkepegel von Kryter [7] entwickelt und berechnet sich aus einem vorgegebenen Terz- oder Oktavspektrum nach einem in der ISO-Norm 3891 [8] definierten Verfahren. Der Perceived Noise Level kann, falls von einem Terzspektrum ausgegangen wird, durch eine Korrektur zur Berücksichtigung von tonalen Komponenten modifiziert werden (s.w.u). In diesem Fall spricht man vom *tonkorrigierten Perceived Noise Level* L_{TPN} oder $PNLT$. Der auf der Basis des tonkorrigierten Perceived Noise Level ermittelte *Effective Perceived Noise Level* $EPNL$ (s.w.u) ist die maßgebliche Beurteilungsgröße im Rahmen der Lärmzulassung nach ICAO Annex 16 [9].

2.2.3. Ton- und Impulskorrekturen

Geräusche, die die Impulse oder auffällige Pegeländerungen enthalten, können bei gleichem zeitintegrierten Pegel im Vergleich zu gleichförmigen Geräuschen eine erhöhte Störwirkung hervorrufen. Ähnliches gilt für Geräusche, deren Spektrum deutliche Einzeltöne enthält. Um derartige Einflüsse zu berücksichtigen, werden in der Regel additive Korrekturen am (frequenzbewerteten) Gesamtschallpegel angebracht.

Die Ermittlung eines Impulszuschlages ist in DIN 45645, Teil 1 [10] beschrieben. Für zivile Verkehrsflugzeuge kann auf die Anbringung eines derartigen Zuschlages nach DIN 45643 [11] jedoch verzichtet werden. In Sonderfällen — wie bei militärischen Flugzeugen oder Hubschraubern — sind gegebenenfalls Impulszuschläge anzusetzen.

Ein Verfahren zur Ermittlung des Tonzuschlages wird derzeit in DIN 45681 [12] genormt. In ISO 3891 [8] ist ebenfalls ein Verfahren zur Ermittlung einer Tonkorrektur bei der Berechnung des Perceived Noise Level beschrieben. Allerdings ist der von zivilen Strahlverkehrsflugzeugen verursachte Lärm in der Regel nicht tonhaltig. Nach DIN 45643 [11] kann daher für derartige Flugzeuge auf die Anwendung einer Tonkorrektur ebenfalls verzichtet werden.

2.2.4. Zeitbewertung

Der von einem Meßgerät angezeigte Schallpegel wird durch dessen Dynamik — also eine Eigenschaft des Geräts selbst — bestimmt. International sind drei Einstelldynamiken (SLOW, FAST und IMPULSE) genormt [1]. Obwohl die Zeitbewertung FAST der menschlichen Hörempfindung besser angepaßt ist, hat sich aus historisch/meßtechnischen Gründen die Zeitbewertung SLOW im internationalen Rahmen durchgesetzt. Vergleichenden Untersuchungen [13] ergaben, daß die mit SLOW ermittelten Maximalpegel in der Regel um etwa 2 dB niedriger sind als die mit FAST gemessenen. Bei einer zeitlichen Integration des Pegelverlaufs (s.w.u.) liefern beide Einstellungen nahezu identische Werte [11].

Die Tatsache, daß international durchweg die Zeitbewertung SLOW gebräuchlich ist, hat zur Folge, daß sämtliche akustischen Datengrundlagen für die Fluglärmrechnung auf dieser Zeitbewertung beruhen. Auch automatische Fluglärmüberwachungsanlagen arbeiten mit dieser Einstelldynamik [11]. Aus diesen Gründen erscheint es nicht sinnvoll, für die Beschreibung von Fluglärm auf die Zeitbewertung FAST überzugehen. Die Einstelldynamik IMPULSE ist für die Messung von Fluglärm ungeeignet, da durch die hohe Zeitkonstante für den Pegelabfall Fluglärmereignisse vorgetäuscht werden, die sich von echten Ereignissen nicht trennen lassen. Außerdem kann es aus dem gleichen Grunde bei kurzzeitigen Ereignissen zu einer künstlichen Erhöhung der 10dB-down-time (s.w.u) kommen.

2.2.5. Einzelereignispegel

Derjenige Parameter, der die Störwirkung eines Geräusches wohl am meisten bestimmt, ist der Maximalschallpegel L_{max} . Er bestimmt z.B., wie stark sich das Geräusch aus den immer vorhandenen Hintergrundgeräuschen heraushebt. Es gibt eine Reihe von Fluglärm-bewertungskriterien, die die Störwirkung allein von der Höhe und evtl. auch der Häufigkeit auftretender Maximalschallpegel abhängig machen

Neben dem Maximalpegel ist aber auch die Dauer eines Einzelgeräusches mit für dessen Störwirkung verantwortlich. So kann z.B. ein Geräusch mit hohem Maximalpegel aufgrund einer kurzen Dauer durchaus weniger störend wirken als ein länger andauerndes Geräusch mit niedrigerem Maximalpegel. Zur Berücksichtigung der Dauer sind daher in der Lärmbe-wertung sog. *Effektivpegel* L_e eingeführt worden:

$$L_e = k \cdot \lg \left(\frac{1}{t_0} \int 10^{L(t)/k} dt \right) \quad (2-2a)$$

$L(t)$ beschreibt dabei den zeitlichen Verlauf des (bewerteten) Schallpegels, t_0 ist eine Normierungszeit (meist 1 oder 10 Sekunden). Das Integral erstreckt sich über den Zeitraum, in dem das Geräusch als solches erkennbar ist. Obige Gleichung kann, unter Verwendung einer geeigneten Geräuschkdauer t_g , vereinfachend als

$$L_e = k \cdot \lg \left(10^{L_{max}/k} \cdot \frac{t_g}{t_1} \right) = L_{max} + k \cdot \lg \left(\frac{t_g}{t_1} \right) \quad (2-2b)$$

geschrieben werden. Effektivpegel lassen sich also näherungsweise durch den Maximalpegel und die Geräuschkdauer beschreiben. Der sog. *Äquivalenzparameter* k hat üblicherweise den Wert 10 oder 13.3. Dies besagt, daß eine Halbierung der Geräuschkdauer denselben Effekt hat wie eine Senkung des Maximalpegels um 3 bzw. 4 dB. Anstelle des Äquivalenzparameters ist daher auch häufig vom *Halbierungsparameter* $q = k \cdot \lg(2)$ die Rede.

Die Normierungszeit t_1 hängt vom Wert t_0 nach Gl.(2-2a) sowie von der Definition der benutzten Geräuschkdauer t_g ab (s. Abschnitt 2.2.1.). Beispiele für Effektivpegel zeigt Tabelle 2-1:

Effektivpegel L_e	definiert in	Pegelmaß	k	t_g	t_0
L_{AX} (= <i>SEL</i>)	ISO 3891 [8])	L_{AS}	10	t_e	1 [s]
<i>EPNL</i>	ISO 3891 [8]	<i>PNLT</i>	10	t_e	10 [s]
L_{AZ}	DIN 45643 [11]	L_{AS}	13.3	t_{10}	20 [s]

Tabelle 2-1: Definition gebräuchlicher Effektivpegel L_e nach Gl.(2-2b). *PNLT* ist der tonkorrigierte Perceived Noise Level, L_{AS} der mit der Zeitbewertung SLOW gemessene A-bewertete Schallpegel.

2.3. Klassifizierung von Fluglärmbewertungsmaßen

2.3.1. Äquivalente Dauerschallpegel

Die weltweit gebräuchlichsten Fluglärmdeskriptoren sind die äquivalenten Dauerschallpegel L_{EQ} , wie sie durch folgende Definitionsgleichung beschrieben werden:

$$L_{EQ} = k \cdot \lg \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^{N_g} g_i \cdot 10^{L_{max,i}/k} \cdot t_i \right] + C \quad (2-3)$$

mit

- k = Äquivalenzparameter
- T = Bezugszeitraum
- i = laufender Index des einbezogenen Geräusches
- N_g = Anzahl von Geräuschen im Bezugszeitraum T
- g_i = tageszeitbezogener Wichtungsfaktor für das i -te Geräusch
- $L_{max,i}$ = Maximalpegel des i -ten Geräusches
- t_i = Dauer des i -ten Geräusches
- C = (Normierungs-)Konstante

Tabelle 2-2 zeigt eine Übersicht über gebräuchliche äquivalente Dauerschallpegel:

Bewertungs- maß L_{EQ}	$L_{max,i}$	t_i	k	C	g_i für die Zeiten			
					6–7 h	7–19 h	19–22 h	22–6 h
$L_{eq(4,FLG)}-A$	L_A	t_{10}	13.3	0	1.5	1.5	1.5	0
$L_{eq(4,FLG)}-B$	L_A	t_{10}	13.3	0	1	1	1	5
$L_{eq(3)}(24h)$	L_A	t_e	10	0	1	1	1	1
$L_{eq(3)}(Tag)$	L_A	t_e	10	0	1.5	1.5	1.5	0
$L_{eq(3)}(Nacht)$	L_A	t_e	10	0	0	0	0	3
$L_{rFl}(Tag)$	L_A	t_e	10	K	5.972	1.5	5.972	0
L_{DN}	L_A	t_e	10	0	10	1	1	10
L_{DEN}	L_A	t_e	10	0	10	1	3.162	10
NEF	$PNLT$	t_e	10	-48.63	16.67	1	1	16.67
$WECPLN$	$PNLT$	t_e	10	S_0	10	1	3.162	10

Tabelle 2-2: Größen zur Bestimmung von verschiedenen L_{EQ} -ähnlichen Bewertungsmaßen nach (2-3). L_A ist der A-bewertete Schallpegel, $PNLT$ der tonkorrigierte Perceived Noise Level. t_{10} ist die 10dB-down time, t_e die effektive Dauer nach (2-1). K ist eine Impuls- und Tonkorrektur, S_0 ein *seasonal adjustment*. Die Wichtungsfaktoren g_i beziehen sich auf eine Ermittlung des Bewertungsmaßes bezogen auf 24 h.

Zu diesen national und international gebräuchlichen Formen des äquivalenten Dauerschallpegels seien folgende Anmerkungen gemacht:

$L_{eq(4,FLG)}$ In der Bundesrepublik ist der äquivalente Dauerschallpegel $L_{eq(4,FLG)}$ nach dem Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm [14] der vorgeschriebene Deskriptor zur Ermittlung der Lärmschutzbereiche in der Umgebung von zivilen Flughäfen mit Linienverkehr und militärischen Flugplätzen mit Strahlflugbetrieb. Der $L_{eq(4,FLG)}$ ergibt sich als Maximum der für die beiden Berechnungsfälle A und B nach Tabelle 2-2 ermittelten Werte. Der Fall A basiert dabei auf dem reinen Tagesverkehr zwischen 6 und 22 Uhr, der durch den Wichtungsfaktor 1.5 auf 24 Stunden umgerechnet wird. Im Fall B werden auch die Nachtbewegungen (und zwar mit einem Wichtungsfaktor $g_i = 5$) berücksichtigt. Das wesentliche Charakteristikum dieses äquivalenten Dauerschallpegels ist der Äquivalenzparameter $k = 13.3$. Bei einer Verdoppelung der Geräuschhäufigkeit (bei ungeänderter Typenzusammensetzung) erhöht sich der $L_{eq(4,FLG)}$ -Wert um 4 dB. Als Bezugszeitraum T werden jeweils die sechs verkehrsreichsten Monate des betrachteten Jahres zugrunde gelegt.

$L_{eq(3)}$ Der äquivalente Dauerschallpegel nach ISO 3891 [8] beinhaltet keinerlei tageszeitbezogene Wichtungen. Er ist ein direktes Maß für die am Immissionsort eingestrahlte Schallenergie und wird daher auch als *energieäquivalenter Dauerschallpegel* bezeichnet. Hinsichtlich des Beurteilungszeitraumes werden in ISO 3891 keine Aussagen gemacht. Der $L_{eq(3)}$ wird oft über den gesamten Tag von 24 Stunden, die 16 Tagesstunden von 6–22 Uhr oder über die 8 Nachtstunden von 22–6 Uhr ermittelt.

L_{rFl} Der maßgebende Fluglärmbeurteilungspegel L_{rFl} nach DIN 45643 [11] stellt den fluglärmrelevanten Beitrag für eine (energetische) Überlagerung zum maßgebenden Gesamtbeurteilungspegel L_r nach DIN 45645 [10] dar. Für die 16 Tagestunden zwischen 6 und 22 Uhr wird der Beurteilungspegel $L_{rFl(Tag)}$ definiert. Er berücksichtigt dabei ein erhöhtes Schutzbedürfnis in den vier Tagesrandstunden von 6–7 und 19–22 durch einen Pegelzuschlag von 6 dB. Aus diesem ergibt sich der in Tabelle 2-2 ausgewiesene Wichtungsfaktor von 5.972. Der in Tabelle 2-2 nicht eingetragene Beurteilungspegel $L_{rFl(Nacht)}$ ist identisch mit dem energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{eq(3)(Nacht)}$ für die Nacht, solange nicht der für die lauteste Nachtstunde ermittelte energieäquivalente Dauerschallpegel um 4 dB höher ist als der $L_{eq(3)(Nacht)}$. In diesem

Fall wäre ersterer als maßgebender Fluglärmbeurteilungspegel für die Nacht anzusetzen.

L_{DN} Der Day-Night Average Sound Level L_{DN} (häufig auch als DNL bezeichnet) ist derzeit das weltweit wohl gebräuchlichste Fluglärmbewertungsmaß [15]. Er stellt einen energieäquivalenten Dauerschallpegel dar, in dem nächtliche Flugbewegungen in der Zeit von 22 bis 7 Uhr mit einem Multiplikator von 10 gewichtet werden.

L_{DEN} Der in Skandinavien gebräuchliche Day-Evening-Night Sound Level L_{DEN} stellt eine Erweiterung des L_{DN} dar, bei der Bewegungen in den Abendstunden von 19 bis 22 Uhr mit einem zusätzlichen Aufschlag von 5 dB bewertet werden [15]. Daraus resultiert ein Wichtungsfaktor $g_1 = 3.162$ für diese Tagesperiode.

NEF Der Noise Exposure Forecast [15] basiert auf dem tonkorrigierten Perceived Noise Level. Er ist in Australien und z.T. in den USA gebräuchlich.

$WECPNL$ Der Weighted Equivalent Continuous Perceived Noise Level [15] ist z.B. in Japan oder Italien in Gebrauch. Er wird mit einer von der Jahreszeit abhängigen Konstante (*Seasonal Adjustment*) gebildet, die je nach der Durchschnittstemperatur während eines Monats Werte zwischen +5 und -5 dB annimmt.

2.3.2. Mittlerer Maximalschallpegel

Die allgemeine Definition eines mittleren Maximalschallpegels ist durch folgende Gleichung gegeben:

$$\overline{L_{max}} = k \cdot \lg \left[\frac{1}{N_g} \sum_{i=1}^{N_g} 10^{L_{max,i}/k} \right] \quad (2-4)$$

Dabei ist $L_{A,max,i}$ der A-bewertete Maximalschallpegel des i-ten Geräusches, N_g ist die Anzahl der in die Mittelung eingehenden Geräusche. k ist wieder der Äquivalenzparameter. Die nach Gl.(2-4) durchgeführte Mittelung ist nicht arithmetischer sondern logarithmischer Art. Im Prinzip muß (wie auch beim L_{EQ}) in der Mittelungsvorschrift noch angegeben werden, welche Geräusche mit einbezogen werden (z.B. durch einen Mindestwert für den Maximalschallpegel).

Ein in Deutschland gebräuchliches Maß ist der mittlere A-bewertete Maximalschallpegel nach DIN 4109 [16]. Dabei wird neben der A-Bewertung die Zeitbewertung FAST zugrunde

gelegt und es wird (energieäquivalent) mit $k = 10$ gemittelt. Ein Mindestwert für die mit einzubeziehenden Pegel ist in dieser Vorschrift nicht angegeben.

2.3.3. Schwellenwertkriterien

Eine dritte Form von Fluglärmdeskriptoren wird definiert durch die Anzahl der Überschreitungen eines Pegelwerts während einer bestimmten Zeitperiode ($NAT = \text{Number above Threshold}$). Solche Kriterien können z.B. bei der Berücksichtigung von Aufweckreaktionen sinnvoll sein. Ein Beispiel für ein NAT-Kriterium ist das Kriterium zur Ausweisung eines Nachtbelastungsgebietes nach Jansen [17]. Dieses Kriterium besagt, daß eine Aufweckschwelle von 60 dB im A-bewerteten Maximalschallpegel am Ohr des Schläfers als Eckwert für die Beurteilung von Aufweckreaktionen anzusetzen ist und daß bis zu 6 Lärmereignisse oberhalb dieses Schwellenwerts pro Nacht noch als zumutbar anzusehen sind. Für Außenpegel schlägt Jansen ein Kriterium von 6 mal 75 dBA pro Nacht vor. Entsprechend ist das Nachtbelastungsgebiet nach Jansen durch diejenige Isolinie umschlossen, auf der 6 mal pro Nacht Pegel von 75 dBA auftreten.

2.3.4. Andere Formen von Bewertungsmaßen

Der sog. *Noise and Number Index NNI* bildete in Großbritannien bis zum Jahr 1990 die Grundlage der Lärmschutzgesetzgebung und war auch bis zum Anfang der 90er Jahre das in der Schweiz benutzte Bewertungsmaß. In beiden Ländern wurde mittlerweile allerdings ein Übergang zum äquivalenten Dauerschallpegel vollzogen. In Irland ist der *NNI* derzeit noch in Gebrauch. Er ist wie folgt definiert [15]:

$$NNI = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N_g} 10^{PNL_i/10} \right) + 15 \cdot \log(N_g) - 80 \quad [NNI] \quad (2-6)$$

Die Summation basiert auf dem maximalen Perceived Noise Level PNL_i und wird über alle Geräusche erstreckt, die an einem Tag zwischen 6 und 18 Uhr auftreten und deren Maximalpegel größer als 80 PNdB ist. Die Dauer dieser Einzelgeräusche wird nicht berücksichtigt, dafür geht die Anzahl N_g separat in die Ermittlung des *NNI* ein. Prinzipiell stellt der *NNI* also einen mittleren Maximalschallpegel mit einem auf der Bewegungshäufigkeit beruhenden additiven Korrekturfaktor dar.

In Frankreich bildet der sog. *Index Psophique* I_p seit 1985 die gesetzliche Grundlage der Fluglärmschutzgesetzgebung:

$$I_p = 10 \cdot \log \left\{ \left(\sum_{i=1}^{N_d} 10^{PNL_i/10} \right) + \left(\sum_{j=1}^{N_n} 10^{(PNL_j+10)/10} \right) \right\} - 32 \text{ [dB]} \quad (2-7)$$

PNL_i sind dabei die Perceived Noise Level der während der 16 Tagesstunden von 6 bis 22 Uhr auftretenden N_d Geräusche. PNL_j sind die entsprechenden Pegel der N_n Geräusche während der 8 Nachtstunden.

Ein in den Niederlanden gebräuchliches Bewertungsmaß ist der sog. *Kosten-Index* B [18].

$$B = 20 \cdot \log \sum_i \left(n_i \cdot 10^{L_{A,max,i}/15} \right) - 157 \quad \text{[KE]} \quad (2-5)$$

In die Berechnung des Kosten-Index gehen alle Geräusche während eines Jahres ein, deren A-bewertete Maximalschallpegel $L_{A,max,i}$ einen Wert von 65 dB überschreiten.

Tagesperiode	n_i
00 — 06 h	10
06 — 07 h	8
07 — 08 h	4
08 — 18 h	1
18 — 19 h	2
19 — 20 h	3
20 — 21 h	4
21 — 22 h	6
22 — 23 h	8
23 — 24 h	10

Tabelle 2-3: Werte des Nachtstraaffactor n_i zur Berechnung des Kosten-Index B .

Der sog. *Nachtstraaffactor* n_i ist ein Wichtungsfaktor der in Abhängigkeit von der Tageszeit die in Tabelle 2-3 dargestellten Werte annehmen kann. Prinzipiell stellt der Kosten-Index einen äquivalenten Dauerschallpegel dar, der mit einer konstanten Geräuschkdauer ermittelt wird.

2.4. Die Empfehlungen der Europäischen Union

Die Aktivitäten der Europäischen Gemeinschaft zur zukünftigen Lärmpolitik führten im April 1998 zur Einrichtung von fünf Working-Groups, die sich mit der Behandlung verschiedener Aspekte des Lärmschutzes auseinandersetzen sollen. Diese Working-Groups setzen sich aus nationalen technischen Experten sowie Vertretern der Industrie, der Großforschungseinrichtungen sowie der maßgeblichen nationalen Regierungstellen zusammen. Als Schnittstellen zur europäischen Kommission wurden eine *Interservice Group on Noise Policy* sowie ein *Steering Committee on Environmental Noise Policy* eingerichtet. Die fünf Working-Groups befassen sich im einzelnen mit folgenden Aufgaben:

- WG 1: *Indicators*. Diese WG soll Fluglärmdeskriptoren definieren, die zur Beschreibung der Lärmbelastung sowohl durch Luft- als auch durch Schienen- und Straßenverkehr geeignet sind und innerhalb der Europäischen Union als Grundlage zur Lärmbewertung und Planung eingesetzt werden können.
- WG 2: *Dose/Effect*. Diese WG setzt sich mit den Dosis-Wirkungsbeziehungen für Belästigung, Schlafstörungen, Sprachverständlichkeit und anderen durch Lärm hervorgerufenen Effekten auseinander. Ziel ist u.a. auch die Bereitstellung von Vorschlägen für Bewertungsmaße, die durch die Aktivitäten der WG 1 nicht abgedeckt werden.
- WG 3: *Computation and Measurement*. WG 3 befaßt sich mit der Erarbeitung von harmonisierten Berechnungs- und Meßverfahren für die verschiedenen Lärmarten. Sie soll außerdem Richtlinien für vorläufige Verfahren zur Messung und Bewertung erarbeiten, die den Mitgliedsstaaten, die nicht über derartige Verfahren verfügen, bereitgestellt werden sollen, bis die harmonisierten Verfahren erarbeitet sind.
- WG 4: *Noise Maps*. Das im Rahmen der Aktivitäten von WG 4 bearbeitete Noise-Mapping dient der Umsetzung und Präsentation der mittels Berechnungs- oder Meßverfahren ermittelten Lärmbelastung. Die Arbeiten der WG 4 setzen insofern auf den Resultaten der Working-Groups 1 bis 3 auf.
- WG 5: *Abatement*. Diese WG soll Richtlinien erarbeiten, die von den Gesetzgebern der Mitgliedsstaaten zur Lärminderungsplanung herangezogen werden können.

Die Aktivitäten der WG's 2 bis 4 sollen im Laufe des Jahres 2002, die der WG 5 im Jahr 2001 abgeschlossen sein. Die ursprüngliche Planung sah vor, daß die WG 1 einen Entwurf eines Positionspapiers zu Bewertungsmaßen im Dezember 1998 vorlegte. Dieser Entwurf wurde

allerdings erst im April 1999 fertiggestellt [21]. Die endgültige Fassung wird vermutlich im September dieses Jahres veröffentlicht. Der Entwurf gibt folgende Empfehlungen:

- Ein europaweit standardisiertes Bewertungsmaß sollte auf einem A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel basieren.
- Dieser Deskriptor sollte für jede Lärmart separat ausgewiesen werden.
- Die Ausweisung sollte für drei Zeitscheiben erfolgen: Eine 12-stündige Tagesperiode, eine 8-stündige Nachtperiode sowie eine 4-stündige Periode für die Tagesrandzeiten. Für die Tagesperiode wird als Standardwert der Zeitraum von 7–12 h vorgeschlagen. Die entsprechenden Vorschläge für die Tagesrandzeiten und für die Nachtperiode sind 19–23 Uhr und 23–7 Uhr.
- Als Bezugszeitraum wird ein repräsentatives Kalenderjahr angegeben. Eine zusätzliche Darstellung des Deskriptors für Sonntage wird empfohlen.
- Der Anwendungsbereich des standardisierten Bewertungsmaßes ist allgemeiner Art. Bei speziellen Anwendungsbereichen (Vorhandensein von tonalen oder impulshaltigen Geräuschen oder Behandlung niederfrequenten Lärms) sollte problembezogen vorgegangen werden.

Für Anwendungszwecke im planerischen Bereich sollten die ermittelten Werte des Deskriptors für die drei Teilzeiten zu einem einzigen Wert — dem *European Environmental Noise Indicator* L_{EU} — kombiniert werden. Dazu sollte für die Tagesrandzeiten ein Pegelzuschlag von 5 dB und für die Nachtperiode ein Zuschlag von 10 dB addiert werden. Dies entspricht Wichtungsfaktoren g_i von 3.162 bzw. 10 nach Gl.(2-3). Im Prinzip handelt es sich beim L_{EU} also um einen modifizierten Day-Evening-Night Sound Level L_{DEN} .

Zur Beschreibung der nächtlichen Lärmbelastung sollte der entsprechende, für diese Zeitscheibe ermittelte Wert des energieäquivalenten Dauerschallpegels herangezogen werden. Dieser wird als $L_{EU,N}$ bezeichnet.

Sofern die spezifische Lärmsituation durch mehrere unterschiedliche Geräuscharten (z.B. Flug- und Straßenverkehrslärm) gleichzeitig bestimmt wird, und sofern die daraus resultierenden Werte des L_{EU} bzw. $L_{EU,N}$ zu einem kumulierten Wert zusammengefaßt werden, so sollte dies bei der Ausweisung dieses Werts angemerkt werden. Die WG 1 warnt allerdings davor, daß eine kumulative Betrachtung mehrerer Lärmarten nicht in allen Fällen eine sachgerechte Darstellung der Einflüsse der einzelnen Beiträge gewährleistet.

2.5. Bewertungsmaße: Anwendungsgebiete, Vor- und Nachteile

2.5.1. Äquivalente Dauerschallpegel

Fluglärmbewertungsmaße in der Form von äquivalenten Dauerschallpegeln nach Gl.(2-3) sind in der Regel hoch mit der Störwirkung korreliert. Zur Untersuchung der Korrelation der verschiedenen äquivalenten Dauerschallpegel untereinander wurden Vergleichsrechnungen durchgeführt, die im Anhang A beschrieben sind. Derartige Rechnungen wurden schon 1981 in einer vom Umweltbundesamt in Auftrag gegebenen umfangreichen Studie am Max-Planck-Institut für Strömungsforschung durchgeführt. Die im Anhang A beschriebenen Untersuchungen lehnen sich eng an diese Studie an, basieren aber auf den aktuellen Gegebenheiten des Luftverkehrs (insbesondere dem derzeit bestehenden Typenmix). Ihr Umfang ist mit dem der UBA-Studie zwar nicht zu vergleichen, da im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur die Korrelation verschiedener L_{EQ} -Varianten mit dem $L_{eq(4,FLG)}$ untersucht wurde. Die Ergebnisse spiegeln aber die seinerzeit gewonnenen Erkenntnisse gut wieder. Insbesondere bestätigt sich, daß die Korrelation der verschiedenen L_{EQ} -Varianten untereinander sehr hoch ist, d.h. sie sind gleichermaßen geeignet, um die Fluglärmbelastung durch einen einzigen Zahlenwert wiederzugeben.

Die Wahl eines bestimmten Bewertungsmaßes der Form (2-3) kann daher nur teilweise mit wissenschaftlichen Argumenten begründet werden. Wichtig ist jedoch, daß Grenz- oder Richtwerte (die z.B. die Grundlage planerischer Maßnahmen bilden) jeweils der Form des entsprechenden Äquivalenten Dauerschallpegels angepaßt sind. Insbesondere ist bei einem Wechsel des Bewertungsmaßes darauf zu achten, daß auch die zugehörigen Grenzwerte in adäquater Weise geändert werden.

Der äquivalente Dauerschallpegel hat sich in den letzten Jahren weltweit als Planungshilfe (z.B für Siedlungsplanung) bewährt. Für andere Zwecke sind jedoch Besonderheiten zu beachten. Dies ist damit verbunden, daß der Einfluß des Maximalpegels nur noch indirekt (im Zusammenspiel mit der Geräuschdauer) berücksichtigt wird. So können z.B. Aufweckreaktionen während der Nachtperiode (die z.B. mit der Anzahl von Überschreitungen eines gewissen Pegelwerts zusammenhängen) nicht berücksichtigt werden. Außerdem kann in der Umgebung von Anflugstrecken die niedrige Geräuschdauer zu relativ niedrigen L_{EQ} -Werten führen, obwohl die Maximalpegel der Einzelgeräusche relativ hoch ausfallen können.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Ermittlung von Äquivalenten Dauerschallpegeln ist die Wahl des Bezugszeitraums. Diese kann insbesondere durch die Art des Flugbetriebes nahegelegt werden. So kann die Benutzung eines kürzeren Bezugszeitraums sinnvoll

sein, wenn während bestimmter Zeitperioden systematisch hohe Verkehrsaufkommen auftreten. Dies kann z.B. bei kleineren Flugplätzen der Fall sein. Hier wird der Flugbetrieb regelmäßig hauptsächlich an den besonders störempfindlichen Wochenenden (Sportflieger, Fallschirmsprungbetrieb) abgewickelt, während der Betrieb innerhalb der Woche bedeutend niedriger ist. In derartigen Fällen, in denen in der Regel die Differenz zwischen mittlerem Maximalpegel (s.w.u) und L_{EQ} groß ist, ist letzterer zur Beschreibung der Lärmbelastung nur bedingt geeignet. Auf Verkehrsflughäfen dagegen wird der Verkehr in der Regel mehr oder weniger kontinuierlich während des ganzen Jahres abgewickelt. Je länger der Bezugszeitraum gewählt wird, um so besser gibt der äquivalente Dauerschallpegel die mittlere langjährige Verkehrssituation wieder.

2.5.2. Mittlere Maximalpegel

Der mittlere Maximalpegel hat den Nachteil, daß er nur von der Form der in die Mittelung eingehenden Pegelverteilung, nicht aber von der Gesamtanzahl der Schallereignisse abhängt. So erzeugen 10 Geräusche mit einem Maximalpegel von 80 dB genauso einen mittleren Maximalpegel von 80 dB wie 1000 Geräusche mit einem Maximalpegel von 80 dB.

Ein weiterer Nachteil ist, daß die Größe des mittleren Maximalpegels stark davon abhängig ist, wie hoch der Schwellenwert für die in die Mittelung mit einzubeziehenden Geräusche ist. Dies sei an folgendem Beispiel erläutert: Berechnungen für den Meßpunkt 2 (Büderich) der Fluglärmüberwachungsanlage in Düsseldorf auf der Basis des Flugverkehrs im Jahre 1991 ergaben einen $L_{eq(4,FLG)}$ -Wert von 66.5 dBA und einen mittleren Maximalpegel von 81.2 dBA. Dies entspricht einer für $L_{eq(4,FLG)}$ -Werte von mehr als etwa 55 dBA typischen Differenz in der Größenordnung von 15 dB. Dabei gingen in die Berechnung, wie in der AzB vorgeschrieben, alle Geräusche mit einem Maximalpegel von mehr als 55 dBA mit ein. Die Meßstelle 2 ist jedoch so eingerichtet, daß nur Geräusche mit Maximalpegeln oberhalb der Meßschwelle von 75 dBA registriert werden. Legt man diesen Schwellenwert bei der Berechnung zugrunde, so reduziert sich der $L_{eq(4,FLG)}$ um 0.4 dB auf einen Wert von 66.1 dBA während der mittlere Maximalpegel sich um 2.1 dB auf einen Wert von 83.3 dB erhöht.

Die Größe des mittleren Maximalpegels ist also stärker willkürlichen Annahmen (nämlich der Vorgabe eines Schwellenwerts) unterworfen als die des äquivalenten Dauerschallpegels. Der Einfluß der der Ermittlung von mittlerem Maximalpegel bzw. äquivalentem Dauerschallpegel zugrunde liegenden Pegelhäufigkeitsverteilung ist in Tabelle 2-4 dargestellt. Hier sind 4 unterschiedliche Formen von Häufigkeitsverteilungen (schematisch dargestellt auf der Basis

von drei Pegelklassen) zugrunde gelegt. Bei der Berechnung des in der Geräuschkdauer von 10 Sekunden zugrunde gelegt. Als Beurteilungszeitraum wurden 16 Stunden angesetzt.

	Anzahl Geräusche mit Pegel			$\overline{L_{max}}$ [dB]	$L_{eq(3)}$ [dB]
	55 dB	75 dB	95 dB		
typische Verteilung	1	10	100	94.6	77.4
	10	100	10	84.6	67.8
	100	10	1	75.0	57.8
$L_{eq(3)}$ konstant	0	0	2	95.0	60.4
	0	200	0	75.0	60.4
	20000	0	0	55.0	60.4
$\overline{L_{max}}$ konstant	100	0	0	55.0	37.4
	1000	0	0	55.0	47.4
	10000	0	0	55.0	57.4
extreme Verteilung	100	0	2	77.9	60.4
	1000	0	2	68.2	60.6
	10000	0	2	59.8	62.2

Tabelle 2-4: Einfluß der Form der Pegelhäufigkeitsverteilung auf mittleren Maximalpegel $\overline{L_{max}}$ und energieäquivalentem Dauerschallpegel $L_{eq(3)}$ (bezogen auf 16 Stunden, Dauer der Einzelgeräusche jeweils 10 Sekunden).

Die erste Verteilungsform — ausgeprägtes Maximum mit abfallenden Flanken — stellt eine grobe Näherung an Verteilungen dar, wie sie typischerweise in der Praxis auftreten. Für solche Verteilungen ist die Differenz zwischen $\overline{L_{max}}$ und $L_{eq(3)}$ — unabhängig von der Lage des Verteilungsmaximums — nahezu konstant. Sie beträgt etwa 17 dB. Differenzen dieser Größenordnung treten typischerweise auch in der Praxis auf. Die zweite Form der Verteilungen ist so gewählt, daß der energieäquivalente Dauerschallpegel konstant bleibt: 2 Geräusche mit Maximalpegeln von 95 dB werden (bei konstanter Dauer) durch 200 Geräusche von 75 dB bzw. 20000 Geräusche von 55 dB ersetzt. In diesem Fall sinkt der mittlere Maximalpegel von 95 auf 55 dB. Hält man demgegenüber den mittleren Maximalpegel konstant, indem man nur Geräusche einer Pegelklasse betrachtet, so steigt der $L_{eq(3)}$ bei einer Verzehnfachung der Häufigkeit jeweils um 10 dB. Die letzte Verteilungsform stellt eine extreme Verteilung dar, bei der zu wenigen lauten Geräusche eine Anzahl von leisen Geräuschen hinzugefügt werden. Hierdurch wird der mittlere Maximalpegel stark abgesenkt, während der energieäquivalente Dauerschallpegel (je nach Anzahl der hinzukommenden Geräusche) mehr oder weniger stark ansteigt. Das bedeutet, daß in Gebieten mit hoher Fluglärmbelastung das Hinzufügen einer

großen Anzahl von Geräuschen mit niedrigen Maximalpegeln den mittleren Maximalpegel stark absenkt, während der L_{eq} nur unwesentlich erhöht wird.

Der mittlere Maximalpegel kann allerdings von Nutzen sein, wenn die Anzahl der Flugbewegungen gering ist und der mittlere zeitintegrierte Pegel (also z.B. der L_{EQ}) gegenüber den auftretenden Maximalpegeln sehr klein ist. DIN 4109 [16] empfiehlt als *maßgeblichen Außenlärmpegel* den um 20 dB verminderten mittleren Maximalpegel zugrunde zu legen, wenn vermutet wird, daß die Belastung durch Fluglärm vor allem von sehr hohen Spitzenpegeln herrührt. Diese Empfehlung bezieht sich allerdings auf Gebiete, die nicht durch das Fluglärngesetz oder entsprechende landesrechtliche Regelungen abgedeckt sind. Weiterhin sei erwähnt, daß die in DIN 4109 zitierte Differenz zwischen von 20 dB zwischen L_{EQ} und mittlerem Maximalpegel in einer entsprechenden Regelung nach VDI 2719 [19] nur mit 10 dB angesetzt wird. Hier liegen also widersprüchliche Regelwerke vor. Generell kann jedoch angemerkt werden, daß in Fällen, in denen der mittlere Maximalpegel wesentlich höher als der äquivalente Dauerschallpegel ist, ersterer zur Beschreibung der Lärmsituation mit herangezogen werden sollte. Die in DIN 4109 angegebene Differenz von 20 dB scheint hier einen sinnvolleren Ansatz zu bieten als der in VDI 2719 zitierte Wert von 10 dB, da (wie schon erwähnt) 15–20 dB eine typische Größenordnung für die Differenz zwischen mittlerem Maximalpegel und $L_{eq(4,FLG)}$ ist (siehe auch Tabelle 2-4).

2.5.3. Schwellenwertkriterien

Schwellenwertkriterien haben einen Nachteil, der am Beispiel des Jansen'schen Kriteriums zur Ausweisung von Nachtbelastungsgebieten erläutert werden soll: Beim Auftreten von 6 Ereignissen mit einem Maximalpegel von mehr als 75 dBA sind Gesundheitsgefährdungen gemäß obiger Definition des Nachtbelastungsgebietes nicht mehr auszuschließen. Demgegenüber ist beim Auftreten von 5 Ereignissen mit einem Maximalpegel von 75 dBA oder mehr (z.B. 100 dBA) sowie beliebig vielen Ereignissen mit einem Maximalpegel von weniger als 75 dBA (z.B. 74.5 dBA) das Kriterium nicht erfüllt, eine Gesundheitsgefährdung also auszuschließen.

Anschaulich kann man anhand einer (gemessenen oder errechneten) Maximalpegelverteilung erkennen, ob ein Immissionsort in dem durch ein NAT-Kriterium definierten Gebiet liegt. Abb.2-2 zeigt im unteren Teildiagramm eine derartige (in diesem Fall berechnete) Maximalpegelverteilung, die durch den durchschnittlich während einer Nacht zwischen 22

und 6 Uhr in der Umgebung des betreffenden Immissionsortes abgewickelten Verkehr hervorgerufen wird. Das obere Teildiagramm zeigt die zugehörige Summenhäufigkeitsfunktion, die darstellt, wie oft ein Pegelwert während der entsprechenden Zeitperiode erreicht oder überschritten wird.

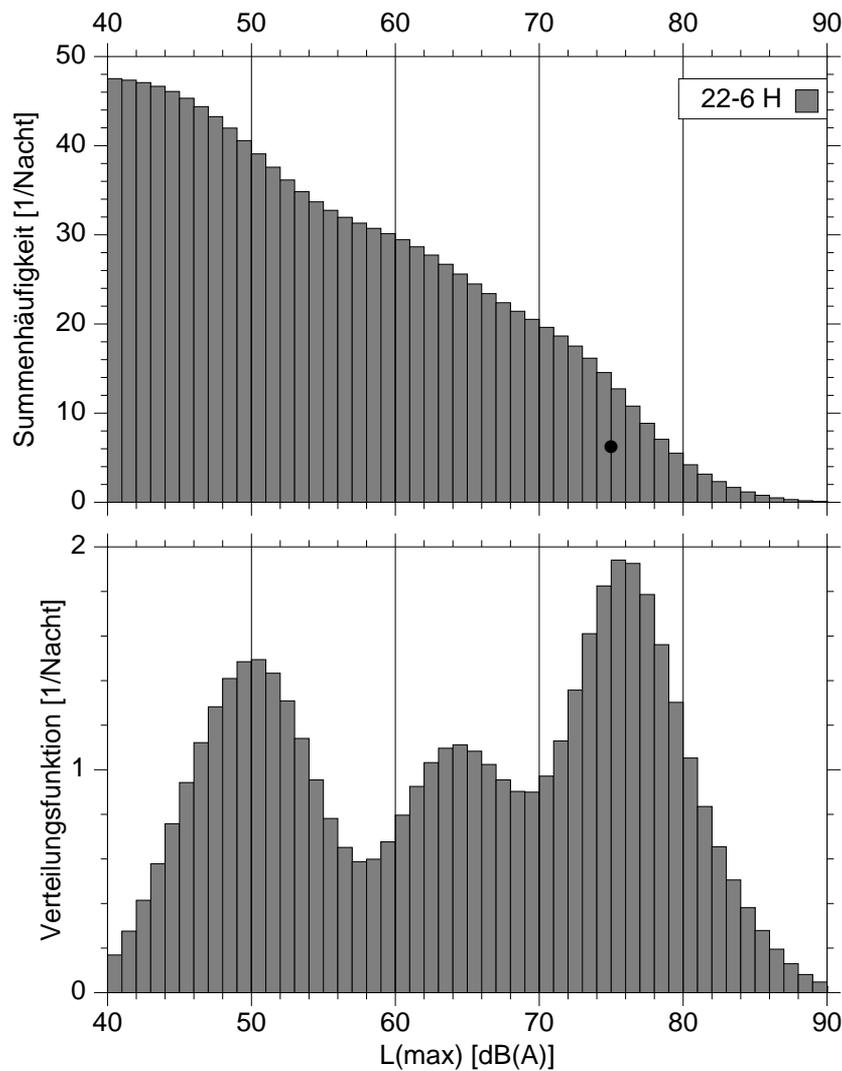


Abb.2-2: Beispiel einer rechnerisch ermittelten Maximalpegelverteilung und der zugehörigen Summenhäufigkeitsfunktion für die Nachtperiode zwischen 22 und 6 Uhr. Der Immissionsort liegt innerhalb des Nachtbelastungsgebietes, da der Wert von 75 dB mehr als 6 mal pro Nacht erreicht wird.

Die Auftragung als Summenhäufigkeit hat den Vorteil, daß Schwellenwertkriterien (wie dasjenige für das Nachtbelastungsgebiet) hier durch einen diskreten Punkt dargestellt werden: Liegt dieser Punkt unter der Summenhäufigkeitskurve (d.h. innerhalb des grau hinterlegten Gebietes), so liegt der entsprechende Immissionsort in dem durch das NAT-Kriterium

definierten Gebiet.

Kriterien, die nicht auf der Kombination eines einzelnen Pegelwertes und einer einzelnen Häufigkeit sondern auf einem funktionalen Zusammenhang zwischen beiden Größen beruhen sind bei ihrer Ermittlung gegenüber dem oben beschriebenen Effekt nicht so empfindlich. So ist nach Griefahn [20] z.B. bei 2 Schallereignissen mit Maximalpegeln von 59.4 dBA am Ohr des Schläfers mit insgesamt ebensovielen Aufwachreaktionen zu rechnen wie bei 10 Ereignissen mit Maximalpegeln von 54.1 dBA. Allerdings ist das Griefahn-Kriterium streng genommen nicht als NAT-Kriterium zu betrachten, da es im Prinzip einen integralen Charakter hat: 1 Maximalpegel mit 59.4 dBA und 5 Ereignisse mit 54.1 dBA erfüllen das Kriterium genauso wie 2 Maximalpegel mit 59.4 dBA oder 10 Maximalpegel mit 54.1 dBA. Außerdem ist das Griefahn-Kriterium für auf einen begrenzten Pegel- bzw. Häufigkeitsbereich definiert, was seine praktische Anwendbarkeit einschränkt.

Generell besitzen NAT-Kriterien die Eigenschaft, daß sie lediglich einen Grenzwert definieren. Die Gesamtanzahl und die Höhe der Überschreitungen eines vorgegebenen Schwellenwerts werden nicht vollständig berücksichtigt, was zur Folge hat, daß beispielsweise 100 Maximalpegel von 76 dBA genauso das oben genannte Jansen'sche Kriterium erfüllen wie 6 Maximalpegel von 76 dBA oder 6 Maximalpegel von 100 dBA oder mehr.

2.6. Zur Wahl eines geeigneten Bewertungsmaßes

Äquivalente Dauerschallpegel nach (2-3) sind in ihren verschiedenen Ausprägungsformen — wie schon erwähnt — weltweit in Gebrauch. Sie repräsentieren derzeit also das Standardverfahren, um die die Lärmbelastung durch eine Einzahlwert zu beschreiben. Dementsprechend empfiehlt auch die Europäische Kommission in einem Positionspapier zu Lärmbewertungsmaßen aus dem Jahr 1999 [21] einen Day-Evening-Night Equivalent Sound Level L_{DEN} (s. Tabelle 2-2) auf der Basis des A-bewerten Schallpegels als Standard-Bewertungsmaß in der Europäischen Gemeinschaft einzuführen.

In speziellen Fällen sind äquivalente Dauerschallpegel allerdings zu einer adäquaten Beschreibung der Lärmbelastung nicht unbedingt geeignet. Ein Beispiel wäre eine Lärmsituation, die durch eine relativ kleine Anzahl von lauten Geräuschen charakterisiert wird. Dies bedeutet, daß der mittlere Maximalschallpegel nach Gl.(2-4) den L_{EQ} -Wert um einen Betrag Δ überschreitet, der größer ist als ein kritischer Wert Δ^* . Es wird häufig vorgeschlagen, in solchen Fällen das Bewertungsmaß durch ein vom L_{EQ} abweichendes Verfahren festzulegen.

Ein derartiger neuer — auch durch einen Einzahlwert charakterisierter — Deskriptor sollte folgende Bedingungen erfüllen:

- (i) Er sollte auf den Erkenntnissen von sozialpsychologischen und medizinischen Feld- und Laboruntersuchungen basieren
- (ii) Er sollte kontinuierlich in den Standarddeskriptor — also den L_{EQ} — übergehen, wenn die Lärmsituation vom speziellen Fall in den Normalfall (für den der Standarddeskriptor benutzt wird) übergeht.
- (iii) Er sollte — bei identischem Resultat — auch dann benutzbar sein, wenn die Lärmbelastung durch den zeitlichen Schallpegelverlauf während des gesamten Beurteilungszeitraums T beschrieben wird. Diese Bedingung wird durch äquivalente Dauerschallpegel erfüllt, wenn in Gl.(2-3) als Dauer gerade die effektive Dauer t_e eingesetzt wird:

$$L_{EQ} = k \cdot \lg \left[\frac{1}{T} \int_0^T g_i \cdot 10^{L(t)/k} \right] + C \quad (2-8)$$

Bewertungsmaße wie *NNI*, *Kosten-Index* oder *Index Psophique* erfüllen diese Bedingung nicht, was als Argument gegen die Verwendung dieser Größen spricht.

- (iv) Gewöhnlich werden bei der Ermittlung eines Fluglärmbewertungsmaßes nur diejenigen Geräusche mit berücksichtigt, deren Maximalpegel einen gewissen Schwellenwert überschreiten (typischerweise in der Größenordnung von 50 bis 60 dBA). Wenn dieser

Schwellenwert klein genug ist — z.B. wesentlich kleiner als der lokale L_{EQ} — dann sollte sich das Bewertungsmaß nicht oder nur unwesentlich ändern, wenn der Schwellenwert herabgesetzt wird. Diese Bedingung ergibt sich aus der Tatsache, daß sich die Lärmbelastung nicht wesentlich ändert, wenn zusätzliche Schallereignisse mit sehr niedrigen Maximalpegeln hinzugefügt werden. Dieser Anforderung genügt insbesondere der mittlere Maximalschallpegel nicht.

- (v) Solange Studien zur Lärmwirkung nicht definitiv ergeben, daß Fluglärm anders zu bewerten ist als andere Lärmarten, sollte das Bewertungsmaß auch zur Beurteilung dieser anderen Lärmarten (wie z.B. Straßen- oder Schienenverkehrslärm) herangezogen werden können. Dies ergibt sich zwangsläufig aus Anforderung (iii).

3. Fluglärmrechnungsverfahren

3.1. Allgemeines, Klassifizierung

Fluglärmbewertungsmaße können einerseits direkt durch Messung (z.B. durch automatische Fluglärmüberwachungsanlagen), andererseits durch Berechnung ermittelt werden. Im Falle von prognostizierten Flugbetriebsszenarien — z.B. zukünftigen oder modellhaften Flugbetriebsfällen — bietet die Berechnung die einzige Möglichkeit zur Ermittlung der Lärmbelastung.

Ein Fluglärmrechnungsverfahren setzt sich aus einer Berechnungsvorschrift sowie einer Datenbasis zusammen. Letztere basiert in der Regel auf einer geeigneten Klassifizierung der am Luftverkehr teilnehmenden Flugzeugmuster.

Für jede der dem Berechnungsverfahren zugrunde liegenden Flugzeugkategorien existiert in der Datenbasis ein akustischer sowie ein flugtechnischer Datensatz. Art und Umfang dieser Datengrundlage werden durch die Art des Berechnungsverfahrens definiert. Dabei kann man prinzipiell zwei Arten unterscheiden:

- “Konventionelle” Verfahren
- Simulationsverfahren

Zur Komplettierung einer Fluglärmrechnung ist neben der Berechnungsvorschrift und der Datengrundlage noch eine Flugbetriebsprognose notwendig. Diese besteht aus einer geometrischen Beschreibung der An- und Abflugstrecken sowie einer Zuordnung von Flugbewegungen der einzelnen Kategorien zu diesen Flugstrecken.

In den folgenden Abschnitten werden die Eigenschaften sowohl von konventionellen Prognoseverfahren als auch von Simulationsverfahren diskutiert. Der Schwerpunkt liegt dabei bei den konventionellen Verfahren, da diese die in der Praxis der Fluglärmrechnung gebräuchlichsten Verfahren darstellen.

3.2. Konventionelle Fluglärmprognoseverfahren

3.2.1. Übersicht, Anforderungen

Die meisten der weltweit im praktischen Einsatz befindlichen Fluglärmberechnungsverfahren sind von konventioneller Art. Die ihnen zugrunde liegenden Berechnungsalgorithmen basieren auf vereinfachenden Annahmen bezüglich der physikalischen Beschreibung sowohl für das Flugzeug als Schallquelle als auch für die Schallausbreitungsvorgänge. Diese vereinfachenden Annahmen haben mehrere Gründe:

- Im praktischen Gebrauch müssen die Berechnungen mit akzeptablem Zeitaufwand durchführbar sein. Die meisten der derzeit benutzten Verfahren sind schon mehrere Jahrzehnte — wenn auch nicht in ungeänderter Form — in Gebrauch. Diese Forderung war deshalb bei der Entwicklung der Rechenverfahren ein maßgeblicher Einflußfaktor.
- Mit steigender Komplexität des Berechnungsalgorithmus steigen auch die Anforderungen an die Datengrundlage. Während der Entwicklungsperiode der meisten gängigen Prognoseverfahren standen die notwendigen akustischen und flugbetrieblichen Grunddaten z.T. nur in begrenztem Umfang zur Verfügung.
- Die konventionellen Verfahren dienen in der Regel zur Berechnung der kumulierten Lärmsituation für komplexe Flugbetriebsszenarien über längere Zeiträume (z.B. mehrere Monate). Es besteht kein Anspruch darauf, die Lärmimmission eines Einzelerignisses mit hoher Genauigkeit wiederzugeben. Daher können die Berechnungen z.B. auf Annahmen über charakteristische meteorologische oder topographische Situationen beruhen. Auch hinsichtlich der Struktur der Datengrundlage können vereinfachenden Annahmen — wie z.B. das Zusammenfassen von verschiedenen Flugzeugmustern zu Kategorien — getroffen werden.
- Die Verfahren müssen so strukturiert sein, daß die Definition der Flugbetriebsdaten in praktikabler Weise durchführbar ist. Dies ist vor allem für prognostizierte Flugverkehrszustände von maßgeblicher Bedeutung.
- Die dem Verfahren zugrundeliegende Beschreibung von Rechenvorschrift und Datenbasis muß eindeutig sein. Nur so kann gewährleistet werden, daß verschiedene Umsetzungen dieser Vorschrift in praktisch anwendbare Computerprogramme identische Ergebnisse liefern. Dieser Punkt ist besonders wichtig, wenn — wie beim deutschen AzB-Verfahren — die mit einem solchen Programm berechneten Ergebnisse die Grundlage für irgendeine Form der Lärmschutzgesetzgebung bilden. Diese wichtige Forderung impliziert in der Regel die Verwendung einer relativ einfachen Rechenstruktur.

In den folgende Abschnitten werden die wichtigsten Aspekte und Einflußfaktoren diskutiert, die bei einer Fluglärmberechnung mit konventionellen Verfahren zu berücksichtigen sind. Dabei wird sich an dem in Deutschland vorgeschriebenen AzB-Verfahren orientiert [22,23]. Als Vergleichsmodell wird das von der Federal Aviation Administration FAA entwickelte *Integrated Noise Model* INM [24] herangezogen. Der Bezug auf das INM wurde gewählt, weil beide Verfahren als Computerprogramme verfügbar und sehr gut dokumentiert sind. In einer ebenfalls im Auftrag des BMV angefertigten Untersuchung [25] wurden schon vergleichende Betrachtungen zu beiden Modellen durchgeführt. Diese bezogen sich aber im wesentlichen auf Einflüsse der unterschiedlichen Datengrundlagen und befaßten sich nur knapp mit den Einflüssen der unterschiedlichen Modellierungsalgorithmen.

Im Abschnitt über die Untersuchungen, die im Rahmen des ICAO Tasks MODEL 1 durchgeführt wurden, wurden weitere konventionelle Berechnungsverfahren benutzt, die hier aber nicht näher untersucht werden.

3.2.2. Form der Datengrundlage

Bei den meisten konventionellen Verfahren werden (akustisch oder flugbetrieblich) vergleichbare Flugzeugmuster zu Kategorien zusammengefaßt. Diese Klassifizierung kann relativ grob (wie die in der AzB [22,23] benutzte Klasseneinteilung) oder aber sehr stark verfeinert sein: So existieren in der derzeitigen Version 5.2a des INM [24] mehr als 250 verschiedene Kombinationen von Flugzeugtyp und Auslastung. Eine derartige Verfeinerung muß jedoch nicht zwangsläufig zu einer höheren Genauigkeit in der Berechnung führen, sie wirft jedoch große Probleme bei der Erstellung einer Flugbetriebsprognose auf.

Die akustischen Datengrundlagen für konventionelle Verfahren bestehen in der Regel aus Schallpegeltabellen als Funktion von Triebwerksleistung und Ausbreitungsentfernung (*Noise-Power-Distance(NPD)-Curves*). Derartige Tabellen können für verschiedene Frequenzbewertungen und sowohl für Maximal- als auch für Effektivpegel definiert sein (Abb.3-1 zeigt eine beispielhafte Darstellung). Meist wird nur pauschal berücksichtigt, daß ein Flugzeug eine gerichtete Schallquelle darstellt — die Richtcharakteristik geht in der Regel nicht direkt in die Berechnung mit ein.

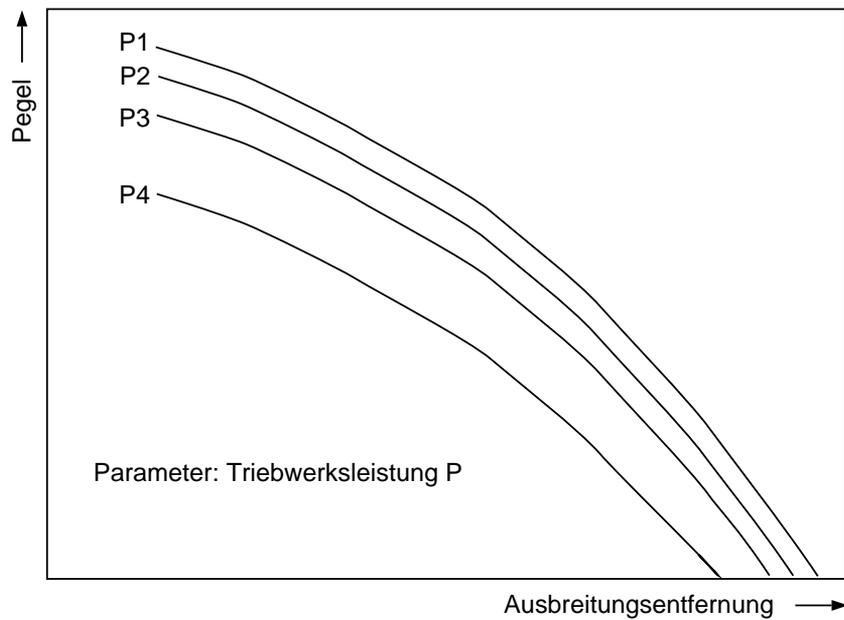


Abb.3-1: Pegel-Entfernungsverläufe für verschiedene Triebwerksleistungen (*NPD-Curves*).

Die flugbetrieblichen Daten bestehen prinzipiell aus einem Flughöhenprofil mit zugeordneten Werten für Triebwerksleistung und Fluggeschwindigkeit. Abb.3-2 zeigt ein Beispiel für einen solchen flugbetrieblichen Datensatz in grafischer Form.

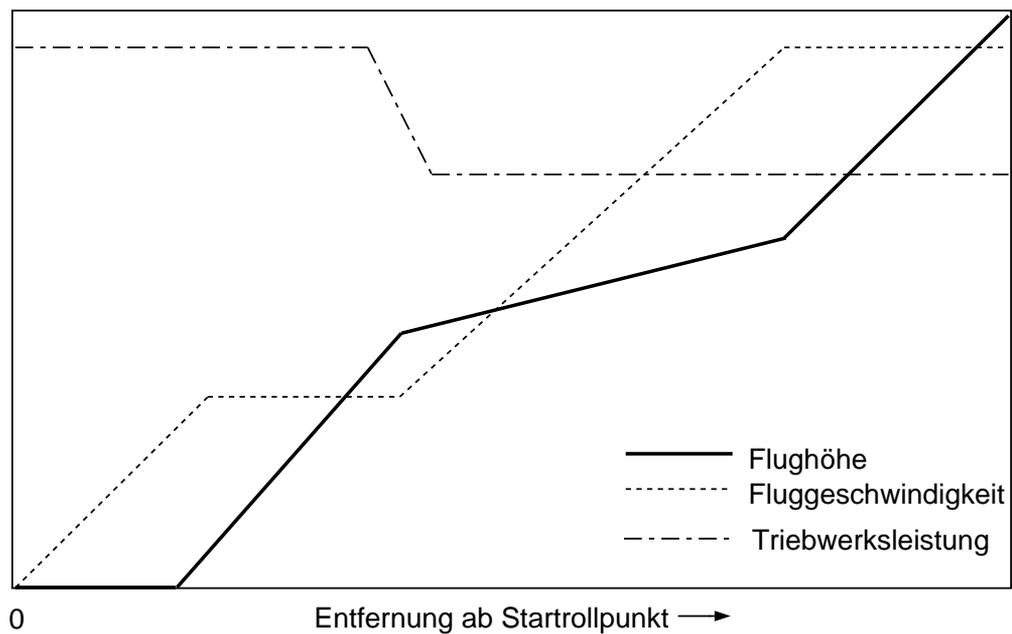


Abb.3-2: Darstellung eines flugbetrieblichen Datensatzes.

Die AzB geht von flugbetrieblichen Datensätzen aus, die nicht vom Verlauf der Flugstrecke abhängen. Dies ist insofern eine Vereinfachung, als z.B. Effekte zur Kompensation des Lastvielfachen beim Kurvenflug oder Einflüsse von Wind und Temperatur auf das Steigverhalten nicht berücksichtigt werden.

Beim INM muß hier unterschieden werden zwischen den standardisierten Datensätzen, die wie in der Abb.3-2 gezeigt aufgebaut sind, und sog. *prozeduralen* Datensätzen. Bei letzteren werden auf der Basis von aerodynamischen Beiwerten und triebwerksspezifischen Parametern die flugbetrieblichen Datensätze auf der Basis eines vorzugebenden Flugverfahrens erst ermittelt. Die Vorgaben beruhen auf einer Einteilung der Flugbahn in charakteristische Segmente (z.B. Steigen ohne Beschleunigung, Steigen mit Beschleunigung oder Horizontalflug). Bei der Ermittlung dieser Datensätze werden dann Wind- und Temperatureinflüsse mit berücksichtigt. Die Effekte von Kurvenflügen auf Triebwerksleistung bzw. Steigverhalten gehen allerdings nicht mit ein.

3.2.3. Berechnung des Maximalschallpegels am Immissionsort

Basierend auf dem Flughöhenprofil und der Flugstreckengeometrie kann für jeden Punkt in der Flughafenumgebung die Geometrie zwischen Flugzeug und Immissionsort definiert werden. In der Regel wird als Bezug dabei der kürzeste Vorbeiflugabstand (*Slant Distance* s) benutzt. Dieser ergibt sich wie in Abb.3-3 gezeigt aus der Flughöhe h — die sich aus dem flugbetrieblichen Datensatz ableitet — sowie dem kürzesten Abstand ρ des Immissionsortes von der Flugstrecke (d.h. der Flugbahnprojektion in die Horizontalebene).

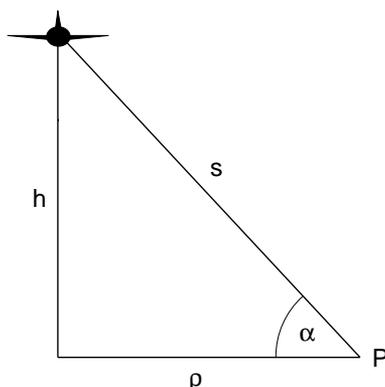


Abb.3-3: Geometrie von Flugzeug und Immissionsort P.

Neben dem kürzesten Vorbeiflugabstand s geht aus der in Abb.3-3 gezeigten Geometrie noch der Höhenwinkel α zwischen Flugzeug und Immissionsort als maßgeblicher geometrischer

Parameter in die Berechnung mit ein. Die Größe dieses Höhenwinkels beeinflusst die Höhe der Zusatzdämpfung, die bei bodennaher Schallausbreitung mit berücksichtigt werden muß.

Die Ermittlung des am Immissionsort auftretenden Maximalschallpegels erfolgt dann anhand der in Abb.3-2 gezeigten Pegeltabellen für den dem flugtechnischen Datensatz entnommenen Wert der Triebwerksleistung. In der AzB [22] wird — abweichend von den meisten konventionellen Verfahren — anstelle einer expliziten Triebwerksleistung mit einem sog. *Zusatzpegel* gearbeitet. Dieser realisiert Änderungen in der Triebwerksleistung durch Pegelzu- und -abschläge.

Die Berechnung des Maximalpegels erfolgt unter Berücksichtigung der physikalischen Gesetzmäßigkeiten bei der Schallausbreitung. Effekte wie Windeinfluß, Turbulenz, Temperaturschichtung werden bei konventionellen Prognoseverfahren in der Regel nicht explizit berücksichtigt. Vielmehr werden charakteristische Ausbreitungsbedingungen angenommen.

Vor der Berechnung eines Pegelwertes an einem vorgegebenen Immissionsort muß zunächst geprüft werden, ob eine Flugstreckengeometrie vorliegt, bei der ein Vorbeiflug überhaupt einen Beitrag liefern kann. In der Regel wird eine Flugstrecke durch eine Folge von geradlinigen und kreisbogenförmigen Segmenten beschrieben. Beim AzB-Verfahren liefert ein Segment einen Beitrag zur Gesamtbelastung am Immissionsort, sofern ein Lot von diesem Segment auf den Immissionsort gefällt werden kann. Man spricht in diesem Fall davon, daß der betreffende Immissionsort *“im Einflußbereich”* des Streckensegmentes liegt. Wie derartige Einflußbereiche aussehen, ist in Abb.3-4 gezeigt.

Die gezeigte Flugstrecke besteht aus 3 Segmenten, die mit den Nummern 1 bis 3 gekennzeichnet wird. Der Startrollpunkt wird als ein Segment der Länge Null betrachtet. Ihm wird die Segmentnummer 0 zugeordnet. Einflußbereiche sind nach dem AzB-Verfahren wie folgt definiert:

- Der Einflußbereich des Startpunktes ist die Halbebene, die durch die senkrecht zur Startbahnrichtung durch den Startpunkt verlaufende Gerade begrenzt wird.
- Bei geradlinigen Streckensegmenten wird der Einflußbereich durch die durch die Endpunkte verlaufenden Lote auf das Segment begrenzt.
- Für ein kreisbogenförmiges Segment ist der Einflußbereich gleich dem Sektor, der durch die Verlängerung der Radien durch Anfangs- und Endpunkt definiert wird.

In den in Abbildung 3-4 durch die gestrichelten Linien begrenzten rechteckigen Bereiche ist jeweils eingetragen, welche Segmente der Flugstrecke hier zur Berechnung beitragen.

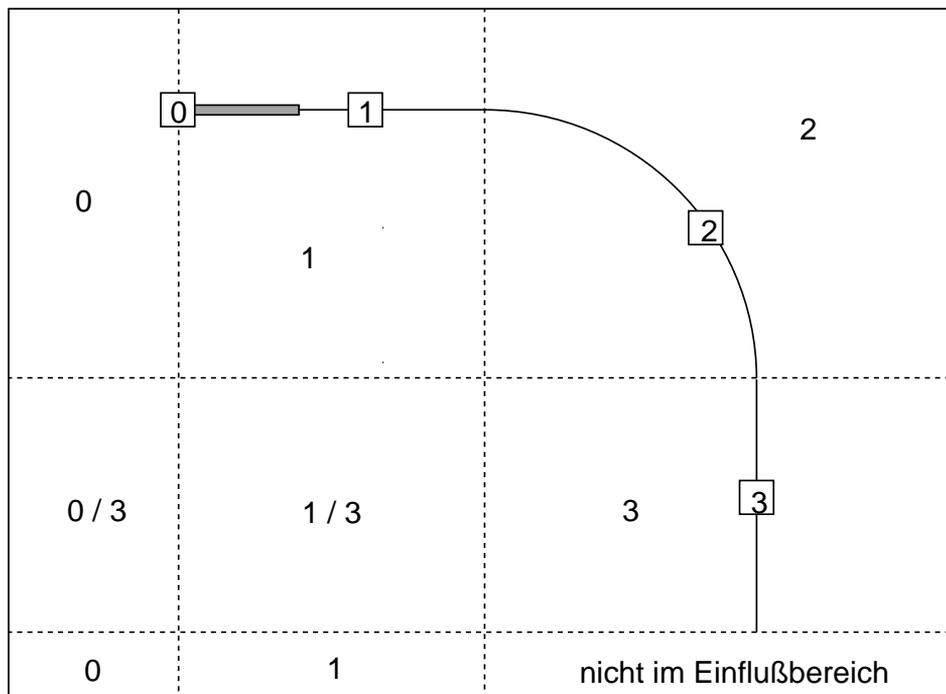


Abb.3-4: Einflußbereiche einer Flugstrecke nach dem AzB-Verfahren.

Die Methode, Beiträge zur Lärmbelastung nur dann zu berücksichtigen, wenn der Immissionsort im Einflußbereich einer Flugstrecke liegt, kann bei der rechen-technischen Umsetzung des Verfahrens zu Sprüngen im Verlauf der berechneten Lärmkonturen führen. Dies wird im folgenden Abschnitt zum Einfluß des Pegelschwellenwertes anhand eines Beispiels diskutiert.

3.2.4. Der Einfluß des Pegelschwellenwertes

Beim AzB-Verfahren geht ein Geräusch nur dann in die zu ermittelnde Gesamtbelastung ein, wenn sein Maximalschallpegel mindesten einen Wert von 55 dBA hat. Diese Vorgabe kann einen signifikanten Einfluß auf die berechneten Konturverläufe haben. Dies sei an dem in Abb.3-5 gezeigten Beispiel verdeutlicht. Die Abbildung zeigt berechnete Konturen eines äquivalenten Dauerschallpegels, in die nur Geräusche mit einem Maximalschallpegel von mindestens 55 dBA eingingen. Zugrunde liegt eine Absflugstreckengeometrie, die mit einem geradlinigen Streckensegment (Segment 1) beginnt, an das sich eine 180°-Kurve (Segment 2) und ein weiterer geradliniger Streckenabschnitt (Segment 3) anschließen. Betrachtet wurden nur Abflüge einer Flugzeugklasse. Die ermittelten Konturen zeigen eine Reihe von

charakteristischen Sprüngen (bezeichnet mit den Buchstaben A bis D), deren Entstehung folgendermaßen erklärt werden kann:

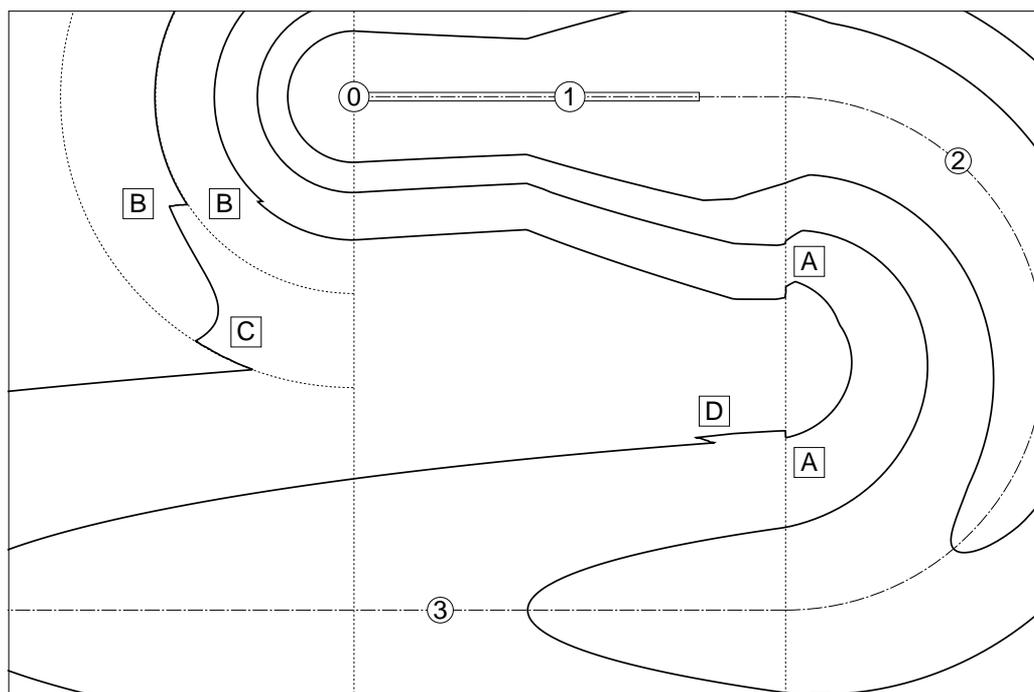


Abb.3-5: Einwirkung von Einflußbereichen und Pegelschwellenwert auf die Lärmkonturberechnung mit dem AzB-Verfahren (Erläuterungen siehe Text).

- A** In den Bereichen A wirkt sich das Prinzip der Einflußbereiche aus. Die Konturen verlaufen — ausgehen vom Startpunkt — in den Einflußbereichen der Streckensegmente 1 und 3 und gehen dann in den alleinigen Einflussbereich der Kurve (Segment 2) über, d.h. es trägt nur noch ein Segment zum L_{eq} bei. Dadurch rücken die Konturen näher zur Flugstrecke.
- B** In den Bereichen B verlaufen die Konturen in den Einflussbereichen der Segmente 0 (Startpunkt) und 3. Die Unstetigkeiten rühren daher, daß hier für Beiträge vom Segment 3 die Pegelschwelle von 55 dB unterschritten wird. Aufgrund der bei der Berechnung zugrunde gelegten relativ hohen Gesamtbewegungszahl werden so plötzlich — trotz der niedrigen Maximalpegel — maßgebliche Beiträge zum L_{eq} nicht mehr berücksichtigt. Die Konturen rücken so näher zum Startpunkt hin.
- C** Auch im Bereich von C, der wie das Gebiet um B in den Einflussbereichen des Startpunktes und von Segment 3 liegt, kommt dieser Effekt zum Tragen. Allerdings unterschreiten hier die Beiträge des Startpunktes den Schwellenwert von 55 dBA.

D Der gleiche Effekt zeigt sich im Gebiet D, der in den Einflußbereichen der Segmente 1 und 3 liegt. Hier fallen aufgrund der Pegelschwelle die Beiträge von Segment 1 aus der Berechnung heraus.

Der Effekt der Pegelschwelle tritt in der Regel dann auf, wenn die Lärmbelastung in der Umgebung eine Kontur durch eine hohe Anzahl von Flugbewegungen mit niedrigen Pegelwerten signifikant mitbestimmt wird. Unstetigkeiten durch Einflußbereiche können unabhängig davon bei kritischen Streckengeometrien (in der Regel Kurven mit engem Radius und großem Winkelbereich) auftreten. Im folgenden Abschnitt wird ein Verfahren beschrieben, bei dem Sprungstellen aufgrund des Effektes von Einflußbereichen nicht auftreten können.

3.2.5. Berechnung von Einzelereignispegeln

Für die meisten konventionellen Verfahren liegen Schallpegeltabellen sowohl für Maximal- als auch für Einzelereignispegel vor. Letztere sind in der Regel auf eine bestimmte Fluggeschwindigkeit normiert, da die Geräuschkdauer — und damit der Einzelereignispegel — eine Funktion sowohl von Fluggeschwindigkeit als auch von der Ausbreitungsentfernung ist. Bei der Berechnung des Einzelereignispegels für eine konkrete Geometrie zwischen Flugzeug und Immissionsort werden dann entsprechende geschwindigkeitsabhängige Korrekturen am Einzelereignispegel angebracht.

Das AzB-Verfahren geht hier anders vor: Neben dem (rein entfernungsabhängigen Maximalschallpegel) wird eine explizite Geräuschkdauer berechnet, die sich nach der Gleichung

$$t_{10}(s, v) = \frac{a \cdot s}{v + s/b} \quad (3-1)$$

aus dem geringsten Vorbeiflugabstand s und der an dem zugehörigen Punkt der Flugbahn auftretend Fluggeschwindigkeit v berechnet. Die Koeffizienten a und b werden flugzeuggruppenspezifisch definiert. Gl.(3-1) beruht auf der theoretischen Modellierung eines Vorbeiflugs auf einer unendlich langen, geradlinig verlaufenden Flugstrecke [26]. Die Werte der Koeffizienten a und b können aus Messungen abgeleitet werden. Diese Vorgehensweise — nämlich separate Berechnung von Maximalschallpegel und Dauer — ermöglicht es, nahezu alle gebräuchlichen Bewertungsmaße zu berechnen. Dies umfaßt auch die Berechnung von mittleren Maximalschallpegeln und Schwellenwertkriterien.

Sowohl die Geräuschkdauer nach Gl.(3-1) als auch die in den konventionellen Prognoseprogrammen definierten Einzelereignistabellen sind für einen Vorbeiflug auf eine unendlich langen, geraden Flugbahn definiert. Da die Segmente einer Flugstrecke in der Regel aber eine endliche Länge haben oder aber eine Krümmung aufweisen, wird hier zwangsläufig ein Fehler eingeführt, der um so größer ist, je kürzer das Segment bzw. je kleiner sein Krümmungsradius ist.

Die meisten konventionellen Verfahren — nicht jedoch die AzB — führen deshalb Korrekturfunktionen ein, die diesem Sachverhalt Rechnung tragen sollen. Ein Beispiel hierfür ist der im INM [27] benutzte *Noise-Fraction-Algorithmus*. Abb.3-6 zeigt eine Prinzipskizze zur Vorgehensweise bei der Berechnung nach diesem Algorithmus:

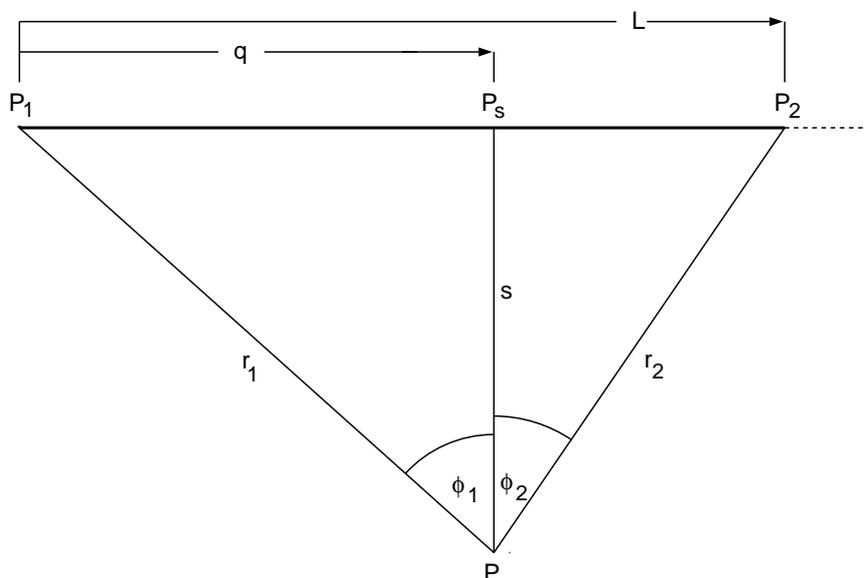


Abb.3-6: *Noise-Fraction-Algorithmus* nach INM [27].

P_1 und P_2 sind die Anfangs- und Endpunkte eines endlich langen, geradlinig verlaufenden Flugbahnsegments der Länge L . P ist der Immissionsort, P_s derjenige Punkt der Flugbahn, an dem der geringste Vorbeiflugabstand s auftritt. Aus den in der Abb.3-6 eingetragenen Winkeln und Abständen ergibt sich der *Noise Fraction Factor* F_{12} als:

$$F_{12} = \frac{1}{\pi} (\Phi_1 + \Phi_2 + \sin \Phi_1 \cos \Phi_1 + \sin \Phi_2 \cos \Phi_2) \quad (3-2a)$$

Gl.(3-2a) gilt für den Fall, daß $0 \leq q \leq L$ ist, durch P also ein Lot auf das Segment $\overline{P_1P_2}$ gefällt werden kann. Falls P hinter oder vor dem Streckensegment liegt, ändern sich die Vorzeichen in geeigneter Weise. Näheres dazu kann [27] entnommen werden.

Der Faktor F_{12} wird anschließend zu einem additiven Zuschlag

$$NF_{adj} = 10 \cdot \lg(F_{12}) \quad (3-2b)$$

auf den Einzelereignispegel konvertiert. Dieser verschwindet für ein unendlich langes Segment, da in diesem Fall beide Winkel den Wert $\pi/2$ annehmen $F_{12} = 1$ wird.

Eine weitere, bei der Benutzung von Einzelereignispegeltabellen notwendige Korrektur bezieht sich auf die Fluggeschwindigkeit. Im INM [27] hat diese Korrektur die Form:

$$AS_{adj} = 10 \cdot \lg\left(\frac{160}{v_{seg}}\right) \quad (3-3)$$

Dabei ist v_{seg} die in Knoten ausgedrückte Fluggeschwindigkeit am Punkt P (also demjenigen Punkt, dem der kürzeste Vorbeiflugabstand zugeordnet ist). Der Wert 160 ist gerade die Referenzgeschwindigkeit in Knoten, für die die Effektivpegeltabellen in der INM-Datenbasis definiert sind. Andere Prognoseverfahren (wie das von der European Civil Aviation Conference ECAC vorgeschlagene [28]) benutzen ähnliche Korrekturfunktionen.

Im INM werden — im Gegensatz zur AzB — gekrümmte Streckensegmente nur implizit bei der Streckenbeschreibung benutzt. Beim Rechenvorgang selbst werden sie in geeigneter Weise durch eine Folge von Sekanten beschrieben, also in geradlinige Teilstücke segmentiert. Jede Flugstrecke besteht also vollständig aus geraden Abschnitten, die alle zur Gesamtbelastung an einem vorgegebenen Immissionsort beitragen. Es gibt also keine Einflußbereiche, vielmehr wird für jedes Segment der Noise-Fraction-Algorithmus angewandt. Dadurch können Unstetigkeiten im Konturverlauf, wie sie im vorangehenden Abschnitt beschrieben wurden, garnicht erst auftreten.

3.2.6. Modellierung der seitlichen Flugbahnstreuung

Bei eine Fluglärmrechnung ist weiterhin zu berücksichtigen, daß die Flugzeuge — insbesondere beim Abflug — in der Regel von der idealen Flugstreckenführung abweichen. Werden die Flugbahnprojektionen in die Horizontalebene projiziert, so zeigt sich eine Streuung um den Verlauf der idealen Abflugstrecke. Ein Beispiel hierfür ist in Abb.3-7 gezeigt. Bei diesem Bild handelt es sich um die Auswertung gemessener Radarflugspuren von Abflügen auf drei Abflugstrecken am Flughafen Düsseldorf. Erfasst wurden die innerhalb eines Tages abgewickelten Flüge.

Man erkennt deutlich die Bündelung der Abflüge in Richtung Norden und Süden. Auf der Strecke nach Nordwesten sind nur wenige Abflüge erfaßt. Aus diesem Grunde zeigt sich eine relativ starke Streuung. Bei einer Erfassung einer größeren Anzahl von Flügen würde sich auch für diese Abflugstrecke ein ähnliches Bild wie auf den anderen beiden Strecken zeigen.

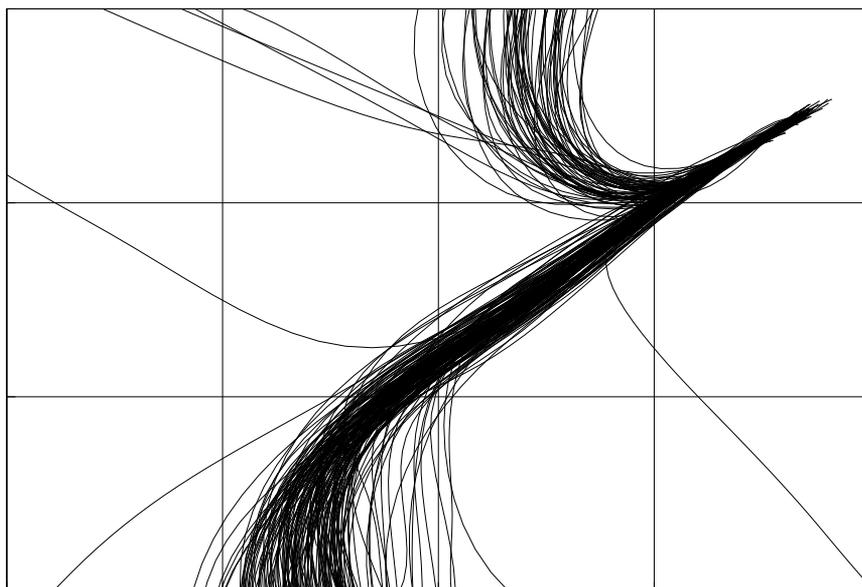


Abb.3-7: Flugbahnstreuung (Radaraufnahme von Abflügen am Flughafen Düsseldorf).

Abb.3-8 zeigt, wie die seitliche Flugbahnstreuung in der Praxis der Berechnung durch einen Korridor berücksichtigt werden kann. Zugrunde liegt das in der AzB [22] verwendete Verfahren. σ ist dabei die Bogenlänge längs der idealisierten Flugstrecke. Diese bildet die Mittellinie eines Korridors der Breite $b(\sigma)$, in den jeweils alle Flugbewegungen fallen.

Die Verteilung dieser Flugbewegungen quer zum Korridor wird durch eine Verteilungsfunktion $v(\rho)$ beschrieben. Dabei ist ρ die Koordinate senkrecht zur Korridormittellinie. In der AzB liegen die Grenzen des Flugkorridors bei den Koordinaten $\rho = \pm b/2$. Die hier gezeigte Verteilungsfunktion v ist symmetrisch zur Korridormittellinie. Dies muß in der Realität nicht notwendigerweise der Fall sein: Vor allem bei gekrümmten Flugstreckensegmenten ist die Verteilungsfunktion asymmetrisch.

Die Verteilung der Flugbewegungen senkrecht zum Flugkorridor kann auf verschiedene Art und Weise rechentechnisch umgesetzt werden. In der Praxis ist dabei eine Aufteilung in Unterstrecken am gebräuchlichsten. Dazu wird der Korridor in eine ungerade Anzahl (in der Regel gleich breiter) Teilkorridore aufgeteilt. Die Mittellinien dieser Teilkorridore werden durch die Unterstrecken gebildet. Jeder dieser Unterstrecken wird dann die gemäß der vorgegebenen Verteilungsfunktion in diesen Teilkorridor fallende Anzahl von Flugbewegungen

zugeordnet. Die Verteilungsfunktion wird also durch eine vorgegebene Anzahl von Stützstellen diskretisiert. Untersuchungen mit einem Simulationsverfahren haben ergeben [29], daß eine für solche Diskretisierung 11 Teilkorridore ausreichend sind. Für Flugstrecken, die geradlinig verlaufen, ist eine Aufteilung in 7 Teilkorridore ausreichend.

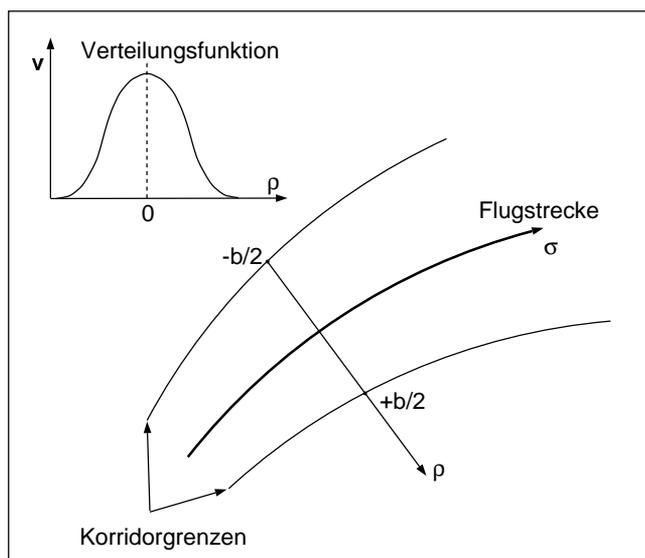


Abb.3-8: Zur Definition eines Flugkorridors (Erläuterungen siehe Text).

Die Diskretisierung in Teilkorridore hat den Vorteil, daß bei gekrümmten Flugstrecken die unterschiedlichen vom Startpunkt zurückgelegten Bogenlängen für die verschiedenen Unterstrecken berücksichtigt werden. Damit gehen quer zum Korridor implizit auch unterschiedliche Flugleistungsdaten — die als Funktion der Bogenlänge definiert sind — in die Berechnung ein. Wird demgegenüber wie im AzB-Verfahren keine Aufteilung durchgeführt, sondern senkrecht zum Korridor über die Verteilungsfunktion integriert, so hat dies den Vorteil einer höheren Ausführungsgeschwindigkeit.

Die Art der Verteilungsfunktion v hat im wesentlichen Einfluß auf die Form (weniger auf die Fläche) der ermittelten Lärmkonturen. Untersuchungen hierzu ergaben [30], daß die Konturen um so stärker ausgeprägte Spitzen längs der Abflugstrecken zeigen, je ausgeprägter das Maximum der Verteilungsfunktion ist. Die in der AzB benutzte Verteilungsfunktion der Form

$$v(\eta) = 30 \cdot \left(0.25 - \eta^2\right)^2 \quad \eta = \frac{b}{\rho}, \quad (3-4)$$

stellt eine Näherung der Normalverteilung dar, die an den Korridor Grenzen ($\eta = \pm 0$) ver-schwindet. Diese Verteilungsfunktion — die durch Auswertung von Radar-Aufzeichnungen gut bestätigt wird — führt zu Konturverläufen, die von der Form her zwischen denjeni-gen für eine Gleichverteilung über den Korridor und denjenigen ohne Berücksichtigung des Korridors liegen.

3.2.7. Die Rolle der Bodendämpfung

Einer der wesentlichsten Einflußfaktoren bei der Berechnung von Fluglärm — und zwar sowohl bei konventionellen als auch bei Simulationsverfahren — ist die Modellierung der *Bodenzusatzdämpfung*. Dieser Effekt tritt bei Schallausbreitung unter kleinen Höhenwin-keln auf und ist insbesondere im Bereich hinter dem Startrollpunkt sowie in Gebieten in großen seitlichen Abständen von der Flugbahn (in denen der Schall unter geringen Einfalls-winkeln am Immissionsort eingestrahlt wird) von Bedeutung. Da dieser Dämpfungseffekt eine Größenordnung von bis zu 10 dB erreichen kann, beeinflußt er wesentlich die Form und Größe von Lärmkonturen.

Die Bodenzusatzdämpfung (*Excess Ground Attenuation EGA*) ist eine Funktion der Aus-breitungsentfernung s und des Höhenwinkels α zwischen Flugzeug und Immissionsort:

$$E = f(s) \cdot g(\alpha) \quad (3-5)$$

Im Integrated Noise Model wird die Bodendämpfung nach dem in SAE AIR 1751 [31] definier-ten Verfahren ermittelt. Der dort beschriebene Berechnungsalgorithmus ist (im Gegensatz zu dem in der AzB definierten Verfahren) unabhängig vom Spektrum der Schallquelle. Einen Vergleich beider Dämpfungsalgorithmen zeigt Abbildung 3-9.

Die darin für die Dämpfung nach dem AzB-Verfahren ausgewiesenen drei Kurven bezie-hen sich auf unterschiedliche, repräsentative Flugzeuggruppen (Propellerflugzeuge über 7.5 t MTOM sowie nach Annex 16, Kap.2 bzw. Kap.3 zugelassene Strahlflugzeuge), die sich hinsichtlich ihrer Spektren unterscheiden.

Das SAE-Verfahren liefert für große Entfernungen Dämpfungswerte, die um 4 bis 5 dB über denen des AzB-Verfahrens liegen. Außerdem ist der Einfluß des Höhenwinkels schwächer und endet erst bei einem Grenzwert von 60° (gegenüber einem Wert von 15° beim AzB-Verfahren). Die im Rahmen des ICAO Tasks MODEL 1 durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, daß die Dämpfung nach dem AzB-Verfahren zu etwa 20 Prozent größeren

Lärmzonen führt als diejenige nach dem SAE-Verfahren. Nähere Ausführungen hierzu werden im Abschnitt über die MODEL 1-Untersuchungen gemacht.

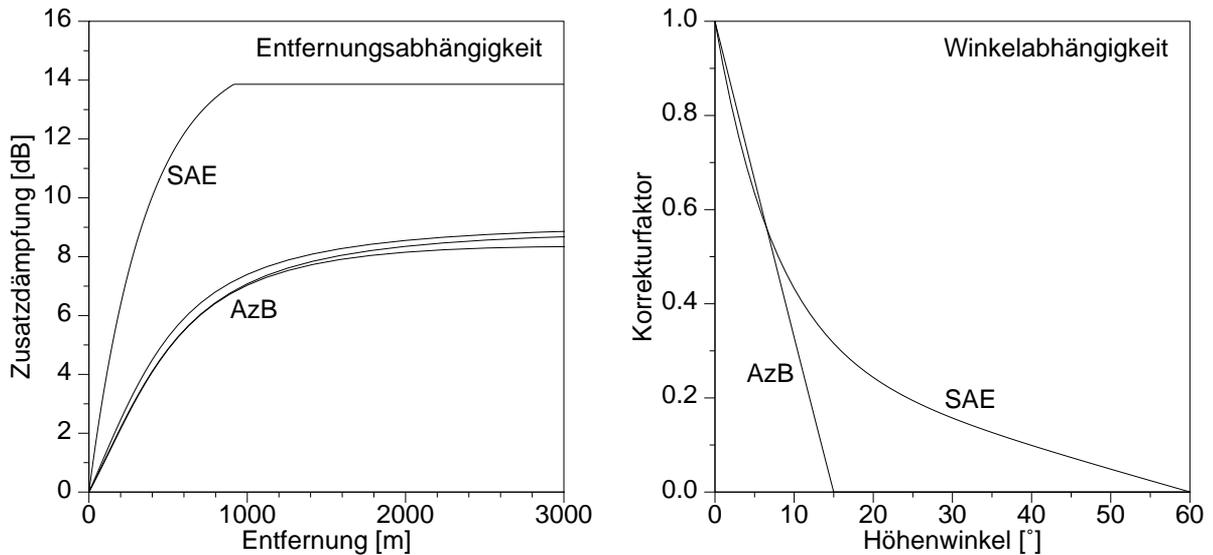


Abb.3-9: Entfernungs- und Winkelabhängigkeit der Bodendämpfung nach SAE AIR 1751 und nach AzB (für unterschiedliche Flugzeugklassen). Das linke Teildiagramm zeigt die Entfernungsabhängigkeit der Dämpfung, das rechte den höhenwinkelabhängigen Korrekturfaktor.

3.2.8. Richtwirkung, Modellierung des Startvorganges

Jedes Flugzeug stellt eine Schallquelle mit einer ausgeprägten Richtwirkung dar. Die Richtwirkung hat folgende Einflüsse:

- Sie bestimmt stark die Form des zeitlichen Pegelverlaufes eines Vorbeifluggeräusches: Das hier auftretende Maximum ist in der Regel um so ausgeprägter, je stärker ausgeprägt die Richtwirkung ist. Gleichzeitig nimmt die charakteristische Geräuschkdauer i.a. ab. Dieser Effekt wird in der AzB implizit durch die in der Dauerformel (3-1) definierten Parameter a und b berücksichtigt. Im INM erfolgt die Modellierung durch Annahmen über eine typische Richtcharakteristik [27]. Diese gehen implizit z.B. in den *Noise-Fraction* Algorithmus ein.
- In der Umgebung von gekrümmten Flugstrecken kann es bei ausgeprägter Richtwirkung zu Fokussierungseffekten kommen. So können sich — bei gleichem seitlichen Vorbeiflugabstand — gegenüber einem Vorbeiflug auf einer geradlinig verlaufenden Flugstrecke

je nach Lage des Immissionsortes erhöhte oder erniedrigte zeitintegrierte Pegel ergeben. Untersuchungen zu diesem Effekt finden sich in [32]. Das auf dem Prinzip von Einflußbereichen basierende AzB-Verfahren berücksichtigt diesen Einfluß überhaupt nicht. Andere Verfahren, wie das von der ECAC in Doc.29 definierte Verfahren [28] modellieren diesen Effekt durch relativ komplizierte empirische Korrekturen.

- Die Richtwirkung hat einen maßgeblichen Effekt, wenn Beiträge von endlich langen Flugstreckensegmenten berücksichtigt werden müssen. Dieser Einfluß und seine Berücksichtigung wurde schon in den vorangegangenen Abschnitten diskutiert.
- Im Bereich hinter dem Startpunkt führt der Einfluß der Richtcharakteristik in der Regel zu ausgeprägten Maxima. Die AzB trägt diesem Effekt keine Rechnung — hier ergeben sich hinter dem Startpunkt für einen Einzelflug halbkreisförmige Konturverläufe. Andere Verfahren wie das INM sehen hinter dem Startpunkt eine empirische, winkelabhängige Korrektur vor [27,28].

Die Richtwirkung wird also bei konventionellen Verfahren in der Regel nur pauschal oder durch empirische Korrekturen berücksichtigt. Die AzB trägt der Richtwirkung insofern Rechnung, als sie sog. *Richtungsfaktoren* definiert, mit dem kleinsten Vorbeiflugabstand multipliziert wird. Dadurch wird der in der Berechnung berücksichtigte Ausbreitungsweg (und somit die davon abhängige atmosphärische Dämpfung) künstlich vergrößert. Dieses Modell trägt der Tatsache Rechnung, daß der an einem bestimmten Immissionsort auftretende Maximalschallpegel aus einer von der Richtung des geringsten Vorbeiflugabstandes abweichenden Richtung eingestrahlt wird.

3.2.9. Typenspezifische Pegelverteilungen

Abb.3-10 zeigt eine Maximalpegelverteilung, die an einer Meßstelle der Fluglärmüberwachungsanlage des Flughafens Frankfurt für Anflüge des Typs A300 in 12 km Entfernung von der Landeschwelle gemessen wurde. Zugrunde liegt ein mehrmonatiger Meßzeitraum.

Das linke Teildiagramm zeigt die Pegelhäufigkeitsverteilung, das rechte Teildiagramm die zugehörige Summenhäufigkeit. Eine vergleichbare Darstellung wurde schon in Abb.2-2 bei der Beschreibung von Schwellenwertkriterien diskutiert. In Abb.3-10 ist zusätzlich eine Gaußsche Normalverteilung mit geeigneter Standardabweichung angepaßt.

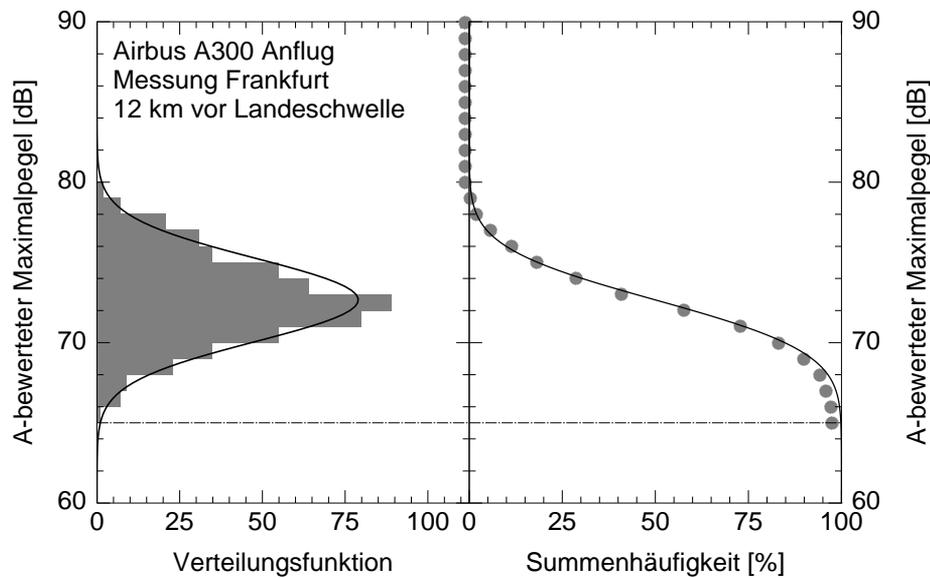


Abb.3-10: Gemessene Maximalpegelverteilung für Anflüge des Typs A300 12 km vor der Landeschwelle. Das linke Teildiagramm zeigt die Verteilungsfunktion, das rechte die dazugehörige Summenhäufigkeit. Die Kurven zeigen eine geeignet angepaßte Gaußsche Normalverteilung.

Eine derartige Verteilung ist charakteristisch für gemessene Maximalpegelverteilungen für den Anflug. Dies gilt auch für Abflüge, falls nur Pegel von Flugzeugen eines einzelnen Typs vergleichbarer Auslastung erfaßt werden. Lokal (d.h. auf einen spezifischen Meßort bezogen) sind auch Effektivpegelverteilungen (also z.B. L_{AZ} -Verteilungen) in der Regel normalverteilt. Mathematisch gesehen ist dies ein Indiz dafür, daß lokal ein linearer Zusammenhang zwischen Maximalpegel und zeitintegriertem Pegel besteht. Die Ursachen für das Auftreten von derartigen Verteilungen sind durch Variationen in der Auslastung (und damit der Triebwerksleistung) und der Flughöhe begründet.

Die Tatsache, daß selbst für ein einzelnes Flugzeugmuster an einem definierten Immissionsort die real gemessenen Pegel eine gewisse Streuung aufweisen, ist von elementarer Bedeutung für die Berechnung von Schwellenwertkriterien: Bei konventionellen Berechnungsverfahren ergibt sich für eine definierte Geometrie zwischen Flugzeug und Immissionsort bei verschwindender Korridorbreite für ein bestimmtes Flugzeuggruppe oder eine bestimmte Flugzeuggruppe ein fester Maximalpegelwert. Dieser sollte im Idealfall den (mit einem geeigneten Äquivalenzparameter) energetisch gemittelten Pegelwert der gemessenen Verteilung repräsentieren. Solange äquivalente Dauerschallpegel berechnet werden — in die ja nur dieser Mittelwert eingeht — ist die Tatsache, daß die real gemessenen Pegel streuen, nicht von Bedeutung. Anders liegt der Fall bei der Ermittlung von Schwellenwertkriterien: Wird

hier keine Verteilung berücksichtigt, so liegt der berechnete Pegelwert für alle Flugzeuge einer Gruppe, die an dem betreffenden Ort zur Immission beitragen, entweder unterhalb des Schwellenwertes oder er erreicht ihn gerade bzw. überschreitet ihn. Es tragen also entweder alle oder gar keine Bewegungen dieser Flugzeugkategorie zur Belastung bei. In der Realität liegt jedoch häufig ein gewisser Anteil der gemessenen Verteilung oberhalb des Schwellenwertes. Wie sich dieser Effekt auswirkt, sei an dem in Abb.3-11 dargestellten Beispiel erläutert.

Diese Abbildung zeigt in Anlehnung an das AzB-Verfahren berechnete Kurven, auf denen in der Nacht ein A-bewerteter Maximalschallpegel von 75 dB für einen fiktiven Flugbetrieb gerade 6 mal erreicht wird. Der Flugbetrieb wurde so gewählt, daß die zu beschreibenden Effekte besonders deutlich werden. Bei den durchgezogenen Linien wurden bei der Berechnung normalverteilte Pegel mit einer Standardabweichung von 3 dB zugrunde gelegt. Bei den punktiert dargestellten Kurven wurde keine Standardabweichung berücksichtigt. Neben den Konturen sind die Startbahnen sowie (strichpunktiert) die Flugstrecken eingetragen.

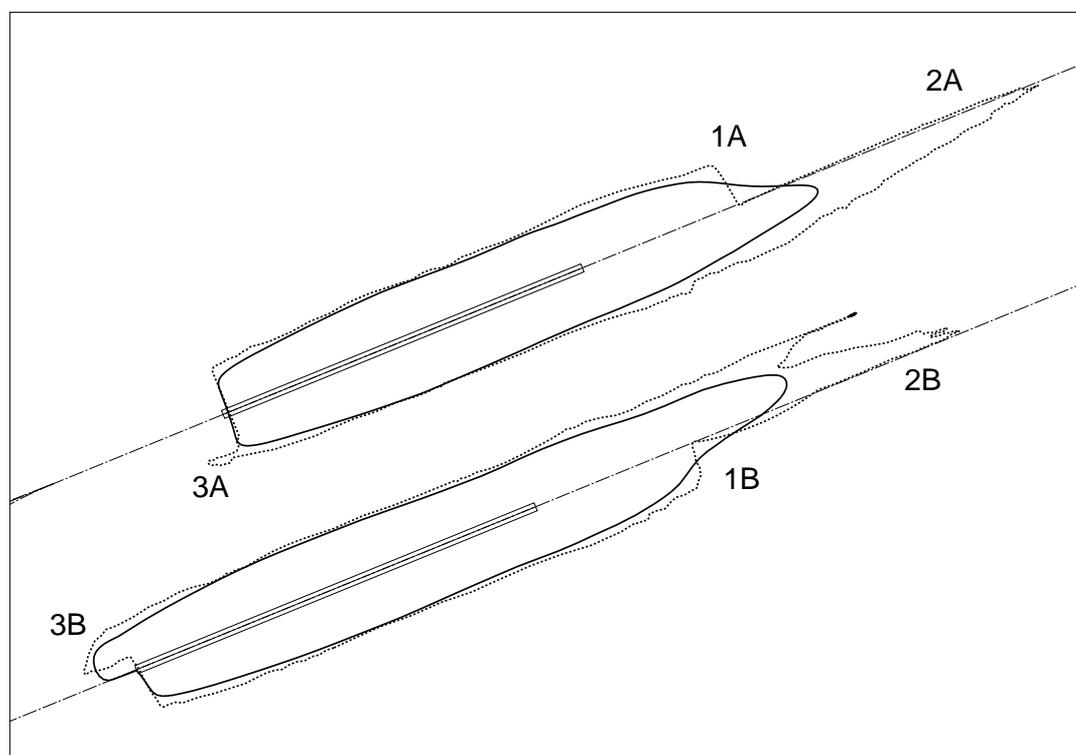


Abb.3-11: Kurven, auf denen ein A-bewerteter Maximalpegel von 75 dB in der Nacht gerade 6 mal erreicht wird. Zugrunde liegt ein fiktiver Flugbetrieb. Bei den durchgezogenen Kurven wurde eine Standardabweichung von 3 dB berücksichtigt, die punktiert dargestellten Kurven berücksichtigen keine normalverteilten Pegel. Die Flugstrecken sind strichpunktiert eingetragen. Nähere Erläuterungen siehe Text.

In beiden Fällen liegen die ermittelten Konturen nicht symmetrisch zu den Anfluggrundlinien. Außerdem bilden sich bei der Kontur um die untere Startbahn Ausbuchtung am linken Bahnende aus. Dieses Verhalten ist charakteristisch für die Ermittlung von Schwellenwertkonturen. Sobald die Beiträge einer Flugzeuggruppe den durch das Schwellenwertkriterium definierten Grenzpegel (in diesem Beispiel 75 dBA) unterschreiten, kann es zu Sprüngen im Konturverlauf kommen. In den mit einer Normalverteilung ermittelten Kurven werden die meisten dieser Effekte eliminiert. Wie die Unstetigkeiten im Verlauf der ohne Pegelverteilung ermittelten Konturen zustande kommt, kann folgendermaßen erklärt werden:

- In den Bereichen 1A und 1B wird der Grenzwert von 75 dBA gerade für den Rückschall von Abflügen einer bestimmten Flugzeuggruppe in Richtung 25 unterschritten. Obwohl die Gesamtanzahl der Bewegungen dieser Gruppe nur gering ist (weniger als 0.5 Bewegungen/Nacht), reicht es gerade aus, um die kritische Anzahl von 6 Bewegungen zu unter- bzw. überschreiten. Dies ist eine typische Eigenschaft von NAT-Kriterien — es ist lediglich von Bedeutung, ob der Grenzwert über- oder unterschritten ist. Wie hoch diese Überschreitung ausfällt ist unmaßgeblich.
- Im Bereich 2A fallen gerade die Beiträge der Abflüge von Flugzeugen einer anderen in Richtung 07R unter den Wert von 75 dBA, im Bereich 2B die Abflüge dieser Gruppe in Richtung 07L. Entsprechendes gilt für die Bereiche 3A und 3B für die korrespondierenden Abflüge in Richtung 25.

3.3. Simulationsverfahren

3.3.1. Prinzip

Simulationsverfahren verfolgen vom Prinzip her den naheliegendsten Weg, um die Belastung durch Fluglärm zu ermitteln. Sie stellen jedoch weitaus höhere Anforderungen an die Qualität der Eingabedaten sowie an die verfügbare Rechenleistung. Aus diesem Grund haben sich Simulationsverfahren im praktischen Gebrauch noch nicht durchgesetzt. Lediglich in der Schweiz wird ein auf einer Simulationstechnik basierendes Verfahren (FLULA-2) [33,34] zur Berechnung von Lärmzonen eingesetzt.

Simulationsverfahren basieren in der Regel auf einer möglichst realitätsnahen Beschreibung von Einzelflügen. Die bei derartigen Verfahren praktizierte Vorgehensweise soll im folgenden am Beispiel eines Verfahrens beschrieben werden, das in den 80er Jahren am Max-Planck-Institut für Strömungsforschung entwickelt und dort im Rahmen von wissenschaftlichen Grundlagenuntersuchungen zur Fluglärmrechnung eingesetzt wurde [32]. Dieses Verfahren wurde zunächst nicht weiterentwickelt, da sich die Beschaffung qualitativ hochwertiger Eingabedaten seinerzeit als nicht durchführbar erwies.

- Für ein vorgegebenes Flugzeug sowie ein definiertes An- oder Abflugverfahren wird die Flugbahn in eine Folge von Punkten diskretisiert, die in bestimmten, konstanten Zeitintervallen vom Flugzeug passiert werden. An jedem dieser Punkte (die die räumliche Lage definieren) ist zusätzlich die räumliche Orientierung (definiert durch Flugrichtung, Anstell- und Steigwinkel sowie Querneigungswinkel) bekannt. Dadurch ist die geometrische Konfiguration zwischen Flugzeug und Immissionsort vorgegeben.
- Neben den geometrischen Parametern müssen an jedem Flugbahnpunkt Fluggeschwindigkeit und Triebwerksleistung bekannt sein. Letztere definieren die Schallabstrahlungseigenschaften des Flugzeugs.
- Auf der Basis dieser Parameter kann anhand einer vorgegebenen akustischen Datenbasis, in der ausreichende Informationen über die Spektrum und Richtcharakteristik vorliegen müssen, der in Richtung auf den Immissionsort abgestrahlte Schall ermittelt werden.
- Der an diesem Immissionsort eintreffende Schall wird dann anhand einer Ausbreitungsrechnung ermittelt. Hier können — je nach Komplexität des Verfahrens — neben den auch in den konventionellen Verfahren berücksichtigten klassischen Dämpfungseffekten (Dämpfung für die geometrische Ausbreitung von Kugelwellen, Dämpfung durch

atmosphärische Absorption) zusätzlich die durch Meteorologie und Topographie hervorgerufenen Ausbreitungseffekte berücksichtigt werden.

- Durch sukzessive Ausbreitungsrechnungen für die einzelnen Flugbahnpunkte kann dann am Immissionsort ein zeitlicher Schallpegelverlauf ermittelt werden, der im Idealfall einem dort gemessenen Verlauf entsprechen sollte. Durch diesen zeitlichen Pegelverlauf sind dann alle Parameter vorgegeben, die zur Berechnung eines Lärmbewertungsmaßes notwendig sind.
- Abschließend wird — auf der Basis einer vorgegebenen Flugverkehrsprognose — wie bei konventionellen Verfahren über alle am entsprechenden Flugbetriebsszenario teilnehmenden Flugzeugmuster summiert.

3.3.2. Vor- und Nachteile von Simulationsverfahren

Simulationsverfahren bieten gegenüber den konventionellen Verfahren eine Reihe von Vorteilen:

- Da die Beiträge eines jeden Flugbahnpunktes explizit in die Berechnung eingehen, entfallen die bei der Beschreibung der konventionellen Verfahren diskutierten Schwierigkeiten aufgrund von endlich langen Flugstreckensegmenten oder gekrümmten Teilstrecken. Unstetigkeiten im Verlauf von ermittelten Lärmkonturen können nicht auftreten.
- Die Richtcharakteristik geht explizit in die Berechnung mit ein. Es sind also keinerlei empirische Korrekturen z.B. im Bereich hinter dem Startpunkt notwendig. Ebensovienig müssen Korrekturen bei der Berechnung der Geräuschkdauer angebracht werden, da immer der volle zeitliche Schallpegelverlauf in die Berechnung mit eingeht.
- Je nach Auslegung des Verfahrens können die Beiträge einzelner Quellmechanismen wie Strahl- oder Bläserlärm separat berücksichtigt werden. Dies betrifft auch die Modellierung der Einflüsse der Flugeschwindigkeit auf diese Schallentstehungsmechanismen.

Diesen Vorteilen stehen eine Reihe von Schwierigkeiten gegenüber, die einer weitgehende Verbreitung von Simulationsmodellen bisher im Wege standen:

- Simulationsverfahren stellen sehr hohe Anforderungen an die Qualität der Eingabedaten.
- Die Rechenzeiten bei der Anwendung von Simulationsverfahren sind sehr hoch.

Der zweite Punkt ist mittlerweile beim derzeitigen Stand der Rechnertechnik nur noch von untergeordneter Bedeutung. Nichtsdestoweniger sollte man den bei komplexen Verkehrsszenarien anfallenden Rechenaufwand nicht unterschätzen. Daher ist bei der Entwicklung von

Simulationsverfahren sehr auf sorgfältige und effiziente Programmierung zu achten. Erfahrungen im Umgang mit dem am MPI für Strömungsforschung entwickelten Simulationsprogramm haben gezeigt, daß für die Berechnung eines einzelnen zeitlichen Schallpegelverlaufs im Schnitt etwa 200 Einzelpegel ermittelt werden müssen. Dieser Wert ist mit der Anzahl der in die Berechnung mit eingehenden Flugzeugkategorien und Flugstrecken zu multiplizieren. Wenn noch Flugbahnstreuungen modelliert werden müssen, so kann selbst bei relativ kleinen Betriebsszenarien der Multiplikationsfaktor in der Größenordnung von etwa 5000 liegen, so daß sich pro Immissionsort etwa eine Million Einzelpegelberechnungen ergeben können. Bei einem quadratischen Rechengitter von 25 km Seitenlänge gehen (bei einer typischen Maschenweite von 250 m) 10000 Immissionsorte in die Berechnung mit ein. Man hat also selbst bei als klein einzustufenden Betriebsszenarien etwa 10^{10} Einzelpegelberechnungen auszuführen, die — je nach der Struktur des Verfahrens — mehr oder weniger komplex ausfallen können.

Von größerer Bedeutung ist bei Simulationsverfahren jedoch das Problem der Eingabedaten. Hier sind zwei Bereiche zu unterscheiden:

- Flugbetriebliche Daten sind in der Regel mittlerweile verfügbar. So beinhaltet die Datengrundlage des INM prinzipiell schon fast alle für eine exakte Flugbahnbestimmung notwendigen Informationen (Triebwerksleistungen, aerodynamische Beiwerte etc.). Sie basieren auf standardisierten Rechenmodellen [27,28], die die einer Flugbahnberechnung zugrunde liegenden (relativ einfachen) physikalischen Gesetzmäßigkeiten berücksichtigen.
- Schwieriger gestaltet es sich, die für eine Simulationsrechnung benötigten akustischen Daten zusammenzustellen. Informationen über Richtcharakteristiken und Schallspektren, die unter kontrollierten Meßbedingungen gewonnen sind und so auf Referenzbedingungen normiert werden können, sind in der Regel nur schwer zu bekommen. Zwar verfügen die Luftfahrzeughersteller über derartige Daten, die ja bei den Lärmzulassungsmessungen nach ICAO Annex 16 ermittelt werden. Diese werden i.a. aber nicht für Zwecke der Fluglärmprognose freigegeben. Die Gewinnung derartiger Daten durch kontrollierte Messungen ist demgegenüber sehr zeit- und auch kostenaufwendig.

3.4. Harmonisierung von Fluglärmrechnungsverfahren in der EU

Im Abschnitt 2.4 wurden die Aktivitäten der verschiedenen Working-Groups, die im Rahmen der *EU Future Noise Policy* eingerichtet wurden, beschrieben. Die WG 3 befaßt sich in diesem Zusammenhang mit der Erarbeitung von harmonisierten Lärmrechnungsverfahren. Die derzeitigen Zielsetzungen dieser Arbeitsgruppe sehen wie folgt aus:

- Es wird für alle Lärmarten ein übergreifendes Modell für die Schallausbreitungsvorgänge erarbeitet. Je nach Anforderungen wird dieses für die verschiedenen Lärmarten in unterschiedlicher Weise genutzt — so ist die Berücksichtigung von Abschirmung und Reflektion durch Bewuchs und Bebauung für Fluglärm in der Regel nicht notwendig. Nichtsdestoweniger soll das zu erarbeitende Ausbreitungsmodell alle Aspekte der Schalltransmission berücksichtigen.
- Es werden separate Modelle für die Berechnung von Straßenverkehrs-, Schienenverkehrs- und Fluglärm erarbeitet.
- Solange noch keine harmonisierten Berechnungsverfahren erarbeitet sind, wird denjenigen Mitgliedsstaaten, die nicht über ein derartiges Verfahren verfügen, ein schon existierendes Verfahren zur Anwendung empfohlen.

Was den Fluglärm betrifft, so besteht die Tendenz, als Übergangsverfahren das Integrated Noise Model in der Version 6 zu empfehlen. Diese Version wird voraussichtlich im September 1999 erscheinen. In ihr dürften die wesentlichen Schwachpunkte der Version 5 ausgeräumt sein (s.a. Abschnitt 5.2). Die Empfehlung des INM ergibt sich aus der Tatsache, daß dieses Programm frei verfügbar und sehr gut dokumentiert ist. Mittlerweile werden sogar Schulungskurse für das INM angeboten.

Bezüglich eines endgültigen, harmonisierten Berechnungsverfahrens bestehen noch keine klaren Zielvorstellungen. Zunächst soll die Frage der Verfügbarkeit ausreichender akustischer Datengrundlagen geklärt werden. Dazu ist zunächst eine entsprechende Vorstudie geplant.

Prinzipiell existiert auf europäischer Ebene schon ein Vorschlag für ein standardisiertes Berechnungsverfahren. Dieses wurde im Rahmen der European Civil Aviation Conference (ECAC) erarbeitet und als ECAC Doc.29 in der 2. Auflage im Juli 1997 verabschiedet [28]. Dieses Dokument beschreibt allerdings lediglich die Struktur eines Rechenverfahrens sowie die Formate für die zugrunde zu legenden Eingabedaten. Das Datengerüst ist allerdings noch nicht mit konkreten Werten ausgefüllt — insofern stellt Doc.29 noch keine vollständige Grundlage zur Berechnung von Fluglärm dar.

Das in Doc.29 beschriebene Verfahren ist von konventioneller Struktur, bietet aber eine Reihe von Algorithmen, die die Behandlung gekrümmter und nur endlich langer Flugstreckensegmente ermöglichen. Folgende Anmerkungen wären zu diesem Verfahren zu machen:

- Die Darstellung der flugbetrieblichen Daten erfolgt auf der Basis eines Systems von aerodynamischen und triebwerksspezifischen Beiwerten. Dieses Verfahren — das eine höchstmögliche Flexibilität bei der Definition von An- und Abflugverfahren bietet — ist auch im INM implementiert. Bei der Ausfüllung des Datengerüsts kann also hier auf vorhandenes Material zurückgegriffen werden.
- Das Gerüst für die akustischen Daten basiert auf Noise-Power-Distance-Tabellen für A-bewertete Maximalschallpegel und Einzelereignispegel in Form des *SEL*. Hier wäre es empfehlenswert, zumindest Referenzschallspektren einzuführen. Dadurch wäre auch die Behandlung unterschiedlicher atmosphärischer Bedingungen möglich.

Ob bei der Definition eines harmonisierten Berechnungsverfahrens innerhalb der EU auf Doc.29 — ob in der vorliegenden oder in einer modifizierten Form — zurückgegriffen wird, ist noch offen. Zumindest bietet sich hier ein Verfahren an, das auf europäischer Ebene entwickelt wurde.

4. Genauigkeit konventioneller Fluglärmrechnungsverfahren

4.1. Definition und Einflußfaktoren

Die Genauigkeit eines Fluglärmrechnungsverfahrens kann man daran abschätzen, inwieweit die mit dem Verfahren an einem Ort ermittelten Immissionswerte die an diesem Ort unter vergleichbaren Bedingungen gemessenen Werte wiedergeben. Dabei handelt es sich im Regelfall um die Wiedergabe einer längerfristigen Geräuschbelastung in Form eines Fluglärmdeskriptors. Die Reproduktion von Einzelereignissen ist i.a. nicht die praktische Zielsetzung der Anwendung von konventionellen Fluglärmrechnungsverfahren.

Vergleiche von gemessenen und berechneten Werten sind nur für ein schon vergangenes Flugbetriebsszenario mit bekannten Verkehrsparametern möglich. Derartige Vergleiche können jedoch lokal sehr unterschiedlich ausfallen, da die Messung eines Fluglärmdeskriptors stark von den Meßbedingungen abhängt (Lage des Meßortes, spezielle Schallausbreitungsbedingungen, Meßschwelle). Daher sollte die Genauigkeit eines Rechenverfahrens nur durch Vergleiche zwischen Messung und Rechnung an einer ausreichend großen Zahl von Meßorten (möglichst an mehreren Flughäfen) abgeschätzt werden, wobei die meßstellenspezifischen Gegebenheiten zu berücksichtigen sind.

Man sollte diejenige Genauigkeit, mit der der Absolutwert eines Deskriptors ermittelt werden kann, von derjenigen Genauigkeit unterscheiden, mit der eine Änderung seines Wertes (z.B. bei Änderungen des Flugbetriebs) ermittelt werden kann. Eine hohe *absolute Genauigkeit* impliziert in der Regel auch eine hohe *relative Genauigkeit*, stellt jedoch höhere Anforderungen an das Berechnungsmodell.

Ob hohe relative oder hohe absolute Genauigkeit gefordert sind, hängt von der Aufgabenstellung einer Berechnung ab. Sollen z.B. Berechnungen für ein vergangenes Verkehrsszenario durchgeführt werden, so ist die absolute Genauigkeit maßgeblich. Sollen Änderungen in der Lärmbelastung (z.B. bedingt durch Änderungen in Verkehrsaufkommen und Streckenführung) untersucht werden, so ist in der Regel eine hohe relative Genauigkeit ausreichend.

Beim Begriff der absoluten Genauigkeit sollte noch hinsichtlich der *lokalen Genauigkeit* und der *globalen Genauigkeit* unterschieden werden. Die lokale Genauigkeit ist diejenige, die an einem beliebigen Immissionsort erreichbar ist, während die globale Genauigkeit den mittleren Genauigkeitsgrad im gesamten Flughafenumfeld darstellt. Eine hohe lokale Genauigkeit impliziert natürlich auch einen hohen Grad an globaler Genauigkeit.

Simulationsverfahren können naturgemäß einen hohen lokalen Genauigkeitsgrad erreichen, da sie keine vereinfachenden Annahmen bei der Modellierung der physikalischen Gesetzmäßigkeiten machen wie dies bei konventionellen Verfahren der Fall ist. Allerdings können letztere durchaus einen hohen Grad an globaler Genauigkeit erreichen (s.w.u.).

Die absolute Genauigkeit des Rechenmodells hängt von der Art der Umsetzung der physikalischen Gegebenheiten in einen Rechenalgorithmus ab. Dies umfaßt folgende Teilbereiche:

- Die Modellierung der Flugbahn (je nach Modell bezogen auf das einzelne Flugzeug oder auf eine Flugzeugkategorie),
- die Modellierung des Flugzeugs als Schallquelle,
- die Modellierung der Schallausbreitungsvorgänge sowie
- die Genauigkeit der Flugbetriebsbeschreibung.

Die Modellierung der Flugbahn und des Flugzeuges als Schallquelle sind durch die Form der Datengrundlage bestimmt. Hierzu wurden in den vorangegangenen Abschnitten schon die wichtigsten Einflußfaktoren — vor allem bezogen auf konventionelle Verfahren — diskutiert.

Eine vollständige, exakte Beschreibung der Schallausbreitungsvorgänge erfordert eine genaue Kenntnis aller diese Vorgänge beeinflussenden Parameter. Dies beinhaltet die meteorologischen Eigenschaften der Atmosphäre sowie die Eigenschaften von Topographie und Bebauung am Boden. Diese Parameter können für einen Einzelflug noch hinreichend genau definiert werden. Sie sind jedoch für komplexe Flugbetriebsszenarien, die sich auf längere Beurteilungszeiträume beziehen, nicht mehr im erforderlichen Genauigkeitsgrad darzustellen. Für umfangreiche Flugbetriebsfälle können daher lediglich mittlere meteorologische Bedingungen zugrunde gelegt werden.

Sind diese geeignet gewählt, so ist eine ausreichende Genauigkeit in der Bestimmung der relevanten Immissionsgrößen durchaus gewährleistet. So werden z.B. bei der Berechnung der Koeffizienten für die atmosphärische Dämpfung in der Regel als Standardbedingungen eine Temperatur von 15°C sowie eine relative Feuchte von 70 Prozent angenommen. Für Ausbreitungsentfernungen bis zu etwa 2000 Metern lassen sich mit diesen Vorgaben im Temperaturbereich von 10 bis 25°C und im Bereich einer relative Feuchte von 50 bis 80 Prozent A-bewertete Maximalschallpegel mit einer Abweichung von weniger als 1 dB bestimmen. Da die einer Berechnung nach dem AzB-Verfahren in der Regel die Monate Mai bis Oktober zugrunde liegen, ist die Wahl dieser mittleren Ausbreitungsbedingungen gerechtfertigt.

Effekte wie Windeinfluß, Turbulenz und Temperaturschichtung auf die Schallausbreitung werden bei konventionellen Verfahren i.a. nicht explizit berücksichtigt. Wind- und Tem-

peraturgradienten können jedoch bei bodennaher Schallausbreitung beträchtliche Einflüsse haben (z.B. Bildung von akustischen Schattenzonen). Derartige Effekte treten in der Regel allerdings nur lokal und oft nur über kleinere Zeiträume auf.

Wesentlich ist allerdings die Genauigkeit, mit der die Zusatzdämpfung bei bodennaher Schallausbreitung beschrieben wird. Dieser Dämpfungseffekt hängt stark von den meteorologischen Bedingungen (Wind, Temperaturschichtung) sowie vom Spektrum der Schallquelle ab. Bei unterschiedlichen Annahmen für diese Parameter können sich bei der Modellierung des Effekts daher große Unterschiede ergeben, wie sie in Abb.3-9 im Abschnitt 3 dargestellt sind. Derartige Unterschiede machen sich bei Immissionsberechnung im Bereich hinter dem Startpunkt sowie an Orten in größeren Entfernungen zur Flugbahn natürlich bemerkbar. Die absolute Genauigkeit eines Rechenmodells hängt also wesentlich von der Art der Modellierung der Zusatzdämpfung ab.

Ein weiterer wichtiger die Genauigkeit einer Fluglärmrechnung beeinflussender Faktor ist Flugbetriebsbeschreibung. Soweit es sich bei dem zu untersuchenden Szenario um ein zurückliegendes handelt, hängt sie lediglich von der Genauigkeit ab, mit der die einzelnen An- und Abflugstrecken definiert werden können. Diese ist vor allem dann sehr hoch, wenn auf Radaraufzeichnungen zurückgegriffen werden kann.

Im Falle eines zukünftigen Flugbetriebs wird die Genauigkeit der Berechnung demgegenüber stark von der prognostizierten Anzahl der Flugbewegungen sowie den Annahmen über die Typenzusammensetzung bestimmt. Während die Anzahl der Flugbewegungen und der Typenmix in der Regel die Größe von ermittelten Lärmkonturen beeinflussen, bestimmt die Streckenbeschreibung (einschließlich der seitlichen Flugbahnstreuung) im wesentlichen die Form der Konturen.

Ein wichtiger Punkt für die Erstellung einer Flugbetriebsprognose (d.h. einer Flugbetriebsbeschreibung für ein zukünftiges Szenario) ist die Handhabbarkeit des Berechnungsverfahrens. Wenn — wie wie beim Integrated Noise Model INM — mehr als 250 verschiedene Kombinationen von Flugzeugtyp und Abfluggewicht definiert sind, ist eine Flugbetriebsprognose nur schwer zu erstellen. Besser ist eine geeignete Zuordnung einzelner Flugzeugmuster zu Typenkategorien, da Flugbetriebsprognosen in der Regel auch auf einer Einteilung auf Kategorien (Sitzplatz- bzw. Gewichtskategorien) beruhen.

4.2. Genauigkeit konventioneller Rechenmodelle

Im Auftrag des deutschen Verkehrsministeriums durchgeführte vergleichende Untersuchungen [25] zwischen dem deutschen AzB-Berechnungsverfahren und dem Integrated Noise Model INM haben bestätigt, daß die absolute Genauigkeit im wesentlichen durch die Qualität der Datenbasis und die Beschreibung der Zusatzdämpfung bestimmt wird: Werden für identische Flugbetriebsbeschreibungen identische Datenbasen und ein identischer Algorithmus zur Beschreibung der Zusatzdämpfung zugrunde gelegt, so liefern beide Modelle vergleichbare Ergebnisse. Der Einfluß der Korrekturverfahren zur Geometrie zwischen Flugstrecke und Immissionsort ist also von sekundärer (eher lokaler) Bedeutung.

Die relative Genauigkeit stellt demgegenüber geringere Anforderungen an die Qualität des Berechnungsmodells, da hier nur gefordert wird, daß Änderungen in der Lärmbelastung wiedergegeben werden sollen. Die Genauigkeit rechenmodellspezifischer Korrekturverfahren wirkt sich in diesem Fall nicht so stark aus.

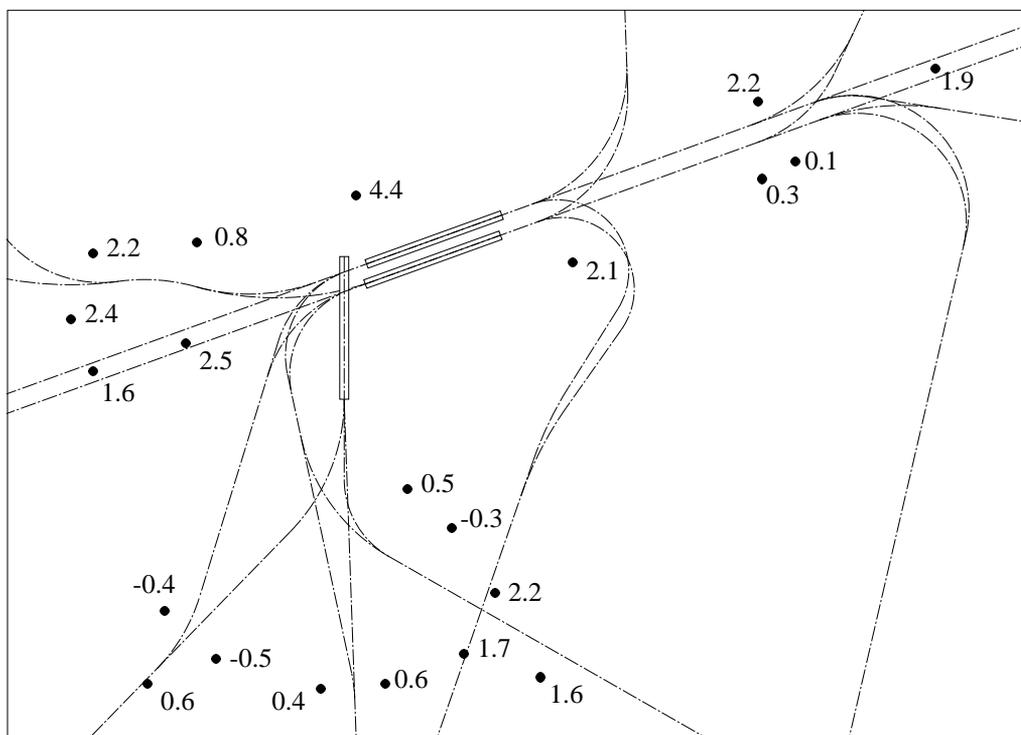


Abb. 4-1: Vergleich von gemessenen und mit dem AzB-Verfahren berechneten Werten des $L_{eq(4,FLG)}$ für die Meßstellen des Flughafens Frankfurt/Main. Zugrunde liegen die 6 verkehrsreichsten Monate des Jahres 1995. Eingetragen ist die Differenz zwischen gemessenem und berechnetem $L_{eq(4,FLG)}$. Positive Werte besagen, daß die Rechnung höhere Werte lieferte als die Messung.

Eine Abschätzung für eine erreichbare absolute Genauigkeit gaben Berechnungen mit dem deutschen AzB-Verfahren für den Flugbetrieb am Flughafen Frankfurt/Main in den sechs verkehrsreichsten Monaten des Jahres 1995. Daraus ergaben sich an den Meßstellen innerhalb eines Bereiches von etwa 12 km um das Startbahnsystem folgende die in der Abb.4-1 ausgewiesenen lokalen Abweichungen zwischen Meß- und Rechenwerten (positive Werte besagen, daß der Meßwert höher als der Rechenwert war). Die maximale Abweichung betrug 4.4 dB und trat im Bereich hinter der Startbahn auf. Die globale Genauigkeit dürfte im Bereich von 1 bis 2 dB liegen.

4.3. Zusammenfassung

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die absolute Genauigkeit von konventionellen Fluglärmrechnungsverfahren im wesentlichen von folgenden Einflußfaktoren abhängt:

- Der Qualität der Flugbetriebsbeschreibung. Diese kann für vergangene Flugbetriebsfälle durch die Auswertung von Radardaten erhöht werden. Für zukünftige Betriebsfälle vereinfacht sich eine Prognose durch geeignete Zusammenfassung einzelner Flugzeugmuster zu Kategorien.
- Der Qualität der dem Berechnungsmodell zugrunde liegenden Datenbasis. Diese kann z.B. durch die Auswertung der von automatischen Fluglärmüberwachungsanlagen gemessenen Daten optimiert werden.
- Dem Berechnungsmodell selbst. Hier ist insbesondere darauf zu achten, daß der Algorithmus zur Ermittlung der Zusatzdämpfung bei bodennaher Schallausbreitung geeignet gewählt wird.

Falls mittels eines Berechnungsverfahrens lediglich Änderungen in der Lärmbelastung ermittelt werden sollen, ist der Einfluß des Berechnungsmodells nicht mehr so bedeutsam. Hier ist vor allem die Qualität der Datenbasis und der Flugbetriebsprognose maßgeblich.

Vergleiche zwischen Messungen und Rechnungen haben gezeigt, daß mit konventionellen Berechnungsmodellen gemessene Werte des äquivalenten Dauerschallpegels mit einer durchschnittlichen Genauigkeit wiedergegeben werden können, die kleiner als 2 dB ist. Es sei jedoch angemerkt, daß eine derartige lokale Genauigkeit nicht an exponierten Orten (wie hinter dem Startrollpunkt oder im Bereich von gekrümmten Flugstreckensegmenten) erreichbar ist. Lokal können durchaus Differenzen in der Größenordnung von 5 dB bestehen. Durch das Anbringen geeigneter Korrekturmaßnahmen am Rechenmodell können derartige Differenzen jedoch noch minimiert werden.

5. Der CAEP/2 Task MODEL 1

5.1. Intention

Zu Beginn des Jahres 1997 begannen die Arbeiten an einem Task, der durch die Working Group 2 des Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP/2) der International Civil Aviation Organization ICAO initiiert wurde. Im Rahmen dieses Task, der unter der Bezeichnung MODEL 1 lief, sollten folgende Aktivitäten verfolgt werden:

- Bestandsaufnahme und Analyse der derzeit weltweit im praktischen Einsatz befindlichen Fluglärmerechnungsverfahren.
- Vergleichende Untersuchungen dieser Verfahren anhand eines klar definierten Flugbetriebsfalles
- Schaffung von Grundlagen für eine Überarbeitung des ICAO Circular 205 [15] und des SAE AIR 1845 [34]. Diese beiden Dokumente stellen die international gebräuchlichen Richtlinien für die Fluglärmerechnung dar, an der sich viele im Einsatz befindliche Berechnungsverfahren (so auch das Integrated Noise Model) orientieren.

Es gab eine Reihe von Gründen für die Aufnahme dieser Aktivitäten (die in enger Zusammenarbeit mit dem Committee A-21 (Aircraft Noise) der Society of Automotive Engineers erfolgten):

- Es hatten sich in der Praxis immer wieder Differenzen zwischen gemessenen und mit dem Integrated Noise Model berechneten Daten ergeben. In Anbetracht der Tatsache, daß das INM das weltweit gebräuchlichste Fluglärmerechnungsverfahren darstellt, bestand hier ein dringender Aufklärungsbedarf.
- Die praktischen Erfahrungen im Bereich der Fluglärmprognose deuteten an, daß das für die Berechnung der Zusatzdämpfung von der SAE empfohlene Verfahren (SAE AIR 1751 [31]) den tatsächlichen Gegebenheiten nicht gerecht wird und zu hohe Dämpfungswerte liefert.
- Die derzeit bestehenden Richtlinien beschreiben in ungeeigneter Weise den hinter dem Startpunkt erzeugten Lärm und geben keine Anleitung zur Modellierung von Umkehrschub.

Nach einer umfangreichen Umfrage zu diesen Themen fand ein erstes Treffen zum Task MODEL 1 im Juni 1997 in Den Haag statt. Im Rahmen dieser Sitzung wurden Fluglärmerechnungsverfahren aus folgenden Ländern vorgestellt: Großbritannien, Schweiz, USA(INM),

Brasilien, Deutschland(AzB), Frankreich, Japan, Niederlande. Aérospatiale stellte außerdem seine eigenen Berechnungsverfahren vor. Neben den Berechnungsverfahren wurden außerdem eine Reihe von Untersuchungen präsentiert, die sich mit allgemeinen Themen der rechnerischen Fluglärmprognose auseinandersetzten. Wesentliches Resultat war zunächst die Kritik an dem in SAE AIR 1751 definierten Verfahren zur Berechnung der Zusatzdämpfung.

Das Meeting in Den Haag stellte im Prinzip die erste Phase der Aktivitäten zu MODEL 1 dar, die im wesentlichen in einer Übersicht über die nationalen Modelle und ersten vergleichenden Untersuchungen insbesondere zum INM bestand. Erwartungsgemäß ergab sich das Resultat, daß die unterschiedlichen Berechnungsmodelle stark voneinander abweichende Ergebnisse liefern. Um diese Differenzen besser analysieren und quantifizieren zu können, wurden für die zweite Phase die Untersuchungen zum sog. *Hybrid Airport* festgelegt.

5.2. Die Untersuchungen zum Hybrid Airport

Um einen direkten Vergleich der unterschiedlichen Rechenmodelle durchführen zu können, war die Definition eines Referenzflugbetriebes notwendig. Dieser sollte einen realitätsnahen aber anonymen Flugbetrieb simulieren. Die Anonymität war die von den meisten Teilnehmern geforderte und damit grundlegende Voraussetzung. Andererseits bestand die Forderung einer Validierung der Berechnungsergebnisse auf der Basis von real gemessenen Immissionswerten. Diese Problematik wurde durch das Konzept des *Hybrid Airport* bewältigt.

Der Hybrid Airport stellt im Prinzip ein Konstrukt aus fiktiven und realen Komponenten eines Flugbetriebszenarios dar. Grundlage ist ein (fiktives) Startbahnsystem aus zwei Bahnen mit den Betriebsrichtungen 00/18 und 09/27. Beide Bahnen besitzen eine Länge von 4000 Metern. Die von diesen Bahnen ausgehenden An- und Abflugstrecken stellen demgegenüber Flugstrecken dar, die an verschiedenen Flughäfen der an der Untersuchung beteiligten Mitgliedsländer real existieren. Folgende Anforderungen wurden an die von den einzelnen Teilnehmern zu jeder Flugstrecke zu liefernden Daten gestellt:

- Beschreibung der zu der Flugstrecke gehörenden Start-/Landebahn
- Beschreibung aller auf der Strecke abgewickelten Operationen (Flugzeugtyp, Triebwerk, Destination bzw. zu erfliegende Strecke) sowie zur Flugidentifikation notwendige Daten (Kennziffer, Zeit)
- Informationen über die meteorologischen Bedingungen
- Beschreibung des realen Flugwegs einer jeden Operation durch Radardaten

- Lage von Lärmmeßstellen im Bereich dieser Flugstrecke
- Gemessene Maximalpegel und *SEL*-Werte für jeden erfaßten Flug an jeder Meßstelle

Jede Strecke wurde dann einer Bahn des fiktiven Startbahnsystem zugeordnet. Die geometrischen Angaben (Flugbahnbeschreibung, Lage der Meßstellen) wurden dazu in geeigneter Weise transformiert. Das Resultat war ein fiktiver Flugbetrieb, bei dem jedoch reale Flugvorgänge in adäquater Weise real gemessenen Immissionswerten zugeordnet werden konnten. Insgesamt gingen 812 Ab- und 620 Anflüge in das Szenario mit ein. Die Typenzusammensetzung wurde dabei durch die verfügbaren Radaraufzeichnungen bestimmt. Sie war beim Abflug weitestgehend durch schweres Fluggerät dominiert (38 Prozent B747), während beim Anflug nahezu 57 Prozent der Flugbewegungen in die Kategorie der kleineren Strahlflugzeuge mit Höchstabflugmassen bis etwa 100 Tonnen fielen. Insofern stellte das Verkehrsszenario des Hybrid Aiport keinen sehr realistischen Flugbetriebsfall dar.

Der zweite Arbeitsschritt mußte von den an der Untersuchung teilnehmenden 9 Mitgliedstaaten (Schweiz, Niederlande, Frankreich, Deutschland, Großbritannien, Australien, Dänemark, USA und Japan) durchgeführt werden. Er bestand in einer geeigneten Anpassung der vorgegebenen Daten in ein dem verwendeten Rechenprogramm entsprechendes Eingabeformat. Dazu gehörte:

- Beschreibung des Bahnsystems
- Beschreibung der Flugstrecken und Flugkorridorbreiten anhand der Radardaten
- Zuordnung der einzelnen Flugbewegungen zu den in den Rechenmodellen verwendeten Typen oder Typengruppen

Je nach Art des verwendeten Rechenverfahrens ergaben sich hier für die einzelnen Teilnehmer unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Datenaufbereitung.

Nach mehreren Zwischenstadien, in denen Teil- und Detailberechnungen durchgeführt wurden, wurden letztendlich Konturen energieäquivalenten Dauerschallpegels für das Gesamtszenario ermittelt und miteinander verglichen.

Abb.5-1 zeigt das dem Hybrid Airport zugrunde liegende Startbahn- und Streckensystem. Die Strecken wurden als Eingabegrundlage für das AzB-Verfahren aufbereitet (Segmentierung in gerade Teilstücke und Kreisbögen). Eingetragen sind weiterhin mit dem AzB-Verfahren ermittelte Konturen des auf 24h bezogenen energieäquivalenten Dauerschallpegels $L_{eq(3),24h}$ mit den Werten 55 und 60 dB.



Abb.5-1: Kurven $L_{eq(3),24h} = 55$ und 60 dB für den im Task MODEL 1 untersuchten *Hybrid Airport*. Die Kurven wurden nach dem AzB-Verfahren berechnet. Startbahnen und Flugstrecken (strichpunktiert) sind ebenfalls eingetragen.

Der Vergleich der mit den verschiedenen Verfahren ermittelten Konturen zeigte teilweise sehr große Unterschiede in den von den Konturen umschlossenen Flächen. Die Form der Konturen war vergleichbar, was aufgrund der identischen Eingabedaten für den Flugbetrieb zu erwarten war. Separate Untersuchungen, bei denen jeweils nur An- bzw. Abflüge ausgewertet wurden, zeigten, daß die größten Unterschiede bei der Modellierung der Abflüge auftraten. Tabelle 5-1 verdeutlicht dies anhand einer Zusammenstellung der von der 55 dB Kontur des $L_{eq(2),24h} = 55$ umschlossenen Flächen. Die einzelnen Verfahren sind hier mit den Buchstaben A bis I gekennzeichnet, da die Resultate der durchgeführten Berechnungen nach Absprache mit den an der Untersuchung beteiligten Partnern als vertraulich zu behandeln sind. Aus diesem Grunde sind im Bild 14 auch lediglich die mit dem AzB-Verfahren berechneten Konturen eingetragen.

Die berechneten Konturen liegen flächenmäßig in einem Bereich, der etwa von der Hälfte bis zum Doppelten der von der AzB-Kontur umfaßten Fläche liegt. Die kleinsten Konturen

ergaben sich für das INM und für Verfahren, die auf der INM-Datenbasis aufsetzen. Die ermittelten Flächen haben eine Bandbreite von fast 400 Prozent. Geht man von einer typischerweise 20-prozentigen Flächenänderung pro dB Änderung im L_{eq} aus, so entspricht das einer mittleren Pegeldifferenz von etwa 7.5 dB zwischen der kleinsten und der größten ermittelten Kontur.

Verfahren	Fläche [km ²]
A	597
B	330
C	322
D (AzB)	305 (253 [*])
E	222
F	190
G (INM)	173
H (INM)	166
I (INM)	164

Tabelle 5-1: Vergleich der von der für Abflüge ermittelten Kontur $L_{eq,(24h)} = 55$ dB umschlossenen Flächen für die neun verschiedenen in den MODEL 1-Untersuchungen eingesetzten Berechnungsverfahren. Berechnungsverfahren D ist die AzB. Die Verfahren G—I sind entweder das INM oder Verfahren, die auf der INM-Datengrundlage basieren. Mit dem AzB-Verfahren wurde zusätzlich eine Kontur mit dem Bodendämpfungsalgorithmus nach SAE AIR 1751 ermittelt (*).

Diese Ergebnisse wurden von den Task-Mitgliedern im Oktober 1998 auf einem Treffen in Toulouse diskutiert und näher analysiert. Dabei ergaben sich folgende Resultate:

- Beim Verfahren A wurden Schubreduktionen von Start- auf Steigschub nicht berücksichtigt. Da derartige Reduktionen gerade bei der B747 durchaus in der Größenordnung von 4 bis 5 dB liegen und der Flugbetrieb durch diese Flugzeugkategorie dominiert wurde, sind Abweichungen dieser Größenordnung verständlich. Berücksichtigt man Verfahren A nicht mehr im durchgeführten Vergleich, so umfaßt der ermittelte Flächenbereich noch etwa 200 Prozent (entsprechend einer mittleren Pegeldifferenz von etwa 3.8 dB).
- Die Zusatzberechnungen bei denen im AzB-Verfahren der Bodendämpfungsalgorithmus nach SAE AIR 1751 eingesetzt wurde, lieferten um nahezu 20 Prozent kleinere Konturflächen. Diese Relation wurde durch Berechnungen bestätigt, die das amerikanische Department of Transportation (DOT) mit einem im INM implementierten

modifizierten Dämpfungsalgorithmus durchführte. Die wesentliche Bedeutung der Zusatzdämpfung ist also auch auf internationaler Ebene erkannt worden. Setzt man den Einfluß dieses Effekts bei den durchgeführten Berechnungen mit dem INM mit etwa 20 Prozent an, so ergibt sich für die unterschiedlichen Verfahren noch eine Bandbreite von etwa 180 Prozent in den berechneten Flächen. Diese dürften im wesentlichen durch die unterschiedlichen Datengrundlagen bedingt sein.

- Bezüglich des Effekts der Bodendämpfung kam von seiten des Chairman des SAE Committees A-21 die Information, daß der Standard AIR 1751 überarbeitet wird. Der neue Dämpfungsalgorithmus wird maximale Dämpfungen in der gleichen Größenordnung wie das AzB-Verfahren liefern und in der Version 6 des INM integriert sein.
- Wesentlicher Einflußfaktor ist und bleibt die Qualität der derzeitig verfügbaren Datengrundlagen, insbesondere der INM Database. Untersuchungen hierzu wurden schon in einem früheren im Auftrag des BMV erstellen Berichts [25] präsentiert. Von Seiten des SAE A-21 Committees wurde erklärt, daß im Rahmen einer Überarbeitung des Standards SAE AIR 1845 [34] auch mit einer Definition neuer NPD-Tabellen zu rechnen ist. Hier sollen insbesondere die Flugzeuge der Airbus-Familie besser berücksichtigt werden. Diese Daten werden in der nächsten Version der INM Database vermutlich schon integriert sein.

5.3. Weitere Vorgehensweise

Als dritte Arbeitsphase im Task MODEL 1 war ein Vergleich der mit den verschiedenen Modellen berechneten Immissionswerte mit den gemessenen Werten geplant. In der schon erwähnten früheren im Auftrag des BMV durchgeführten Untersuchung wurden schon derartige Vergleiche mit dem AzB- und dem INM-Verfahren durchgeführt. Dabei ergaben sich für das AzB-Verfahren z.T. bedeutend geringere Differenzen zwischen Rechen- und Meßwert als für das INM.

Im Rahmen des Treffens in Toulouse wurden erste derartige Vergleiche auch von den Vertretern der Schweiz und Großbritanniens präsentiert. Dabei kristallisierte sich heraus, daß derartige Vergleiche sich in der Regel als relativ problematisch erweisen. Diese Erfahrung kann von deutscher Seite bestätigt werden. Während der Arbeiten an einem Ergänzungsvorschlag zur AzB, die in den Jahren 1995 und 1996 im Rahmen einer ad-hoc Arbeitsgruppe der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (ADV) durchgeführt wurden, waren hier schon umfangreiche Erkenntnisse bezüglich dieser Problematik gewonnen worden. So

sind bei derartigen Vergleichen eine Vielzahl von Einflußfaktoren und Parametern zu berücksichtigen, die bei den im Rahmen von MODEL 1 zur Verfügung gestellten Daten nicht oder nur teilweise bekannt waren. Aus diesem Grunde wurden weitere Aktivitäten bezüglich der dritten Arbeitsphase bis auf weiteres verschoben.

Der letzte im Rahmen der Arbeiten an MODEL 1 zu behandelnde Punkt betrifft die Art der geplanten Überarbeitung des ICAO Circular 205 [15]. Endgültige Entscheidungen wurden hier zunächst nicht getroffen. Es bestand aber die Tendenz, innerhalb dieses Dokumentes keine vollständige Beschreibung des mathematischen Formalismus eines Fluglärmrechnungsverfahrens einzubinden sondern vielmehr auf entsprechende andere Dokumente (SAE AIR 1845, SAE AIR 1751) zu verweisen. Dies erscheint insofern als sinnvoll, als diese Dokumente ohnehin einen nahezu identischen Inhalt hatten. ICAO Circular 205 wird sich vermutlich mehr in Richtung eines "Ratgebers" entwickeln, der Hinweise aus der Praxis der Fluglärmrechnungen beinhaltet (Behandlung von Problemen, zu berücksichtigende Einflußfaktoren etc.) und sich auch auf entsprechende Probleme im Zusammenhang mit Noise Monitoring beziehen wird.

6. Zur Fluglärmproblematik in Deutschland

6.1. Die gesetzlichen Grundlagen

Am 30. März 1971 wurde das Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm verkündet. Es fordert die Festsetzung eines *Lärmschutzbereichs* an zivilen Flugplätzen mit Linienverkehr sowie an militärischen Flugplätzen mit Strahlflugzeugverkehr. Der Lärmschutzbereich umfaßt das Gebiet, in dem der in der Anlage zu §3 des Gesetzes definierte äquivalente Dauerschallpegel L_{eq} (im vorliegenden Bericht mit $L_{eq(4,FLG)}$ bezeichnet) einen Wert von 67 dB überschreitet. Dieser Bereich wird durch die Kurve $L_{eq(4,FLG)} = 75$ dB zusätzlich in zwei Zonen unterteilt, deren innere als Schutzzone 1 und deren äußere als Schutzzone 2 bezeichnet wird. Das Fluglärmgesetz regelt vor allem bauliche Beschränkungsmaßnahmen innerhalb des Lärmschutzbereichs sowie zugehörige Entschädigungspflichten, schreibt aber z.B. auch (in Erweiterung des Luftverkehrsgesetzes) die Einrichtung von Fluglärmkommissionen vor.

Die Festsetzung eines Lärmschutzbereiches erfolgt auf der Basis einer rechnerischen Ermittlung des äquivalenten Dauerschallpegels. Die dafür zugrunde zu legende Rechenvorschrift ist in der *Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen an zivilen und militärischen Flugplätzen nach dem Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm vom 30. März 1971* — kurz *AzB* genannt — festgelegt. Die *AzB* wurde 1975 im Gemeinsamen Ministerialblatt veröffentlicht [22]. Ihre Rechenvorschrift wird seitdem in ungeänderter Form angewendet.

Neben der reinen Berechnungsvorschrift beinhaltet die *AzB* auch eine Sammlung an akustischen und flugbetrieblichen Eingangsdaten, die für eine Fluglärmrechnung zwingend notwendig sind. Diese basieren auf einer Einteilung der am Luftverkehr teilnehmenden Flugzeugmuster in repräsentative Gruppen, die durch Höchstabflugmasse und Lärmzeugnis nach ICAO Annex 16 charakterisiert sind.

Die ursprüngliche, 1975 veröffentlichte Gruppeneinteilung wurde zu Anfang der 80er Jahre im Auftrag des Umweltbundesamtes überarbeitet und in Form einer Ergänzung durch den Bundesminister des Innern im Jahr 1984 in die *AzB* eingearbeitet [23]. Dadurch wurde den Änderungen in der Flugzeug- und Triebwerkstechnik gegenüber der Situation bei der Veröffentlichung der *AzB* Rechnung getragen. Eine weitere Überarbeitung der Flugzeuggruppendaten erfolgte in den Jahren 1995 und 1996 im Rahmen der Aktivitäten einer ad-hoc Arbeitsgruppe der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (ADV), an der neben den Vertretern der Verkehrsflughäfen auch solche der Lufthansa, des BMV, des UBA und des

DLR beteiligt waren. Ein entsprechender Ergänzungsvorschlag, der den aktuellen Kenntnisstand widerspiegelt, liegt den zuständigen Bundesbehörden derzeit vor.

Um eine vollständige Fluglärmrechnung durchführen zu können, sind noch Informationen über die Lage der Start- und Landebahnen, die Flugstreckenführung und das Flugverkehrsaufkommen zu berücksichtigen. Alle diese Unterlagen sind in einem *Datenerfassungssystem* DES zusammenzustellen. Das Format des DES ist ebenfalls im GMBI 26, Nr.8 [22] in eindeutiger Form beschrieben und gewährleistet, zusammen mit der streng definierten Rechenvorschrift der AzB, einen hohen Grad an Reproduzierbarkeit bei der Ermittlung von Lärmschutzbereichen.

6.2. Aktuell diskutierte Problemstellungen

6.2.1. Allgemeines

Das Fluglärmgesetz ist in den letzten Jahren in vielfältiger Form kritisiert und teilweise sogar hinsichtlich seiner Verfassungskonformität angezweifelt worden. In den folgenden Abschnitten werden einige der z.Z. in Bezug auf das Fluglärmproblem diskutierten Probleme angeschnitten und kommentiert.

Einige dieser Probleme betreffen rechtliche oder medizinische bzw. sozialpsychologische Aspekte und können daher in einer physikalisch orientierten Abhandlung wie der vorliegenden nicht bewertet werden.

6.2.2. Wechsel des Bewertungsmaßes

Derzeit wird die Eignung des im Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm vorgeschriebenen äquivalenten Dauerschallpegels mit dem Halbierungsparameter $q = 4$ von vielen Seiten angezweifelt. Es wird in der Regel auf Bewertungsmaße mit dem Halbierungsparameter $q = 3$ verwiesen. Dabei werden im wesentlichen folgende Argumente vorgebracht:

- *Ein Halbierungsparameter von 3 ist angebrachter, da er die Störwirkung besser beschreibt als ein Halbierungsparameter von 4.*

Hierzu muß angemerkt werden, daß (unabhängig vom Halbierungsparameter) die verschiedenen Formen von äquivalenten Dauerschallpegeln hochgradig korreliert und mit guter Näherung ineinander umrechenbar sind (siehe Kapitel 2 und Anhang). Sie sind hinsichtlich ihrer

Eignung zur Beschreibung der Störwirkung daher als gleichwertig zu betrachten. Es ist jedoch bei einem Wechsel zwischen derartigen Bewertungsmaßen zu berücksichtigen, daß die für Gesetzgebung oder Planung benutzten Grenzwerte in geeigneter Weise ineinander umgerechnet werden.

Weltweit ist ein Halbierungsparameter von 3 der gebräuchliche Wert. Auch in der EU besteht die Tendenz, einen energieäquivalenten Dauerschallpegel mit Wichtung für 3 Tagesperioden als Standard zur Beschreibung von Fluglärm (und anderen Lärmarten) zu definieren [21].

Eine weitere Begründung zum Wechsel des Bewertungsmaßes bezieht sich auf die Ermittlung einer kumulativen Lärmbelastung:

- *Bei Verwendung eines Halbierungsparameters von 3 ist es einfacher, eine kumulative Belastung aus Fluglärm und anderen Lärmarten (Verkehrs-, Schienen- oder Industrielärm) zu ermitteln.*

Die Ermittlung einer kumulativen Belastung durch verschiedene Lärmarten auf der Basis von äquivalenten Dauerschallpegeln ist natürlich einfacher, wenn immer das gleiche Bewertungsmaß zugrunde gelegt wird (z.B. in Form des Beurteilungspegels nach DIN 45643 [11] oder 45645 [10]). Da die verschiedenen Formen von äquivalenten Dauerschallpegeln aber untereinander gut korrelieren, wäre es prinzipiell sogar ohne weiteres möglich, derartige kumulative Belastungswerte auch (mit geeigneten Wichtungsfaktoren) aus unterschiedlichen Mittelungspegeln zu bestimmen. Es fragt sich allerdings, ob es sinnvoll ist, Fluglärm mit anderen Lärmarten zu einem kumulativen Wert zu verrechnen, denn:

- Fluglärm unterscheidet sich aufgrund seines intermittierenden Charakters wesentlich von anderen Lärmarten. Er wird insbesondere durch hohe Einzelereignispegel charakterisiert, die bei der Ermittlung eines äquivalenten Dauerschallpegels diesen dominieren können. Es besteht daher die Gefahr, daß bei der Ermittlung einer kumulativen Belastung Beiträge von anderen Lärmarten mit unterschiedlicher Charakteristik nicht adäquat berücksichtigt werden. Insbesondere ist es möglich, daß das Hinzufügen einer nicht unbeträchtlichen Anzahl von Verkehrs- oder Industriegerauschen den Gesamt- L_{eq} nur unwesentlich anhebt, hinsichtlich der Störwirkung möglicherweise jedoch nicht vernachlässigbar ist (Frage der Vorbelastung durch diese Lärmarten).
- Bei der Behandlung von Fluglärm in der derzeitigen Form sind planungsrechtliche Vorgehensweisen klar definiert. Bei einer kumulativen Betrachtungsweise wäre zunächst die Vorbelastung durch andere Lärmarten zu ermitteln und zu bewerten, inwieweit sie planungsrelevant ist. Daraus resultiert u.a. die Frage, wer bei einer vorgegebenen Situation in welchem Umfang entschädigungspflichtig ist.

In diesem Zusammenhang muß auf die von der Working Group 1 zur EU Future Noise Policy ausgesprochene Warnung bezüglich der Ermittlung von kumulierten Bewertungsmaßen hingewiesen werden (s. Abschnitt 2.4.). Auch in DIN 18005 [36] wird für Verkehrs-, Industrie-, Gewerbe- und Freizeitlärm — aufgrund der unterschiedlichen Einstellung der Betroffenen — empfohlen, die Beurteilungspegel für diese Geräuscharten nicht zu kumulieren.

6.2.3. Die Situation der Lärmwirkungsforschung

Bevor irgendein Kriterium zur Bewertung von Fluglärm definiert werden kann, muß eine medizinische und sozialpsychologische Grundlage geschaffen werden. Hier bestehen derzeit in Deutschland gravierende Defizite:

- Es wurden seit der DFG-Studie aus dem Jahre 1974 [13] auf nationaler Ebene keine umfassenden Untersuchungen (insbesondere interdisziplinärer Natur) zum Thema Fluglärmwirkungen durchgeführt. Die derzeit von Medizinern und Sozialpsychologen veröffentlichten Arbeiten basieren zum Teil auf den Resultaten internationaler Untersuchungen. Hier wirft sich die Frage auf, wie repräsentativ die Resultate von Felduntersuchungen aus dem Ausland überhaupt für deutsche Gegebenheiten sind.
- Die derzeit von deutschen Lärmwirkungsforschern geforderten Kriterien zur Bewertung von Fluglärm sind in einigen Bereichen widersprüchlich, obwohl sie zum Teil aus identischen Eingangsdaten abgeleitet sind. Solange sich auf diesem Wissenschaftsgebiet nicht standardisierte, sinnvolle Test- und Auswertemethoden durchgesetzt haben, können die erhaltenen Resultate keine Basis zur Festlegung geeigneter Grenz- oder Richtwerte bieten. Insbesondere ist eine engere, von Konkurrenzdenken freie Kooperation notwendig — nur so können Synergieeffekte genutzt werden.

Eine gute Basis für vermehrte Forschungsaktivitäten in diesem Bereich dürfte das nationale Verbundprogramm “*Leiser Verkehr*” sein, das derzeit anläuft. Im Rahmen dieses Programms wurde u.a. auch ein Arbeitsschwerpunkt definiert, der sich mit Problemen der Lärmwirkungsforschung befaßt. Im Zusammenhang mit diesem Verbundvorhaben steht auch das im folgenden Abschnitt erwähnte DLR-Projekt “*Leiser Flugverkehr*”.

6.2.4. Berücksichtigung des nächtlichen Fluglärms

Die nächtliche Belastung durch Fluglärm wird vom Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm — falls eine erhebliche Zahl von Störungen vorliegt — nicht hinreichend berücksichtigt: Zum einen definiert das Fluglärmgesetz kein reines Bewertungskriterium für die Nacht, sondern nur ein Mischkriterium, in das nächtliche Bewegungen mit einem Wichtungsfaktor von 5 eingehen. Zum anderen handelt es sich beim $L_{eq(4,FLG)}$ um einen Mittelungspegel, der die durch Nachtflüge hervorgerufenen charakteristischen Störwirkungen (insbesondere Aufweckreaktionen) zwangsläufig nicht berücksichtigen kann. Derartige Reaktionen können z.B. durch Schwellenwertkriterien, wie sie im Kapitel 2 beschrieben und diskutiert wurden, berücksichtigt werden.

Ob Schwellenwertkriterien als alleiniges Bewertungsmaß zur Beschreibung der nächtlichen Lärmbelastung ausreichen, ist noch nicht geklärt. Insbesondere bei hohem nächtlichen Luftverkehrsaufkommen (wie z.B. in Frankfurt) könnten energetische Betrachtungen in Form von Mittelungspegeln durchaus ihren Sinn haben. Es wäre zu überlegen, ob eine Änderung der Wichtungsfaktoren für den Fall B des $L_{eq(4,FLG)}$ sinnvoll ist (z.B. in Hinblick auf die Definition dieses Falles als reinen Nacht- L_{EQ}). Hier ist allerdings noch vermehrt Grundlagenarbeit zu leisten.

Einen ersten Ansatz hierzu bietet das DLR-Projekt *“Leiser Flugverkehr”*. Im Rahmen dieses interdisziplinär orientierten Projekts soll u.a. ein wissenschaftlich fundiertes Nachtfluglärmkriterium erarbeitet werden. Dieses soll einerseits zur Objektivierung humanspezifischer Reaktionen — und damit zu einer Versachlichung der Diskussionen zum Thema Nachtfluglärm — beitragen, andererseits aber auch als Grundlage und Orientierungshilfe für Maßnahmen jeglicher Art zur Minderung von Fluglärm dienen. Zur Erreichung dieses Ziels werden repräsentative Labor- und Feldstudien mit insgesamt mehr als 1500 Probandennächten durchgeführt. Studien in diesem Umfang — die für eine sinnvolle Definition eines Nachtfluglärmkriteriums notwendig sind — liegen derzeit nicht vor. Basierend auf den Ergebnissen von 3 Studien unter kontrollierten, aber realitätsnahen Laborbedingungen sollen zunächst die wesentlichen Grundlagen zur Definition eines Bewertungskriteriums für Nachtfluglärm herausgearbeitet werden. Dieses Kriterium soll anschließend in einer entsprechend umfangreichen Feldstudie in der Umgebung eines Flughafens mit erheblichem Nachtflugverkehr validiert werden.

6.2.5. Die Behandlung von Richt- und Grenzwerten

Sinnvolle Grenzwerte für Fluglärm (und natürlich auch für andere Lärmarten) können nur auf der Basis von aus der Lärmwirkungsforschung erhaltenen Resultaten definiert werden. Diese sollten — wie im vorangegangenen Abschnitt angedeutet — repräsentativ für deutsche Verhältnisse sein.

Es wird derzeit vielfach gefordert, die im Fluglärmgesetz vorgeschriebenen $L_{eq(4,FLG)}$ -Werte für die beiden Schutzzonen des Lärmschutzbereiches neu festzulegen, wobei Grenzwerte von 60 oder 62 dB für die Schutzzone 2 (bisher 67 dB) im Gespräch sind. Eine derartige Änderung der Grenzwerte ist eine Entscheidung, die zwar im wesentlichen von politischen und finanziellen Aspekte beeinflusst wird, die jedoch sinnvollerweise durch neuere Erkenntnisse aus der Lärmwirkungsforschung gestützt sein sollte. So ist u.a. die Frage zu klären, wie (oder ob) sich die Sensibilität der betroffenen Bevölkerung gegenüber dem Fluglärm in den letzten zwei Jahrzehnten geändert hat.

Prinzipiell ist eine Herabsetzung der Grenzwerte nicht abzulehnen. Insbesondere an kleineren zivilen Flughäfen kann der Schutzzone 1 keine praktische Bedeutung mehr beigemessen werden. Sie verläuft hier in der Regel innerhalb des Flughafengeländes oder kann überhaupt nicht mehr ermittelt werden. Erweiterte Lärmschutzbereiche, z.B. auf der Grundlage der im Rahmen der Lärmschutzbereichsberechnung zusätzlich ermittelten 62 dB-Kontur, existieren ohnehin an den meisten Verkehrsflughäfen, teils auf der Basis freiwilliger Leistungen der Flughafenbetreiber, teils auf der Grundlage von landesrechtlichen Regelungen.

Eine weitere in sachgerechter Weise nicht einfach durchzuführende — in Deutschland aber häufig vorgeschlagene — Vorgehensweise ist die Übernahme von existierenden, für andere Lärmarten definierten Grenzwerten (wie z.B. von Verkehrslärmgrenzwerten) für Fluglärm. Wenn überhaupt in dieser Form vorgegangen werden soll, sind folgende grundlegende Voraussetzungen zu beachten:

- Es muß gewährleistet sein, daß die Geräuschart für die der zu übernehmende Grenzwert definiert ist, vergleichbare Störwirkung zeigt wie die Geräuschart, für die der Grenzwert übernommen werden soll.
- Grenzwerte können prinzipiell nur dann übernommen werden, wenn sie für das gleiche Bewertungsmaß definiert sind.

Ein Aspekt, dem in diesem Zusammenhang auch Beachtung geschenkt werden sollte, ist die Vermischung von Grenzwerten und Richt- bzw. Orientierungswerten. So wird oft gefordert, die Orientierungswerte der DIN 18005 [36] oder die Immissionsrichtwerte nach VDI 2058 [37]

als Grenzwerte für Fluglärm zu übernehmen. Das ist sachlich nicht korrekt: Orientierungs- bzw. Richtwerte sind per definitionem keine Grenzwerte. In VDI 2058 wird dies in folgender Weise ausgeführt:

“... Allgemeingültige Grenzwerte für die Lärmeinwirkung auf die Nachbarschaft lassen sich daher nicht aufstellen. Dementsprechend sind die in dieser Richtlinie genannten Zahlenwerte nur als Richtwerte aufzufassen. In Sonderfällen kann somit eine Abweichung von diesen Werte gerechtfertigt sein.”

Richt- bzw. Orientierungswerte sind häufig bewußt sehr niedrig angesetzt — Beurteilungspegel von 35 oder 40 dB wie in der DIN 18005 werden schon merklich durch die normalen Hintergrundgeräusche beeinflusst und können durch wenige laute Geräusche erreicht werden. In Bezug auf die Beurteilung der Störwirkung von Geräuschen mit stark intermittierendem Charakter ist ihre Aussagekraft wohl eher begrenzt. Schreiber macht im Rahmen einer Kommentierung des Entwurfs der DIN 18005 [38] hierzu folgende Anmerkung:

“Ein äquivalenter Dauerschallpegel (Mittelungspegel) von 35 und 40 dB(A) wie er für reine und allgemeine Wohngebiete für die Nacht genannt wird, bedeutet im Mittel schon fast Stille. Er wird auch in Gebieten völlig abseits vom Verkehr nur unterschritten, so lange kein Wind in den Bäumen und kein naher Bach rauscht, wenn kein Regen fällt, keine Vögel singen, keine Frösche quaken und kein Hund bellt.”

Auch Berglund und Lindvall geben im einem für die Weltgesundheitsorganisation (WHO) erarbeiteten Dokument [39] extrem niedrige Richtwerte von 30 dB im energieäquivalenten Dauerschallpegel bzw. 45 dB im A-bewerteten Maximalschallpegel an. Diese Werte sollten allerdings im Zusammenhang mit dem ersten Satz der Präambel der Gründungsakte der WHO gesehen werden:

“Unter Gesundheit ist nicht nur das Freisein von Krankheiten zu verstehen, sondern ein Zustand vollkommenen physischen, psychischen und sozialen Wohlbefindens.”

Unter diesem Gesichtspunkt sind die oben zitierten Werte als idealisierte Zielvorstellungen zwar brauchbar, lassen sich aber in der Realität praktisch nicht einhalten.

Es besteht weiterhin die Tendenz, Grenz-, Richt- oder Orientierungswerte losgelöst von ihrer spezifischen Definition zu betrachten und lediglich mit den reinen Zahlenwerten zu operieren. Dies ist vollkommen unsachgemäß und dient oft nur der Polemik und zur Emotionalisierung.

6.2.6. Ziviler und militärischer Fluglärm

Derzeit wird ziviler Fluglärm nach dem Fluglärmgesetz genauso behandelt wie militärischer Fluglärm. Dies betrifft sowohl die Berechnungsmethodik nach dem AzB-Verfahren als auch die Höhe der definierten Grenzwerte.

Aus physikalischer Sicht unterscheidet sich militärischer von zivilem Fluglärm insbesondere durch höhere Maximalpegel, ton- und impulshaltige Komponenten, kürzere Pegelan- und abstiegszeiten und stärker intermittierenden Charakter. Außerdem sind die Überflughöhen tendenziell geringer, und die Flugwege unterliegen nicht so starken Einschränkungen wie im zivilen Bereich. Dies macht das Auftreten von Lärmereignissen für den Betroffenen weniger abschätzbar und kann vor allem in Bereichen, in denen in geringen Flughöhen operiert wird und in denen daher schnelle Pegeländerungen zu erwarten sind, möglicherweise zu einer von vornherein negativeren Grundeinstellung führen als bei zivilem Fluglärm.

Es wird daher vielfach gefordert, hier eine Trennung vorzunehmen. Eine derartige Forderung kann sich auf unterschiedliche Berechnungsverfahren, unterschiedliche Grenzwerte oder auch auf beides beziehen. Hierzu folgende Anmerkungen:

- Ein unterschiedliches Berechnungsverfahren für zivilen und militärischen Fluglärm ist prinzipiell nicht notwendig — die AzB beruht auf einem physikalischen Modell der Schallquelle Flugzeug und auf Gesetzmäßigkeiten zur Schallausbreitung. Es wäre allerdings denkbar, eine Erweiterung zur Berücksichtigung tonaler und impulshaltiger Komponenten (die bei militärischem Fluglärm im Gegensatz zum zivilen Fluglärm oft nicht vernachlässigbar sind) einzuführen (s.a. Kapitel 7). Dies betrifft auch die Beschreibung des durch Hubschrauber erzeugten Lärms, dem im militärischen Bereich wesentlich mehr Bedeutung zugemessen werden muß als im zivilen Bereich.
- Die Definition von Grenzwerten sollte (wie schon weiter oben erwähnt) auf der Basis von Erkenntnissen der Lärmwirkungsforschung erfolgen. Hier spielen nicht allein die rein physikalischen Kenngrößen eine Rolle — obwohl sie auch im lärmmedizinischen Bereich von Bedeutung sein dürften —, sondern auch psychologische Einflüsse wie eine unterschiedliche Grundeinstellung (z.B. Notwendigkeit des zivilen/militärischen Luftverkehrs aus der Sicht des Betroffenen).

6.3. Novellierung des Fluglärmsgesetzes

Nach der langjährigen Diskussion der Fluglärmproblematik wurden im Jahr 1997 Anträge zu einer Novellierung des Fluglärmsgesetzes und zur Verbesserung des Schutzes vor Fluglärm gestellt. Im November des gleichen Jahres folgte zu diesen Anträgen eine Anhörung im Verkehrsausschuß des Bundestages. Im Oktober 1998 wurde eine Beschlußempfehlung des Verkehrsausschusses an den Bundestag veröffentlicht, beide Anträge abzulehnen [35]. Gleichzeitig wurde jedoch empfohlen, die Bundesregierung aufzufordern:

“..... das Ergebnis der Anhörung eingehend zu analysieren und dem Bundestag zu Beginn der nächsten Legislaturperiode Vorschläge für Verbesserungen im Bereich des Schutzes vor Fluglärm vorzulegen. Dabei sollten insbesondere folgende Ziele verfolgt werden:

- *Modernisierung des Berechnungsverfahrens bei größtmöglicher Harmonisierung mit den Verfahren in anderen Bereichen*
- *Verbesserung des Gesamtschutzniveaus (Zumutbarkeitsgrenzen, Schutzzonen, Schutzauflagen, Eingriffsschwellen, Bewertungsverfahren)*
- *Stärkere Gewichtung von Lärmereignissen in empfindlichen Zeiten (Nachtlärmproblematik)*
- *Bewertung des zivilen und militärischen Flugverkehrs*
- *Bürgerbeteiligung.”*

Diese Ziele spiegeln die in den vorangegangenen Abschnitten diskutierten Problematiken wieder. Allerdings muß nach dem Regierungswechsel im Oktober 1998 möglicherweise von geänderten Voraussetzungen bezüglich der zukünftigen politischen Aktivitäten und Zielsetzungen zum Schutz vor Fluglärm ausgegangen werden.

Nichtsdestoweniger werden — insbesondere im Bereich der Bewertung und Beurteilung sowie der Definition von Grenzwerten — in Zukunft beträchtliche Anstrengungen und eine enge Kooperation zwischen Wissenschaft und Forschung, Politik, Wirtschaft und nicht zuletzt den Betroffenen notwendig sein, um den Schutz der Bevölkerung vor Fluglärm zu verbessern.

Möglichkeiten zur Modernisierung des Berechnungsverfahrens sollen im folgenden Kapitel aufgezeigt werden. Dazu wird hauptsächlich auf den im Kapitel 3 gewonnenen Erkenntnissen aufgebaut.

7. Überarbeitungsmöglichkeiten der AzB

7.1. Modifikationen am bestehenden AzB-Verfahren

Das AzB-Berechnungsverfahren beruht auf einem relativ einfachen Modell, das bei seiner Erarbeitung vor allem durch die seinerzeit zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten und verfügbaren Daten bestimmt wurde. Es stellt also ein klassisches konventionelles Berechnungsverfahren dar. Dies wurde im Abschnitt 3 schon ausführlich diskutiert. Nichtsdestoweniger berücksichtigt es die wesentlichen physikalischen Einflüsse. Die Praxis im Umgang mit dem AzB-Verfahren hat gezeigt, daß sich mit einem derartigen recht einfachen Modell — sofern nur die Eingabedaten sorgfältig gewählt werden — durchaus eine hohe globale Genauigkeit erreichen läßt. Hier sei auf die im Abschnitt 4 gemachten Ausführungen verwiesen, die sich mit dem Aspekt der Genauigkeit auseinandersetzen.

Die AzB wurde seinerzeit gemäß den durch das Fluglärmgesetz gestellten Anforderungen konzipiert: Sie stellt ein Werkzeug zur Ermittlung der mittleren, längerfristigen Lärmbelastung — ausgedrückt durch den äquivalenten Dauerschallpegel — dar. Nicht geeignet ist die AzB (wie jedes konventionelle Verfahren) zur Beschreibung einzelner Schallereignisse. Das war allerdings auch nicht die Zielsetzung bei ihrer Erarbeitung. Nichtsdestoweniger wird sie gerade zu diesem Zweck häufig mißbraucht. Man kann jedoch sagen, daß die in den letzten zwei Jahrzehnten gemachten Erfahrungen mit der AzB generell als positiv zu beurteilen sind: Die AzB stellt ein einfach handhabbares und eindeutig definiertes Werkzeug zur Fluglärm-berechnung dar, das auch Vergleiche im internationalen Umfeld nicht zu scheuen braucht. Dies wurde auch im Rahmen der Arbeiten am Task MODEL 1 deutlich.

Im folgenden sollen die Vorteile des AzB-Verfahrens sowie potentielle Verbesserungsmöglichkeiten beschrieben werden. Folgende positiven Aspekte sind hervorzuheben:

- Mit dem AzB-Verfahren ist die Ermittlung praktisch eines jeden in der Praxis vorkommenden Fluglärmdeskriptors sowie anderer Bewertungskriterien (z.B. Schwellwertkriterien, wie sie zur Bewertung des nächtlichen Fluglärms benutzt werden) möglich. Die Grundstruktur von Rechenverfahren und Datengrundlage muß dazu nicht geändert werden. Dies beruht zum einen darauf, daß in der AzB die Quellbeschreibung und die Beschreibung von Ausbreitungseffekten auf spektraler Basis erfolgt. Somit sind prinzipiell beliebige Frequenzbewertungen möglich. Außerdem werden Maximalschallpegel und Geräuschkdauer separat berechnet. All dies hat sich im Umgang mit der AzB als sehr vorteilhaft erwiesen.

- Aufgrund der klar definierten Rechenvorschrift der AzB und der im DES streng vorgegebenen Datenformate sind nach dem AzB-Verfahren ermittelte Ergebnisse sehr gut reproduzierbar und daher als Grundlage planungsrechtlicher Entscheidungen geeignet.
- Die AzB ist sehr gut auf die Behandlung prognostizierter Flugbetriebsszenarien zugeschnitten: Sie basiert auf einer einfachen Form der Flugstreckenbeschreibung sowie auf einer überschaubaren Flugzeuggruppeneinteilung. Die Erfahrungen in der Praxis haben gezeigt, daß diese Voraussetzungen notwendig sind, um die für eine Immissionsberechnung benötigten Flugbetriebsprognosen in handhabbarer Weise erstellen zu können.

Im Prinzip könnte die AzB (wie alle derzeit gebräuchlichen Rechenverfahren) jedoch in einigen Punkten verbessert werden. Diese wurden im wesentlichen schon im Abschnitt 3 diskutiert und sollen hier noch einmal zusammengefaßt werden:

- (1) Derzeit basiert die akustische Datengrundlage der AzB auf einem Satz von Oktavspektren und (ebenfalls oktavbandbezogenen) sog. *Richtungsfaktoren*. Hier wäre ein Übergang zu Terzspekten denkbar. Dadurch ergäbe sich die Möglichkeit, neben beliebigen Frequenzbewertungen auch Tonkorrekturen (wie sie z.B. bei der Ermittlung des *PNLT* nach [8] definiert sind) in das Berechnungsverfahren mit einzubeziehen.
- (2) In der AzB ist derzeit die Verwendung des Äquivalenzparameters $k = 13.3$ festgeschrieben. Hier könnten optional auch andere Werte zugelassen werden. Dies wäre in Hinblick auf einen möglicherweise durch EU-Vorgaben notwendigen Wechsel des Bewertungsmaßes [21] sinnvoll.
- (3) Derzeit werden die 24 Tagesstunden in eine Tages- und eine Nachtperiode zerlegt. Eine Erweiterung auf Tagesrandzeiten (also z.B. wie beim L_{DEN}) wäre — ebenfalls im Hinblick auf einen Wechsel des Bewertungsmaßes — vorteilhaft. Dazu müßte das DES-Format entsprechend erweitert werden.
- (4) Die für die Ermittlung der Geräuschkdauer benötigten Koeffizienten a und b nach Gl.(3-1) sollten flugzeuggruppenspezifisch für An- und Abflüge separat definiert werden. Dies ist in dem derzeit den zuständigen Bundesbehörden vorliegenden Ergänzungsvorschlag schon vorgesehen.
- (5) Die Berechnungsvorschrift sollte dahingehend erweitert werden, daß auch die Ermittlung von Schwellenwertkriterien in eindeutiger Weise beschrieben wird.
- (6) Forderung (5) impliziert, daß typenspezifische Pegelverteilungen berücksichtigt werden müssen (siehe Abschnitt 3.2.9). Dies würde die Einführung eines zusätzlichen Parameters (nämlich der Standardabweichung der typenspezifischen Normalverteilung)

in die Datenblätter erfordern. Außerdem müßte die Beschreibung des Rechenalgorithmus um die Anwendung derartiger Verteilungen ergänzt werden.

- (7) Das Prinzip der Einflußbereiche führt — wie im Abschnitt 3.2.4 erläutert — häufig zu Unstetigkeitsstellen im Verlauf der ermittelten Lärmkonturen. Dies könnte vermieden werden, wenn man statt dessen einen Algorithmus verwendet, der sich an dem im INM benutzten anlehnt. Dies würde die folgenden Forderungen implizieren:

- Flugstrecken sollten durchweg durch eine Folge von geraden Teilstücken beschrieben werden. Dies bedeutet, daß kreisbogenförmige Segmente in eine geeignete Anzahl von Sekanten zerlegt werden. Wie diese Zerlegung durchzuführen ist, muß in der Rechenvorschrift definiert werden. Die Form des DES kann dabei unangetastet bleiben.
- Alle Teilstücke einer Flugstrecke tragen dann zur Immissionsberechnung an einem vorgegebenen Immissionsort bei.

Diese Forderung würde die Erarbeitung eines Algorithmus erfordern, der dem in Abschnitt 3.2.5 beschriebenen *Noise-Fraction-Algorithmus* ähnelt. Im Prinzip wäre hierzu eine Korrektur an der Geräuschkdauerformel anzubringen.

- (8) Analog zu vielen gebräuchlichen Verfahren könnte eine Modellierung der Richtwirkung für Bereiche hinter dem Startpunkt eingearbeitet werden.
- (9) Es könnte eine Erweiterung bezüglich der Einbeziehung der Topographie erfolgen. Dies würde sich lediglich bei der Berechnung der Ausbreitungsentfernung in Form eines zusätzlich benötigten Parameter für die Höhe des Immissionsortes niederschlagen. Allerdings müßten hier Vorgaben für eine definierte Beschreibung der Topographie im DES erfolgen.

Lediglich die Forderung nach der Aufgabe des Prinzips der Einflußbereiche würde eine wesentliche Änderung der Struktur des AzB-Verfahrens bedeuten. Alle anderen Forderungen würden sich hauptsächlich hinsichtlich einer Erweiterung der Datengrundlage auswirken. Nichtsdestoweniger erfordern auch sie teilweise einen nicht unbeträchtlichen Forschungsaufwand.

Die lokale Rechengenauigkeit dürfte sich durch diese Modifikationen erhöhen. Eine wesentliche Erhöhung der globalen Genauigkeit dürfte allerdings nicht zu erwarten sein, da sich an den Annahmen über die dem Verfahren zugrunde liegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten nichts ändern würde. Dies bedeutet jedoch auch, daß eine globale Vergleichbarkeit zu den mit einem unmodifizierten Verfahren gewonnenen Rechenergebnissen gewährleistet ist. Dies wäre unter Berücksichtigung planerischer Aspekte von Vorteil.

Notwendig ist allerdings auf jeden Fall eine regelmäßige Überarbeitung der Datengrundlage, da deren Qualität die Genauigkeit der Rechenergebnisse wesentlich stärker als das Rechenverfahren selbst bestimmt. Dies haben die Ergebnisse der im Auftrag des BMV durchgeführten vergleichenden Untersuchungen zum Integrated Noise Model [25] und auch die im Rahmen von MODEL 1 gewonnenen Erkenntnisse gezeigt. Derartige Überarbeitungen können z.B. in regelmäßigen Intervallen stattfinden, sollten aber spätestens dann durchgeführt werden, wenn wesentliche Änderungen im Flugzeugtypenmix eingetreten oder zu erwarten sind.

7.2. Integration von bodengebundenem Verkehr in die AzB

Die AzB in ihrer derzeitigen Form ist nur auf die Berechnung von Lärm ausgelegt, der durch den fliegenden Verkehr erzeugt wird. In der Praxis wird aber zunehmend gefordert, auch die durch Rollvorgänge, Standläufe und den Betrieb von Hilfsaggregaten erzeugten Lärm mit einzubeziehen. Derzeit wird der durch derartige Betriebsvorgänge erzeugte Lärm fast durchweg mit Verfahren ermittelt, die ursprünglich zur Beschreibung von Verkehrs- oder Industrielärm ausgelegt waren.

Eine Erweiterung der AzB bezüglich der Berücksichtigung von bodengebundenem Verkehr ist prinzipiell möglich — die physikalischen Gesetzmäßigkeiten auf denen die AzB beruht sind unabhängig von der Art der Schallquelle. Allerdings würde dies einen wesentlich gravierenderen Eingriff erfordern als die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Modifikationen. Prinzipiell müßte folgendermaßen vorgegangen werden:

- Es müßten geeignete Datensätze im AzB-Format für die Betriebszustände Rollen, Betrieb von Hilfsaggregaten und Standlauf definiert und validiert werden. Dies erfordert lediglich eine mehr oder weniger umfangreiche Datenerfassung.
- Die Beschreibung von An- und Abrollwegen müßte im DES verankert werden.
- Es müßte ein geeigneter Algorithmus für die Modellierung von Standläufen und Betrieb von Hilfstriebwerken auf den Abstellpositionen erarbeitet werden. Dies bedeutet im Prinzip die Beschreibung von Punkt- und Flächenschallquellen. Das wäre auf der Basis des bestehenden AzB-Regelwerks aber ohne Probleme machbar.
- Bei der Einbeziehung von bodengebundenen Operationen müssen zwangsläufig die Effekte von Abschirmung und Bebauung mit einbezogen werden. Wenn die derzeit geforderte Reproduzierbarkeit von Berechnungen aufrecht erhalten werden soll, erfordert dies zum einen die Erweiterung des DES um die Komponente Bebauung, zum anderen eine geeignete Erweiterung des eigentlichen Berechnungsalgorithmus der AzB

Alle diesen Anforderungen würden eine nicht unbeträchtlichen Arbeitsaufwand erfordern, wengleich schon auf Erfahrungen und Regelwerke zur Berechnung der Lärmimmission durch Industrieanlagen und Verkehr zurückgegriffen werden kann.

7.3. Simulationsverfahren als Alternative

In Anbetracht der derzeitigen Entwicklung in der Rechnertechnik kann der Einsatz von Simulationsverfahren zur Berechnung von Fluglärm durchaus ins Auge gefaßt werden. Vor- und Nachteile derartiger Verfahren wurden schon im Kapitel 3 diskutiert.

Das wesentliche Problem stellt nach wie vor die Verfügbarkeit von akustischen Basisdaten in hoher Qualität und weitgehendem Umfang dar. Sollte dieses Problem gelöst werden können — was bei ausreichendem Einsatz von Personal und Sachmitteln prinzipiell keine Schwierigkeit darstellt — so stände einem derartigen Einsatz nichts im Wege. Ob das Datenproblem in der Praxis aber tatsächlich gelöst werden kann, ist allerdings noch dahingestellt.

Es wäre auch eine Umstellung auf ein vereinfachtes Simulationsverfahren denkbar, das auf einer begrenzten, auf den derzeit verfügbaren Daten aufsetzenden Datengrundlage basieren könnte. Hier würden die Effekte der Richtcharakteristik eher pauschal in das Modell eingehen. Nichtsdestoweniger wären bei einem derartigen Modell die in Kapitel 3 beschriebenen Problemfelder im AzB-Verfahren ausgeräumt. Das DLR wird sich in den kommenden Jahren mit dieser Problemstellung im Rahmen des Projekts “Leiser Flugverkehr” intensiv auseinandersetzen.

Soll ein Simulationsverfahren in der Praxis eingesetzt werden, so gilt allerdings auf jeden Fall die Forderung, daß die zugrunde liegenden Rechenregeln in eindeutiger und reproduzierbarer Weise wie in der AzB niedergelegt werden können müssen. Dies gilt in gleicher Weise für die Form und den Inhalt der zugehörigen Datengrundlage.

8. Literatur

- [1] International Electrotechnical Commission (IEC): Sound level meters. IEC Publication 651 (1979).
- [2] International Electrotechnical Commission (IEC): Frequency weighting for the measurement of aircraft noise (D-weighting). IEC Publication 537 (1976).
- [3] International Organization for Standardization (ISO): Acoustics — Normal equal-loudness level contours. ISO 226 (1987).
- [4] Zwicker, E.: Psychoakustik. Berlin, Springer (1982)
- [5] International Organization for Standardization (ISO): Acoustics — Method for calculating loudness level. ISO 532 (1975).
- [6] Zwicker, E.; Fastl, H.: A portable loudness meter based on ISO 532B. In: Proceedings of the 11th International Congress in Acoustics, 8, 135—137. Paris (1983)
- [7] Kryter, K.D.: The effects of noise on man. 2nd Edition, Orlando, Academic Press (1985)
- [8] International Organization for Standardization (ISO): Acoustics - Procedure for describing aircraft noise heard on the ground. International Standard ISO 3891 (1978).
- [9] International Civil Aviation Organization (ICAO): International standards and recommended practices — environmental protection. Annex 16 to the convention on international civil aviation. Vol.1, Aircraft noise. 2nd Edition (1988).
- [10] Deutsches Institut für Normung (DIN): Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen. Teil 1: Geräuschmissionen in der Nachbarschaft. DIN 45645 (Juli 1996).
- [11] Deutsches Institut für Normung (DIN): Messung und Beurteilung von Flugzeuggeräuschen. DIN 45643 (Oktober 1984).
- [12] Deutsches Institut für Normung (DIN): Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschmissionen. Entwurf DIN 45681 (Januar 1992).
- [13] Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG): Fluglärmwirkungen. Bonn-Bad Godesberg (1974)
- [14] Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm. Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr.28, S. 282–287 (1971).
- [15] International Civil Aviation Organization (ICAO): Recommended method for computing noise contours around airports. ICAO Circular 205-AN/1/25 (1988).
- [16] Deutsches Institut für Normung (DIN): Schallschutz im Hochbau. DIN 4109 (November 1989).

- [17] Jansen, G.; Linnemeier, A.; Nitsche, M.: Methodenkritische Überlegungen und Empfehlungen zur Bewertung von Nachtfluglärm. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 42, 91–106 (1995).
- [18] Scheeper, P.; Poutsma, H.J.; Roozema, D.J.: Voorschrift voor de berekening van de geluidsbelasting door vliegtuigen. Interdepartementale Commissie Geluidhinder, Rep. LL-HR-20-01 (1980).
- [19] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen. Richtlinie 2719 (August 1987).
- [20] Griefahn, B.: Präventivmedizinische Vorschläge für den nächtlichen Schallschutz. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 37, 7–14 (1990)
- [21] Commission of European Communities, Directorate-General XI, working group on noise indicators: Position paper on EU noise indicators (April 1999).
- [22] Der Bundesminister des Innern: Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen an zivilen und militärischen Flugplätzen nach dem Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm vom 30.3.1971. GMBI 26, Ausgabe A, S. 162-227 (1975).
- [23] Der Bundesminister des Innern: Ergänzung der Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen an zivilen und militärischen Flugplätzen –AzB– vom 27.2.1975. Bonn, 20.2.1984.
- [24] Federal Aviation Administration (FAA): Integrated Noise Model (INM) Version 5.1 user's guide. Report Nr.FAA-AEE-96-02 (Dezember 1996).
- [25] Isermann, U.; Schmid, R.: Untersuchungen mit dem Integrated Noise Model. Im Auftrag des Bundesministers für Verkehr. FE-Nr. L-1/95-50135/95, Göttingen (1996).
- [26] Matschat, K.; Müller, E.-A.: Effektivpegel und Geräuschkdauer bei Flugzeugvorbeiflügen. Festschrift zum 100jährigen Bestehen der Versuchs- und Forschungsanstalt Wien (Mai 1978).
- [27] Federal Aviation Administration (FAA): Integrated Noise Model (INM) Version 5.1 technical manual. Report Nr.FAA-AEE-97-04 (Dezember 1997).
- [28] European Civil Aviation Conference (ECAC): Report on standard method of computing noise contours around civil airports. ECAC.CEAC Doc.29, 2nd Edition (Juli 1997).
- [29] Isermann, U.: Calculation of aircraft noise contours taking into account the lateral flight track dispersion. Proc. InterNoise 90, Göteborg (1990).
- [30] U. Isermann: Einfluß der physikalischen und flugbetrieblichen Bedingungen auf die Fluglärmimmission am Boden. MPI für Strömungsforschung, Bericht 11/1982, Göttingen (Oktober 1982).

- [31] Society of Automotive Engineers (SAE): Prediction method for lateral attenuation of airplane noise during takeoff and landing. SAE AIR 1751 (1981).
- [32] Isermann, U.: Berechnung der Fluglärmimmission in der Umgebung von Verkehrsflughäfen mit Hilfe eines Simulationsverfahrens. MPI für Strömungsforschung, Bericht 7/1988, Göttingen (Februar 1988).
- [33] Pietrzko, S.; Hofmann, R.F.: Prediction of A-weighted aircraft noise based on measured directivity patterns. *Applied Acoustics*, 23 29–44 (1988).
- [34] Society of Automotive Engineers (SAE): Procedure for the calculation of airplane noise in the vicinity of Airports. SAE AIR 1845 (1986).
- [35] Deutscher Bundestag, 13. Wahlperiode: Beschlußempfehlung und Bericht des Ausschusses für Verkehr (15. Ausschuß) zu den Anträgen Drucksache 13/6364 (Novellierung des Gesetzes zum Schutz gegen Fluglärm) und 13/7498 (Verbesserung des Schutzes vor Fluglärm). Drucksache 13/11140 (23.06.1998).
- [36] Deutsches Institut für Normung (DIN): Schallschutz im Städtebau. DIN 18005, Beiblatt zu Teil 1 (Mai 1987).
- [37] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Beurteilung von Arbeitslärm in der Nachbarschaft. Richtlinie 2058 (September 1985).
- [38] Schreiber, L.: Schallschutz im Städtebau: DIN 18005, Entwurf 1976 - ein Rückschritt ?. *Kampf dem Lärm*, 23 (1976).
- [39] Berglund, B.; Lindvall, T.: Community Noise. Archives of the Center of Sensory Research, Stockholm (November 1995).
- [40] Matschat, K.; Müller, E.-A.: Vergleich nationaler und internationaler Fluglärmbewertungsverfahren. MPI für Strömungsforschung, Göttingen, November 1981.

Anhang: Näherungsbeziehungen zwischen äquivalenten Dauerschallpegeln

A.1. Untersuchungsgegenstand

Im Jahr 1981 wurde am Max-Planck-Institut für Strömungsforschung im Auftrag des Umweltbundesamtes eine vergleichenden Untersuchung nationaler und internationaler Fluglärm-bewertungsmaße durchgeführt [40]. In dieser Untersuchung wurden auch Näherungsbeziehungen zwischen den Bewertungsmaßen ermittelt. Die Ergebnisse zeigten, daß insbesondere äquivalenten Dauerschallpegel der Form

$$L_{EQ} = k \cdot \lg \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N g_i \cdot 10^{L_{max,i}/k} \cdot t_i \right] + C \quad (\text{A-1})$$

hochgradig korreliert und in der Regel mit einer Genauigkeit von weniger als 1 Dezibel ineinander umrechenbar sind. Dieser Bericht fand große Beachtung im nationalen und internationalen Umfeld und wird auch heute noch häufig als Grundlage für Diskussionen über die Eignung unterschiedlicher L_{EQ} -Varianten herangezogen.

Die seinerzeit durchgeführte Untersuchung basierte auf Berechnungen mit dem AzB-Verfahren für eine Anzahl unterschiedlicher deutscher Flugbetriebsfälle. Zugrunde lag die AzB in ihrer ursprünglichen, 1975 veröffentlichten Version [22], in deren Datengrundlage Kap.3-Flugzeuge noch nicht explizit berücksichtigt wurde.

Um abschätzen zu können, ob auch für aktuelle Flugbetriebe die guten Korrelationen zwischen den einzelnen L_{EQ} -Varianten auftreten, wurden die damaligen Untersuchungen in einem auf äquivalente Dauerschallpegel begrenzten Umfang wiederholt.

A.2. Vorgehensweise

Die Berechnungen basierten auf der Flugzeuggruppeneinteilung, die in den Jahren 1995 und 1996 von der schon im Hauptteil des Berichts zitierten ad-hoc Arbeitsgruppe der ADV erarbeitet wurde. Diese liegt derzeit als Ergänzungsvorschläge den zuständigen Behörden vor. Die Tabelle A-1 im Tabellenteil des Anhangs zeigt eine Übersicht über diese Flugzeuggruppeneinteilung.

Die Untersuchungen wurden für die Flughäfen Düsseldorf, Frankfurt, Hamburg und München durchgeführt. Die untersuchten Flugbetriebsfälle bildeten die Basis für eine im Jahre 1996 im Auftrag des BMV erstellte Untersuchung [25], in der u.a. die Effekte einer Verschärfung der Zulassungsbedingungen nach ICAO Annex 16 untersucht wurden. Die Flugbetriebsfälle bezogen sich auf die Ist-Zustände der Jahre 1992 (1993 für München) sowie prognostizierte Flugbetriebe für die Jahre 2003 und 2015. Eine Darstellung der Flugbetriebszusammensetzungen kann den Tabellen A-2 bis A-5 im Tabellenteil entnommen werden.

Für jeden der vier Flughafen wurden unterschiedliche L_{EQ} -Varianten an den Punkten eines regelmäßigen Gitters mit einer Maschenweite von 500 Metern berechnet und anschließend einer Analyse unterzogen. Dabei wurden folgende Deskriptoren mit dem $L_{eq(4,FLG)}$ nach Fluglärmgesetz verglichen:

$L_{eq(4,24h)}$	Ein mit $q = 4$ berechneter, auf 24 Stunden bezogener L_{eq} ohne tageszeitbezogene Wichtung.
$L_{eq(4,Tag)}$	Ein mit $q = 4$ berechneter, auf die 16 Tagestunden von 6–22 Uhr bezogener ungewichteter L_{eq} .
$L_{eq(3,24h)}$	Der energieäquivalente Dauerschallpegel nach ISO 3891 [8] (auf 24 Stunden bezogen, ohne tageszeitbezogene Wichtung, $q = 3$).
$L_{eq(3,Tag)}$	Ein mit $q = 3$ berechneter, auf die 16 Tagestunden von 6–22 Uhr bezogener energieäquivalente Dauerschallpegel ohne tageszeitbezogene Wichtung.
L_{DN}	Der Day-Night Average Sound Level nach ICAO Circular 205 [15].
L_{DEN}	Der Day-Evening-Night Sound Level nach ICAO Circular 205 [15].
$L_{rFl}(Tag)$	Der Fluglärmbeurteilungspegel L_{rFl} nach DIN 45643 [11].

Tabelle A-6 im Tabellenteil zeigt eine Zusammenfassung der nach Gl.(A-1) für die Berechnung dieser Größen notwendigen Parameter. In den Flugbetriebsdaten waren die Bewegungen in Anlehnung an die AzB in zwei Zeitscheiben (Tages- und Nachtperiode) aufgeteilt. Da einige der untersuchten Bewertungsmaße die Tagesperiode von 6 bis 22 Uhr noch in mehrere Zeitscheiben unterteilen, wurde angenommen, daß die Verteilung der Flugbewegungen auf Typen und Strecken während der gesamten 16 Tagesstunden konstant ist. Diese Annahme ist zwar nicht korrekt, doch anwendbar, da die vorliegende Untersuchung modellhaften Charakter hat (es werden lediglich Vergleiche zwischen den einzelnen Bewertungsmaßen durchgeführt). Unter dieser Annahme ergeben sich die in Tabelle A-7 dargestellten Wichtungsfaktoren für die beiden Zeitscheiben nach dem AzB-Verfahren.

A.3. Beschreibung der durchgeführten Regressionsanalyse

Bei der Auswertung der für die unterschiedlichen Flugbetriebe ermittelten Immissionsdaten wurde jeweils angenommen, daß ein linearer Zusammenhang zwischen dem $L_{eq(4,FLG)}$ und der betrachteten L_{EQ} -Variante Y besteht:

$$Y = A \cdot (L_{eq(4,FLG)} - 65) + B \quad (\text{A-2})$$

In der Auswertung wurden diejenigen Immissionsorte berücksichtigt, für die sich ein äquivalenter Dauerschallpegel nach Fluglärmgesetz im Bereich zwischen 55 und 75 dB ergab. Dies entspricht in etwa dem in der Praxis für Beurteilungszwecke relevanten Bereich.

Da die in die Regression eingehenden Werte für ein Gitter mit konstanter Maschenweite berechnet wurden, treten niedrige L_{EQ} -Werte mit bedeutend größerer Häufigkeit auf — Konturen mit niedrigeren L_{EQ} -Werten umschließen deutlich größere Flächen als solche mit hohen Werte. Die aufzustellenden Näherungsbeziehungen sollten jedoch über den ganzen betrachteten Pegelbereich von gleicher Aussagekraft sein, d.h. Gebiete mit niedrigem L_{EQ} sollten mit der gleichen Wichtigkeit berücksichtigt werden wie Gebiete mit hohem L_{EQ} . Aus diesem Grunde wurde eine Funktion $W(X)$ eingeführt, mit der die in die Regression eingehenden Punkte gewichtet wurden.

Diese Wichtungsfunktion basiert auf der Annahme, daß sich das von einer L_{EQ} -Kontur mit dem Wert c_0 umschlossene Gebiet um einen konstanten Faktor β vergrößert wenn man den L_{EQ} -Wert um 1 dB verringert, und zwar unabhängig vom Wert c_0 . Für die von einer L_{EQ} -Kontur mit dem Wert c_0 umschlossene Fläche ergibt sich damit die Näherungsbeziehung:

$$F(c_0) \sim 10^{-(c_0/\gamma)} \quad \text{mit} \quad \gamma = \frac{1}{\lg \beta} \quad (\text{A-3})$$

Eine genauere Analyse für die 4 untersuchten Rechenfälle der jeweiligen Ist-Zustände ergab eine mittlere Flächenzunahme von 19% pro dB Abnahme im L_{EQ} . Dieser Wert unterscheidet sich geringfügig von dem in [40] zitierten Wert von 21%. Aus dem Wert $\beta = 1.19$ ergibt sich ein Wert $\gamma = 13.2$. Die gewünschte Gewichtsfunktion lautet für einer Normierung auf den Wert 1 bei 65 dB:

$$W(X) = 10^{(X - 65)/13.2} \quad (\text{A-4})$$

Im folgenden wird ein in die Regression mit einzubeziehender Punkt durch das Wertepaar mit einem Bewertungsmaß Y_i als Ordinatenwert und dem $L_{eq(4,FLG)}$ -Wert als Abzissenwert

X_i bezeichnet. Diesem Punkt wird das Gewicht $W(X_i)$ nach (A-4) zugeordnet. Die Summe der Gewichte über alle n Regressionspunkte ist dann:

$$S_W = \sum_{i=1}^n W_i \quad \text{mit} \quad W_i = W(X_i).$$

Weiterhin werden die Summen der Mittelwerte

$$S_X = \frac{1}{S_W} \sum_{i=1}^n W_i \cdot X_i$$

$$S_Y = \frac{1}{S_W} \sum_{i=1}^n W_i \cdot Y_i$$

sowie die Summen der zentralen Momente

$$S_{XX} = \frac{1}{S_W} \sum_{i=1}^n W_i \cdot (X_i - S_X)^2$$

$$S_{YY} = \frac{1}{S_W} \sum_{i=1}^n W_i \cdot (Y_i - S_Y)^2$$

$$S_{XY} = \frac{1}{S_W} \sum_{i=1}^n W_i \cdot (X_i - S_X) \cdot (Y_i - S_Y)$$

ermittelt. Aus den zentralen Momenten ergibt sich dann der Korrelationskoeffizient als

$$R = \frac{S_{XY}}{\sqrt{S_{XX} \cdot S_{YY}}}.$$

Die Regressionsgeraden werden durch die Forderung

$$\sum_{i=1}^n W_i \cdot d_{X_i}^2 = \text{Min}$$

$$\sum_{i=1}^n W_i \cdot d_{Y_i}^2 = \text{Min}$$

$$\sum_{i=1}^n W_i \cdot d_i^2 = \text{Min}$$

definiert, wobei d_i der kleinste Abstand des i -ten Diagrammpunkts von der gesuchten Geraden ist. Mit d_{X_i} wird der parallel zur X -Achse gemessene Abstand, mit d_{Y_i} der parallel zur Y -Achse gemessene Abstand des i -ten Diagrammpunkts von der gesuchten Geraden bezeichnet (siehe Abbildung A-1).

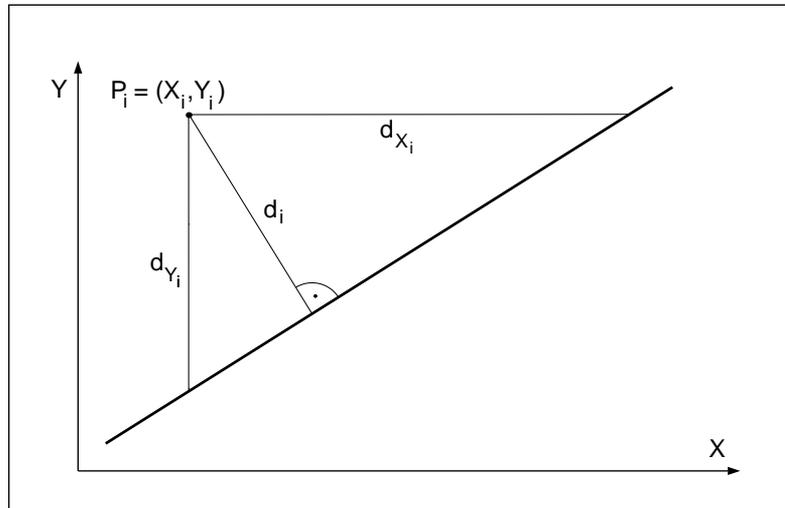


Abb.A-1: Zur Definition der Regressionsgeraden.

Mit diesen Forderungen können die Regressionsgeraden nach (A-2) bezüglich Ordinate bzw. Abszisse wie folgt bestimmt werden:

$$A_Y = S_{XY}/S_{XX} \quad (\text{A-5a})$$

$$B_Y = S_Y - A_Y \cdot S_X \quad (\text{A-5b})$$

$$A_X = S_{XY}/S_{YY} \quad (\text{A-6a})$$

$$B_X = S_X - A_X \cdot S_Y \quad (\text{A-6b})$$

Für die dritte Regressionsgerade, bei der d_i zu minimieren ist, ergeben sich folgende Koeffizienten:

$$A = -\frac{S_{XX} - S_{YY}}{2 \cdot S_{XY}} + \sqrt{1 + \left(\frac{S_{XX} - S_{YY}}{2 \cdot S_{XY}}\right)^2} \quad (\text{A-7a})$$

$$B = S_Y - A \cdot S_X. \quad (\text{A-7b})$$

Die durch diese Form der Regression ermittelten Koeffizienten A und B entsprechen gerade den in Gleichung (A-2) ausgewiesenen Regressionsparametern.

A.4. Diskussion der Ergebnisse

Eine tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse der Regressionsanalyse findet sich in den Tabellen A-8 und A-9 im Tabellenteil dieses Anhangs. In Tabelle 8 sind die Regressionskoeffizienten A (also die Steigungen der Regressionsgeraden) für die durchgeführten Vergleiche zwischen dem $L_{eq(4,FLG)}$ und den sieben untersuchten L_{EQ} -Varianten jeweils für die 12 untersuchten Szenarien aufgetragen. Zusätzlich ist der Mittelwert der Geradensteigung über alle 12 Szenarien aufgeführt. Im unteren Teil von Tabelle 8 finden sich die Differenzen der ermittelten Geradensteigungen zu eben diesem Mittelwert. In Tabelle 9 sind die Regressionskoeffizienten B dargestellt. Dabei wurden Werte dieses Koeffizienten jeweils um 65 dB vermindert. Die so ausgewiesenen Werte geben also an, um wieviel das entsprechende Bewertungsmaß für einen $L_{eq(4,FLG)}$ von 65 dB kleiner oder größer ist.

Grafische Darstellungen der Regressionsgerade sind für die Ist-Zustände im Abbildungsteil in den Abbildungen A-2 bis A-29 dargestellt. Als Abszisse ist (entsprechend Gl.(A-2)) der $L_{eq(4,FLG)}$ nach Fluglärmgesetz aufgetragen. Jedes der eingetragenen Kreuze repräsentiert einen der Punkte des untersuchten Gitters. Die durchgezogenen Gerade ergibt sich aus den nach Gl.(A-7a,b) ermittelten Koeffizienten. Diese Regressionsgerade sind am Abszissenwert $L_{eq(4,FLG)} = 65$ dB mit einem Punkt gekennzeichnet. Der dazu gehörige Ordinatenwert entspricht gerade dem aus der Regression ermittelten Koeffiziente B . Zusätzlich sind (gestrichelt) die Geraden für eine Regression bezüglich Ordinaten- und Abszissenwerten nach Gl.(A-5a,b) und Gl.(A-6a,b)eingetragen.

Im Kopfteil der Diagramme befindet sich die Bezeichnung des untersuchten Rechenfalles. Außerdem werden die Werte der Koeffizienten A und B nach (A-2) sowie der Korrelationskoeffizient ausgewiesen.

Auf eine Darstellung der Regressionsgeraden für die Prognosefälle 2003 und 2015 wurde verzichtet, um den vorliegenden Bericht nicht unnötig aufzublähen. Eine derartige zusätzliche Darstellung würde den Informationsgehalt aus folgenden Gründen nicht erhöhen:

- Die Regressionskoeffizienten sind in den Tabellen A-8 und A-9 in konzentrierter und übersichtlicher Form dargestellt.
- Die Streuung der Datenpunkte sowie die relative Lage der drei Regressionsgeraden zueinander unterscheidet sich für Ist- und Prognosezustände nicht soweit, daß dies aus den grafischen Darstellungen hervorgehen würde.
- Die Korrelationskoeffizienten der Regressionsanalyse für die Prognoseszenarien sind von gleicher Größenordnung wie für die Ist-Zustände.

Insgesamt ergibt sich aus den in den Tabellen A-8 und A-9 dargestellten Regressionskoeffizienten folgendes Resultat:

- Die mittleren Steigungen der Regressionsgeraden für $L_{eq(3,24h)}$, $L_{eq(3,Tag)}$, L_{DN} und L_{rFl} entsprechen gerade denjenigen aus der MPI-Untersuchung [40].
- Die berechneten Pegel für diese 4 Bewertungsmaße für einen $L_{eq(4,FLG)}$ -Wert von 70 dB sind mit den in [40] ausgewiesenen Pegeln vergleichbar.
- Legt man die mittleren Regressionskoeffizienten als Maß für eine Umrechnung der verschiedenen Bewertungsmaße zugrunde, so ergeben sich gegenüber den fall-spezifischen Regressionen für einen $L_{eq(4,FLG)}$ von 65 dB die im unteren Teil der Tabelle A-9 ausgewiesenen Differenzen. Die entsprechenden Differenzen für $L_{eq(4,FLG)}$ -Werte von 55 bzw. 75 dB sind in der Tabelle A-10 dargestellt. Diese Abweichungen sind vergleichbar mit den in [40] ausgewiesenen Differenzen und betragen in den meisten Fällen weniger als 1 dB.
- Die Ergebnisse der Regressionen für zwischen $L_{eq(4,Tag)}$ und $L_{eq(4,FLG)}$ ergeben für die Flugbetriebsfälle Düsseldorf, Hamburg und München identische Werte zwischen beiden Größen. Dies rührt daher, daß für diese Szenarien der Fall B des $L_{eq(4,FLG)}$ aufgrund des niedrigen Nachtfluganteils nicht zum Tragen kommt. Lediglich für Frankfurt gehen Nachtbewegungen mit in die $L_{eq(4,FLG)}$ -Berechnung mit ein.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Resultate dieser Vergleichsberechnungen diejenigen der Max-Planck-Studie gut bestätigen. Die verschiedenen untersuchten L_{EQ} -Varianten sind durchweg hoch korreliert. Allerdings basieren die durchgeführten Untersuchungen nur auf 4 Flughäfen. Um Resultate von höherem Allgemeingrad zu erhalten, wäre eine umfangreichere Studie notwendig, bei der auch weitergehende Regressionsanalysen durchgeführt werden sollten (z.B. hinsichtlich der Einbeziehung des Nachtfluganteils als Regressionsparameter).

A.5. Tabellenteil

Gruppe	Annex 16	MTOW [t]	Antrieb	Flugzeugbeispiele
PROP-1 PROP-2 PROP-2N	3	≤ 5.7 > 5.7 > 5.7		F27, HS748 Fokker 50, Saab 2000
S1	2	≤ 100	2-mot.	DC-9 (nicht B737-200 mit JT8D-Mixer-Triebwerk)
S1(2)	2	≤ 100		B737-200 (Mixer-Triebwerk)
S1(3/4)	2	≤ 100	3/4-mot.	B727-200, Tu 154
S2		≤ 100		B737, B727, DC-9
S3(2/3)	2	> 100	2/3-mot.	ältere DC-10
S3(4)	2	> 100	4-mot.	ältere B747
S4		> 100		B707, DC-8
S5(S)	3	≤ 50	BPR ≤ 3	CR Regionaljet, BAe146
S5(H)	3	50 – 120	BPR > 3	B737-300...500, B757, A320
S5(M)	3	≤ 120	BPR ≤ 3	MD80...87
S6(2)	3	120 – 300	2-mot.	A300, A310, A330 B767, B777
S6(3/4)	3	120 – 300	3/4 mot.	MD-11, DC-8-70 (nicht A340)
S7	3	> 300		B747
S8	3			A340

Tabelle A-1: Übersicht über die Flugzeuggruppeneinteilung, die den Berechnungen mit dem AzB-Verfahren zugrunde gelegt wurde. Die Gruppierung erfolgt nach Zertifikationsstufe (Spalte "Annex 16"), Höchstabflugmasse (Spalte "MTOW") sowie Triebwerksanzahl oder Nebenstromverhältnis BPR (Spalte "Antrieb"). Die Gruppen S3(2/3), S3(4), S4, S6(3/4) und S7 werden jeweils noch in zwei Auslastungsstufen unterteilt.

Düsseldorf	1992		2003		2015	
Gruppe	Anzahl	Anteil Nacht	Anzahl	Anteil Nacht	Anzahl	Anteil Nacht
PROP-2	1515	4.5 %	0		0	
PROP-2N	17800	3.6 %	18660	3.4 %	14140	3.3 %
S1	8490	0.4 %	0		0	
S1(2)	15133	0.6 %	0		0	
S1(3/4)	4068	1.6 %	0		0	
S3	230	3.0 %	0		0	
S5(S)	6412	3.2 %	17520	2.6 %	18640	2.6 %
S5(M)	12274	3.3 %	19580	3.3 %	16200	3.2 %
S5(H)	64988	3.2 %	118460	3.2 %	151140	3.2 %
S6(2)	9611	6.6 %	21500	7.0 %	35320	6.9 %
S6(3/4)	10404	8.4 %	7560	8.5 %	10020	8.5 %
S7	352	6.8 %	2040	6.7 %	5020	6.7 %
S8	0		2500	8.3 %	5580	8.3 %
Gesamt	151277	3.4 %	207820	3.8 %	256060	4.1 %

Tabelle A-2: Bewegungszahlen der Flugbetriebe in den Bezugsjahren 1992, 2003 und 2015 für den Flughafen Düsseldorf (nach [25]). Die Flugzeuggruppen entsprechen den in Tabelle A-1 aufgeführten Gruppen. Eingetragen sind jeweils die Anzahl Flugbewegungen in 12 Monaten sowie der prozentuale Anteil an Nachtbewegungen.

Frankfurt	1992		2003		2015	
Gruppe	Anzahl	Anteil Nacht	Anzahl	Anteil Nacht	Anzahl	Anteil Nacht
PROP-2	9119	6.9%	0		0	
PROP-2N	19400	6.6%	7860	6.2%	6260	5.9%
S1	17461	1.3%	700	0.6%	0	
S1(2)	33779	13.4%	0		0	
S1(3/4)	17399	2.0%	0		0	
S3	2445	3.3%	0		0	
S4	428	3.3%	0		0	
S5(S)	6658	4.8%	15140	5.7%	14000	5.6%
S5(M)	22604	8.9%	33700	8.5%	25720	8.7%
S5(H)	98549	4.5%	213060	4.3%	209500	4.9%
S6(2)	61500	9.5%	69380	9.9%	100410	10.0%
S6(3/4)	21000	10.0%	10220	7.4%	10480	10.1%
S7	28085	13.9%	56620	12.3%	64580	12.0%
S8	0		12960	20.5%	16420	20.5%
Gesamt	338427	7.6%	419640	7.3%	447370	8.0%

Tabelle A-3: Bewegungszahlen der Flugbetriebe in den Bezugsjahren 1992, 2003 und 2015 für den Flughafen Frankfurt (nach [25]). Die Flugzeuggruppen entsprechen den in Tabelle A-1 aufgeführten Gruppen. Eingetragen sind jeweils die Anzahl Flugbewegungen in 12 Monaten sowie der prozentuale Anteil an Nachtbewegungen.

Hamburg	1992		2003		2015	
Gruppe	Anzahl	Anteil Nacht	Anzahl	Anteil Nacht	Anzahl	Anteil Nacht
PROP-2N	27712	1.0 %	21100	1.0 %	15860	1.0 %
S1	6164	1.7 %	0		0	
S1(2)	11072	5.0 %	0		0	
S1(3/4)	2450	6.4 %	0		0	
S3	454	0.0 %	0		0	
S5(S)	4052	5.5 %	24040	5.4 %	27280	5.4 %
S5(M)	5686	5.4 %	5480	5.0 %	5580	5.0 %
S5(H)	46218	5.5 %	74540	5.5 %	103820	5.5 %
S6(2)	10782	4.9 %	12220	3.6 %	15340	2.5 %
S6(3/4)	302	0.0 %	240	0.0 %	860	0.0 %
S7	36	2.8 %	420	3.3 %	700	3.3 %
S8	0		40	0.0 %	540	0.0 %
Gesamt	114928	4.1 %	138080	4.6 %	169980	4.7 %

Tabelle A-4: Bewegungszahlen der Flugbetriebe in den Bezugsjahren 1992, 2003 und 2015 für den Flughafen Hamburg (nach [25]). Die Flugzeuggruppen entsprechen den in Tabelle A-1 aufgeführten Gruppen. Eingetragen sind jeweils die Anzahl Flugbewegungen in 12 Monaten sowie der prozentuale Anteil an Nachtbewegungen.

München	1993		2003		2015	
Gruppe	Anzahl	Anteil Nacht	Anzahl	Anteil Nacht	Anzahl	Anteil Nacht
PROP-2	770	41.9 %	0		0	
PROP-2N	33470	1.2 %	28040	1.6 %	32200	1.6 %
S1	3393	1.5 %	0		0	
S1(2)	16867	0.8 %	0		0	
S1(3/4)	3008	0.9 %	0		0	
S3	62	0.0 %	0		0	
S4	290	2.8 %	0		0	
S5(S)	10525	5.0 %	28900	4.7 %	41320	4.7 %
S5(M)	10567	5.1 %	9600	3.2 %	10100	3.3 %
S5(H)	89041	4.5 %	161140	4.4 %	244360	4.7 %
S6(2)	12222	10.1 %	18120	10.0 %	40700	10.5 %
S6(3/4)	3108	4.6 %	2460	11.4 %	5560	10.8 %
S7	1208	7.5 %	6280	10.4 %	15380	10.1 %
S8	0		3040	10.4 %	5620	10.4 %
Gesamt	184531	4.1 %	257580	4.8 %	395240	5.4 %

Tabelle A-5: Bewegungszahlen der Flugbetriebe in den Bezugsjahren 1993, 2003 und 2015 für den Flughafen München (nach [25]). Die Flugzeuggruppen entsprechen den in Tabelle A-1 aufgeführten Gruppen. Eingetragen sind jeweils die Anzahl Flugbewegungen in 12 Monaten sowie der prozentuale Anteil an Nachtbewegungen.

L_{EQ} -Variante	t_i	k	g_i für die Zeiten			
			6-7 h	7-19 h	19-22 h	22-6 h
$L_{eq}(4,24h)$	t_{10}	13.3	1	1	1	1
$L_{eq}(4,Tag)$	t_{10}	13.3	1.5	1.5	1.5	0
$L_{eq}(3,24h)$	t_e	10	1	1	1	1
$L_{eq}(3,Tag)$	t_e	10	1.5	1.5	1.5	0
L_{DN}	t_e	10	10	1	1	10
L_{DEN}	t_e	10	10	1	3.162	10
$L_{rFl}(Tag)$	t_e	10	5.972	1.5	5.972	0
$L_{eq}(4,FLG)-A$	t_{10}	13.3	1.5	1.5	1.5	0
$L_{eq}(4,FLG)-B$	t_{10}	13.3	1	1	1	5

Tabelle A-6: Definition der in untersuchten L_{eq} -Varianten. t_{10} bzw. t_e sind 10dB-down time bzw. effektive Dauer nach (2-2). Die Wichtungsfaktoren g_i beziehen sich auf eine Ermittlung des Bewertungsmaßes bezogen auf 24 h.

L_{EQ} -Variante	t_i	k	g_i^* für die Zeiten	
			6-22 h	22-6 h
$L_{eq}(4,24h)$	t_{10}	13.3	1	1
$L_{eq}(4,Tag)$	t_{10}	13.3	1.5	0
$L_{eq}(3,24h)$	t_e	10	1	1
$L_{eq}(3,Tag)$	t_e	10	1.5	0
L_{DN}	t_e	10	1.563	10
L_{DEN}	t_e	10	1.968	10
$L_{rFl}(Tag)$	t_e	10	2.618	0
$L_{eq}(4,FLG)-A$	t_{10}	13.3	1.5	0
$L_{eq}(4,FLG)-B$	t_{10}	13.3	1	5

Tabelle A-7: Definition der in untersuchten L_{eq} -Varianten. t_{10} bzw. t_e sind 10dB-down time bzw. effektive Dauer nach (2-2). Die Wichtungsfaktoren g_i^* beziehen sich auf eine Ermittlung des Bewertungsmaßes bezogen auf 24 h, wenn nur mit 2 Zeitscheiben gerechnet wird. Dabei wurde angenommen, daß die Verkehrszusammensetzung während der Zeiträume von 6-7 und 19-22 Uhr identisch mit derjenigen während der gesamten Tagesperiode von 6-22 Uhr ist.

Regression $Y = A \cdot (L_{eq(4,FLG)} - 65) + B$							
Werte von A für die verschiedenen Bewertungsmaße Y							
Flughafen/ Jahr	$L_{eq(4)}$ (24h)	$L_{eq(4)}$ (Tag)	$L_{eq(3)}$ (24h)	$L_{eq(3)}$ (Tag)	L_{DN}	L_{DEN}	L_{rFl} (Tag)
Düsseldorf 1992	0.998	1.000	1.018	1.019	1.015	1.015	1.019
Düsseldorf 2003	0.996	1.000	1.015	1.018	1.005	1.007	1.018
Düsseldorf 2015	0.996	1.000	1.015	1.018	1.009	1.010	1.018
Frankfurt 1992	0.997	0.990	1.041	1.036	1.063	1.058	1.036
Frankfurt 2003	0.981	0.971	1.038	1.027	1.087	1.077	1.027
Frankfurt 2015	0.979	0.970	1.025	1.016	1.068	1.060	1.016
Hamburg 1992	0.999	1.000	1.135	1.136	1.129	1.130	1.136
Hamburg 2003	0.998	1.000	1.109	1.111	1.104	1.105	1.111
Hamburg 2015	0.999	1.000	1.097	1.097	1.096	1.096	1.097
München 1993	0.998	1.000	1.097	1.099	1.089	1.091	1.099
München 2003	0.996	1.000	1.061	1.064	1.051	1.053	1.064
München 2015	0.997	1.000	1.039	1.041	1.034	1.035	1.041
Mittelwert	0.995	0.994	1.058	1.057	1.063	1.061	1.057

Differenz von A zum Mittelwert							
Düsseldorf 1992	+0.004	+0.006	-0.039	-0.038	-0.048	-0.046	-0.038
Düsseldorf 2003	+0.002	+0.006	-0.043	-0.039	-0.058	-0.054	-0.039
Düsseldorf 2015	+0.002	+0.006	-0.043	-0.039	-0.054	-0.051	-0.039
Frankfurt 1992	+0.003	-0.004	-0.017	-0.021	+0.000	-0.003	-0.021
Frankfurt 2003	-0.014	-0.023	-0.019	-0.030	+0.024	+0.016	-0.030
Frankfurt 2015	-0.016	-0.024	-0.033	-0.041	+0.005	-0.001	-0.041
Hamburg 1992	+0.005	+0.006	+0.078	+0.079	+0.066	+0.069	+0.079
Hamburg 2003	+0.004	+0.006	+0.052	+0.054	+0.041	+0.044	+0.054
Hamburg 2015	+0.005	+0.006	+0.040	+0.040	+0.033	+0.035	+0.040
München 1993	+0.004	+0.006	+0.040	+0.042	+0.026	+0.030	+0.042
München 2003	+0.002	+0.006	+0.004	+0.007	-0.012	-0.008	+0.007
München 2015	+0.003	+0.006	-0.019	-0.016	-0.029	-0.026	-0.016

Tabelle A-8: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq(4,FLG)}$ und den untersuchten Bewertungsmaßen. In der oberen Teiltabelle ist die Steigung A der Regressionsgeraden sowie deren Mittelwert über alle Szenarien eingetragen. Die untere Teiltabelle enthält die Differenzen der Geradensteigung zum Mittelwert.

Regression $Y = A \cdot (L_{eq(4,FLG)} - 65) + B$							
Werte von $B - 65$ dB für die verschiedenen Bewertungsmaße Y							
Flughafen/ Jahr	$L_{eq(4)}$ (24h)	$L_{eq(4)}$ (Tag)	$L_{eq(3)}$ (24h)	$L_{eq(3)}$ (Tag)	L_{DN}	L_{DEN}	L_{rFl} (Tag)
Düsseldorf 1992	-2.24	0.00	-0.29	+1.39	+2.02	+2.94	+3.81
Düsseldorf 2003	-2.18	0.00	-1.10	+0.54	+1.39	+2.27	+2.96
Düsseldorf 2015	-2.17	0.00	-1.46	+0.18	+1.06	+1.93	+2.60
Frankfurt 1992	-2.05	-0.28	-1.01	+0.33	+2.67	+3.31	+2.75
Frankfurt 2003	-2.36	-0.75	-1.49	-0.36	+2.64	+3.22	+2.06
Frankfurt 2015	-2.40	-0.82	-1.67	-0.56	+2.52	+3.09	+1.86
Hamburg 1992	-2.21	0.00	+1.09	+2.77	+3.46	+4.36	5.19
Hamburg 2003	-2.14	0.00	+0.44	+2.06	+3.07	+3.92	+4.48
Hamburg 2015	-2.14	0.00	-0.06	+1.56	+2.55	+3.40	+3.98
München 1993	-2.19	0.00	+0.45	+2.11	+2.88	+3.77	+4.53
München 2003	-2.10	0.00	-0.33	+1.25	+2.46	+3.27	+3.67
München 2015	-2.07	0.00	-0.99	+0.57	+1.87	+2.67	+2.99
Mittelwert	-2.19	-0.15	-0.54	+0.99	+2.38	+3.18	+3.41

Differenz von B zum Mittelwert							
Düsseldorf 1992	-0.05	+0.15	+0.24	+0.40	-0.36	-0.24	+0.40
Düsseldorf 2003	+0.01	+0.15	-0.57	-0.45	-0.99	-0.91	-0.45
Düsseldorf 2015	+0.02	+0.15	-0.93	-0.81	-1.32	-1.25	-0.81
Frankfurt 1992	+0.14	-0.13	-0.48	-0.66	+0.29	+0.13	-0.66
Frankfurt 2003	-0.17	-0.60	-0.96	-1.35	+0.26	+0.04	-1.35
Frankfurt 2015	-0.21	-0.67	-1.14	-1.55	+0.14	-0.09	-1.55
Hamburg 1992	-0.02	+0.15	+1.63	+1.78	+1.08	+1.18	+1.78
Hamburg 2003	+0.05	+0.15	+0.97	+1.07	+0.69	+0.74	+1.07
Hamburg 2015	+0.05	+0.15	+0.47	+0.57	+0.17	+0.22	+0.57
München 1993	+0.00	+0.15	+0.99	+1.12	+0.50	+0.59	+1.12
München 2003	+0.09	+0.15	+0.21	+0.26	+0.08	+0.09	+0.26
München 2015	+0.12	+0.15	-0.45	-0.42	-0.51	-0.51	-0.42

Tabelle A-9: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq(4,FLG)}$ und den untersuchten Bewertungsmaßen. In der oberen Teiltabelle ist der um 65 dB verringerte Parameter B der Regressionsgeraden sowie der um 65 dB verringerte Mittelwert über alle Szenarien eingetragen. Die untere Teiltabelle enthält die Differenzen von B zum Mittelwert.

Differenz zwischen mittleren und fallspezifischen Regressionswerten							
$L_{eq(4,FLG)} = 55 \text{ dB}$							
Flughafen/ Jahr	$L_{eq(4)}$ (24h)	$L_{eq(4)}$ (Tag)	$L_{eq(3)}$ (24h)	$L_{eq(3)}$ (Tag)	L_{DN}	L_{DEN}	L_{rFl} (Tag)
Düsseldorf 1992	-0.09	+0.10	+0.64	+0.78	+0.11	+0.22	+0.78
Düsseldorf 2003	-0.01	+0.10	-0.14	-0.06	-0.42	-0.37	-0.06
Düsseldorf 2015	0.00	+0.10	-0.50	-0.42	-0.79	-0.73	-0.42
Frankfurt 1992	+0.11	-0.08	-0.31	-0.45	+0.28	+0.16	-0.45
Frankfurt 2003	-0.04	-0.36	-0.76	-1.05	+0.01	-0.12	-1.05
Frankfurt 2015	-0.06	-0.42	-0.81	-1.14	+0.08	-0.08	-1.14
Hamburg 1992	-0.07	+0.10	+0.85	+0.99	+0.41	+0.49	+0.99
Hamburg 2003	+0.01	+0.10	+0.46	+0.53	+0.27	+0.30	+0.53
Hamburg 2015	0.00	+0.10	+0.08	+0.17	-0.17	-0.13	+0.17
München 1993	-0.04	+0.10	+0.59	+0.70	+0.23	+0.29	+0.70
München 2003	+0.07	+0.10	+0.17	+0.19	+0.19	+0.17	+0.19
München 2015	+0.09	+0.10	-0.27	-0.26	-0.23	-0.25	-0.26

$L_{eq(4,FLG)} = 75 \text{ dB}$							
Düsseldorf 1992	-0.02	+0.21	-0.15	+0.03	-0.84	-0.70	+0.03
Düsseldorf 2003	+0.02	+0.21	-0.99	-0.83	-1.57	-1.45	-0.84
Düsseldorf 2015	+0.03	+0.21	-1.35	-1.19	-1.86	-1.76	-1.19
Frankfurt 1992	+0.16	-0.17	-0.64	-0.86	+0.29	+0.10	-0.86
Frankfurt 2003	-0.31	-0.83	-1.15	-1.65	+0.50	+0.20	-1.65
Frankfurt 2015	-0.37	-0.91	-1.46	-1.96	+0.19	-0.10	-1.96
Hamburg 1992	+0.02	+0.21	+2.40	+2.58	+1.74	+1.87	+2.58
Hamburg 2003	+0.08	+0.21	+1.49	+1.62	+1.10	+1.18	+1.62
Hamburg 2015	+0.09	+0.21	+0.87	+0.98	+0.50	+0.57	+0.98
München 1993	+0.03	+0.21	+1.38	+1.55	+0.76	+0.89	+1.55
München 2003	+0.10	+0.21	+0.24	+0.34	-0.04	+0.01	+0.34
München 2015	+0.14	+0.21	-0.64	-0.58	-0.80	-0.77	-0.58

Tabelle A-10: Differenzen, die sich bei Anwendung der mittleren Regressionsparameter (Mittelwerte nach Tab.A-8,-9) gegenüber der Anwendung der fallspezifischen Regressionsparameter nach Tab.A-8,9 für $L_{eq(4,FLG)}$ -Werte von 55 und 75 dB ergeben.

A.6. Abbildungsteil

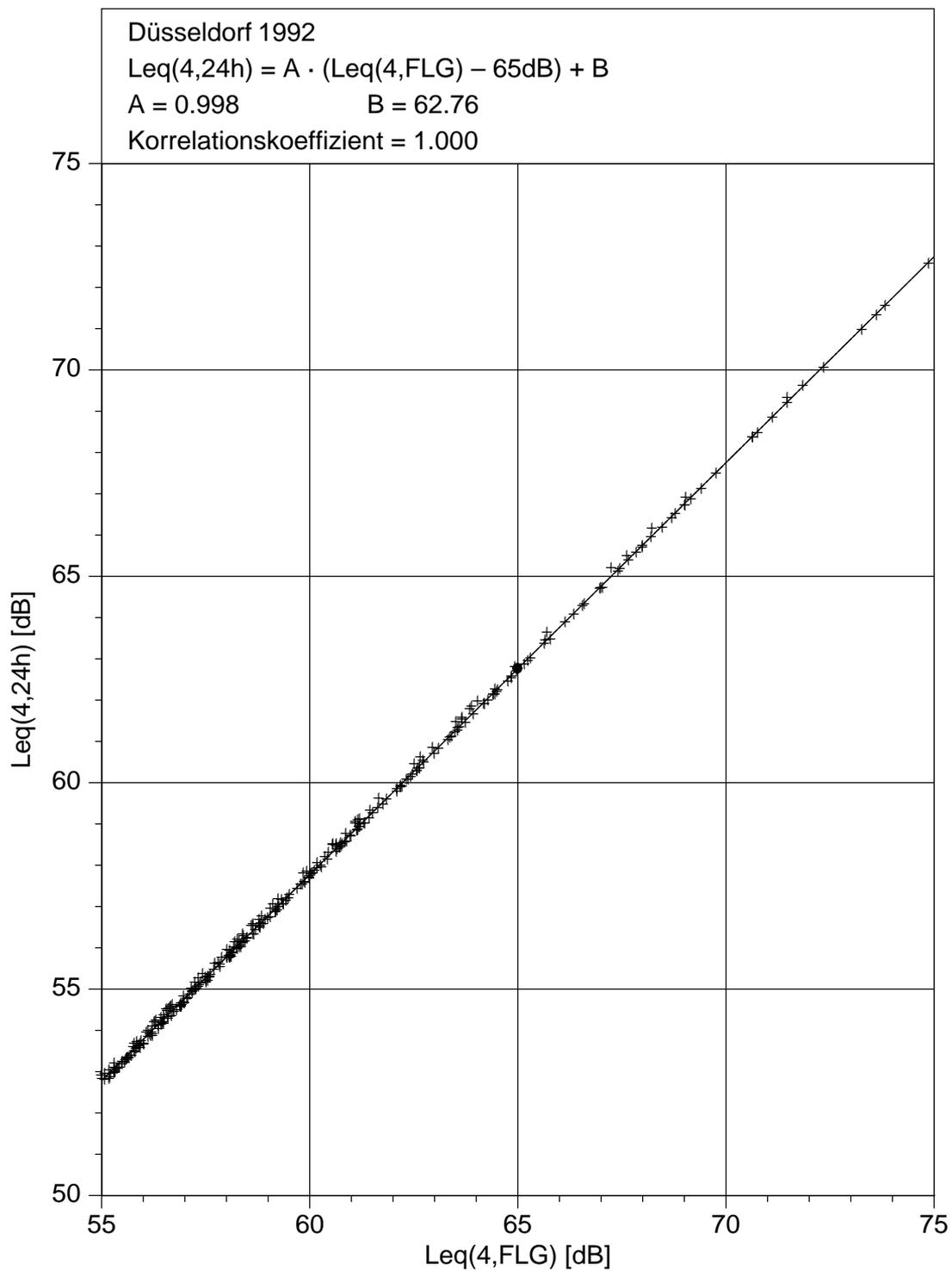


Abb.A-2: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und $L_{eq}(4,24h)$ für den Flugbetrieb Düsseldorf 1992.

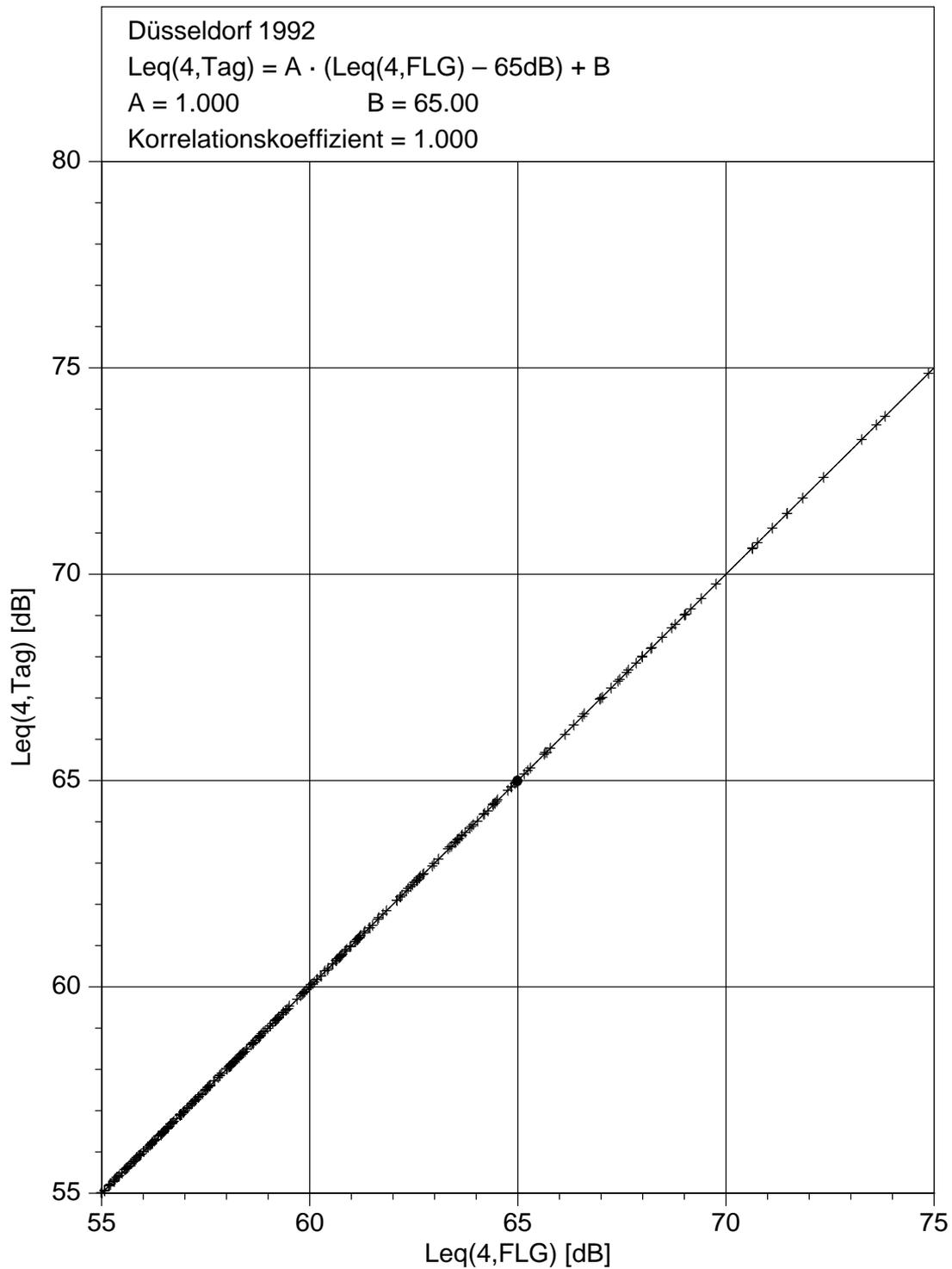


Abb.A-3: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und $L_{eq}(4,Tag)$ für den Flugbetrieb Düsseldorf 1992.

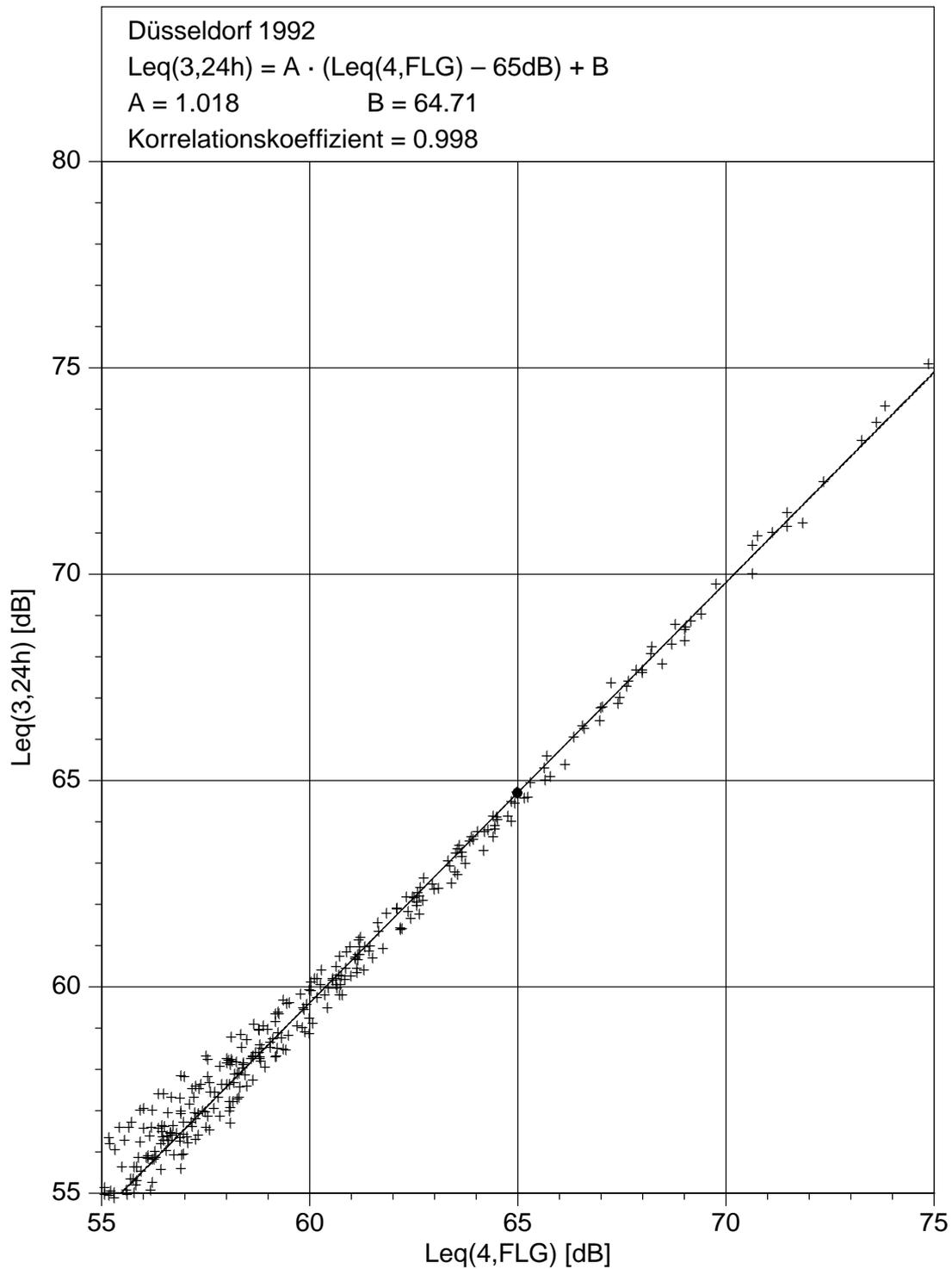


Abb.A-4: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und $L_{eq}(3,24h)$ für den Flugbetrieb Düsseldorf 1992.

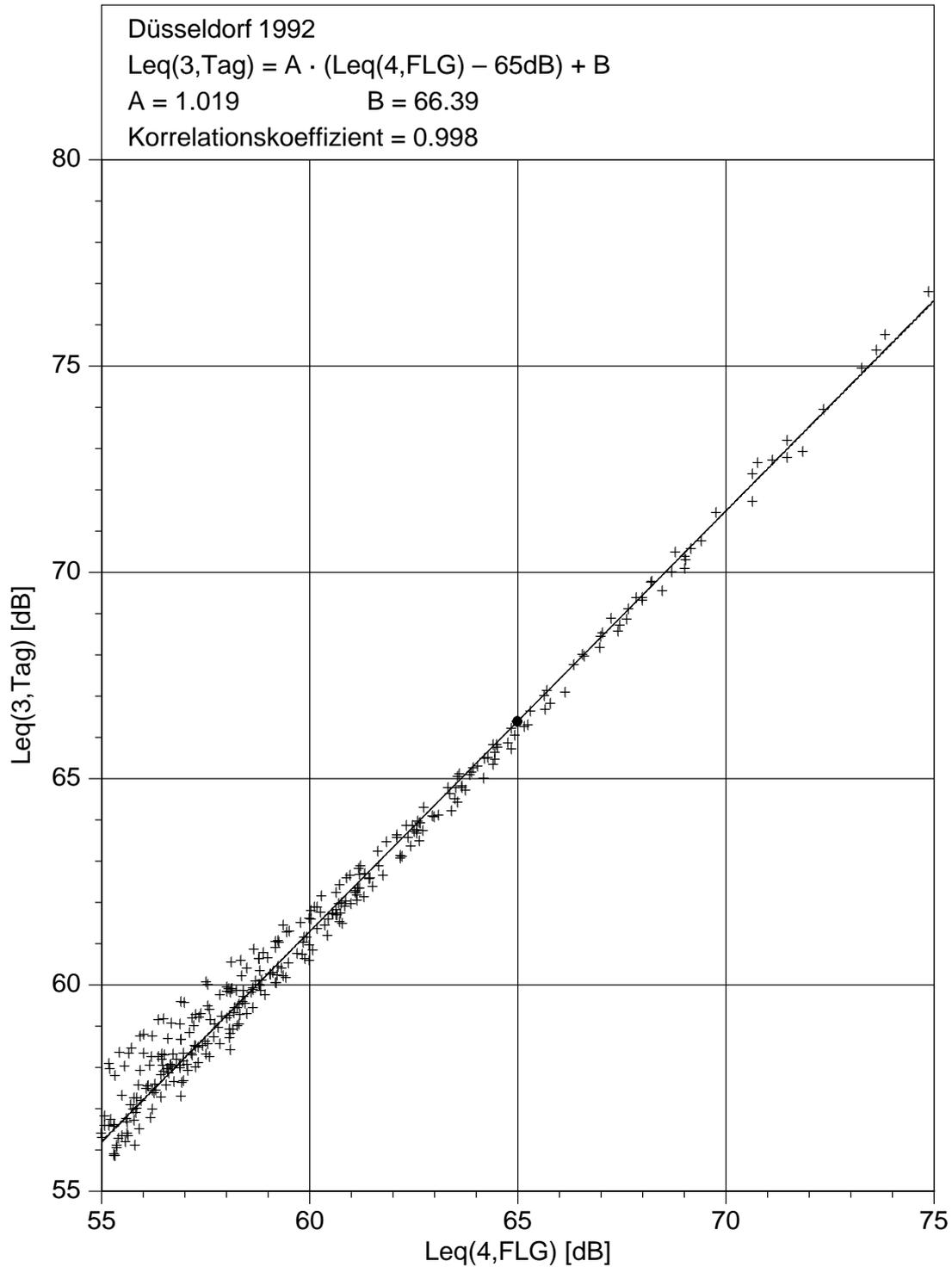


Abb.A-5: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und $L_{eq}(3,Tag)$ für den Flugbetrieb Düsseldorf 1992.

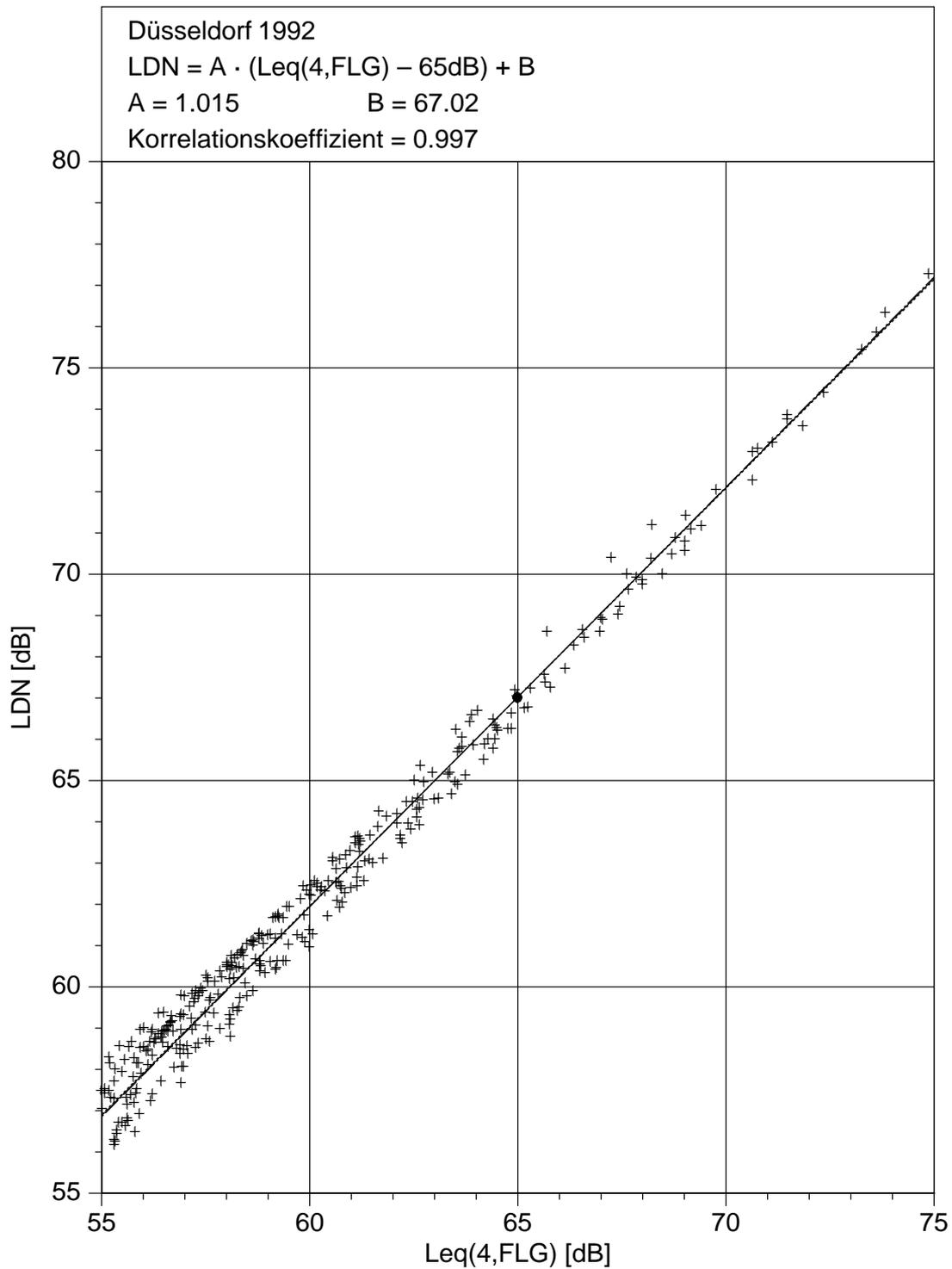


Abb.A-6: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq(4,FLG)}$ und L_{DN} für den Flugbetrieb Düsseldorf 1992.

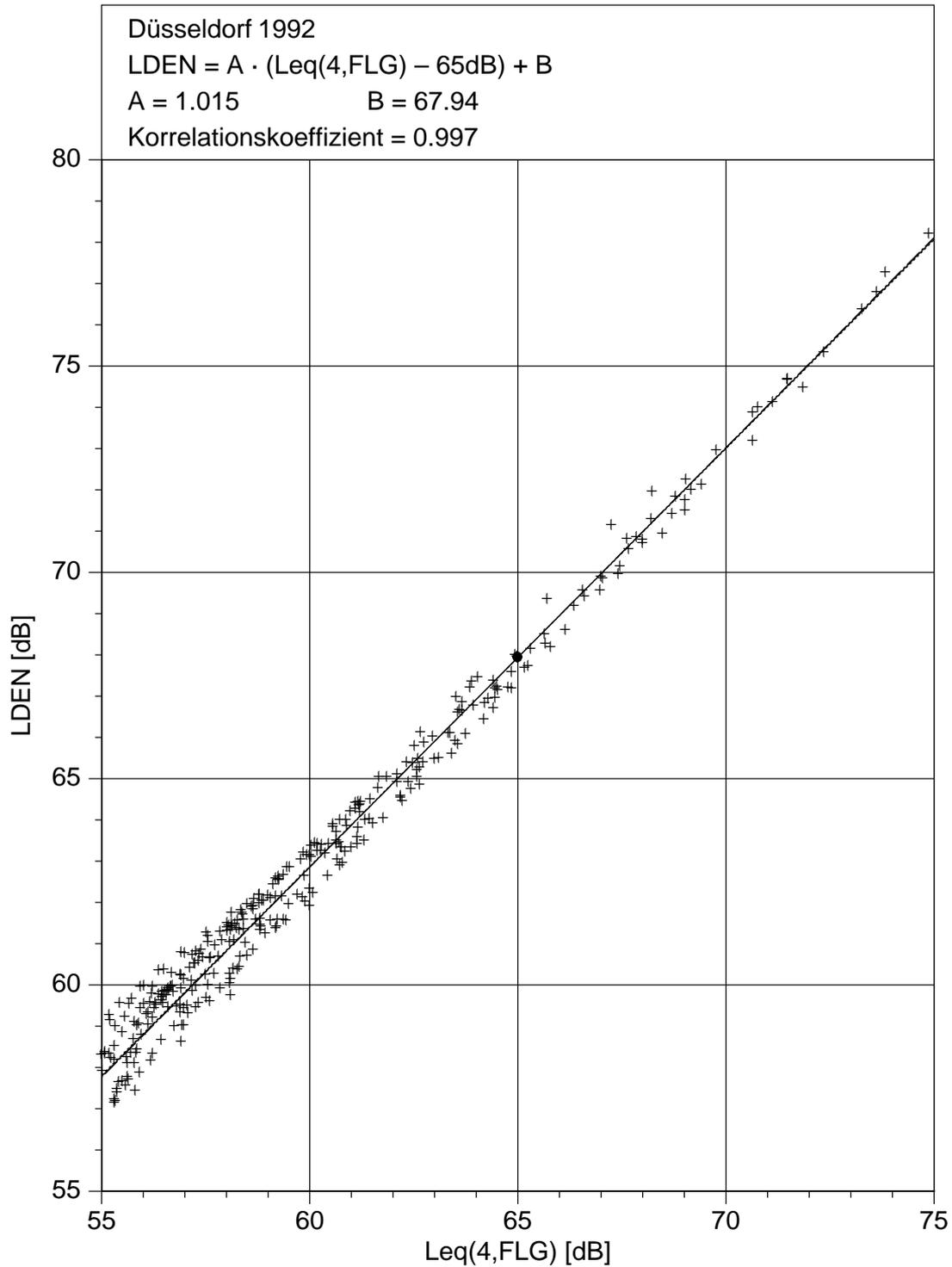


Abb.A-7: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und L_{DEN} für den Flugbetrieb Düsseldorf 1992.

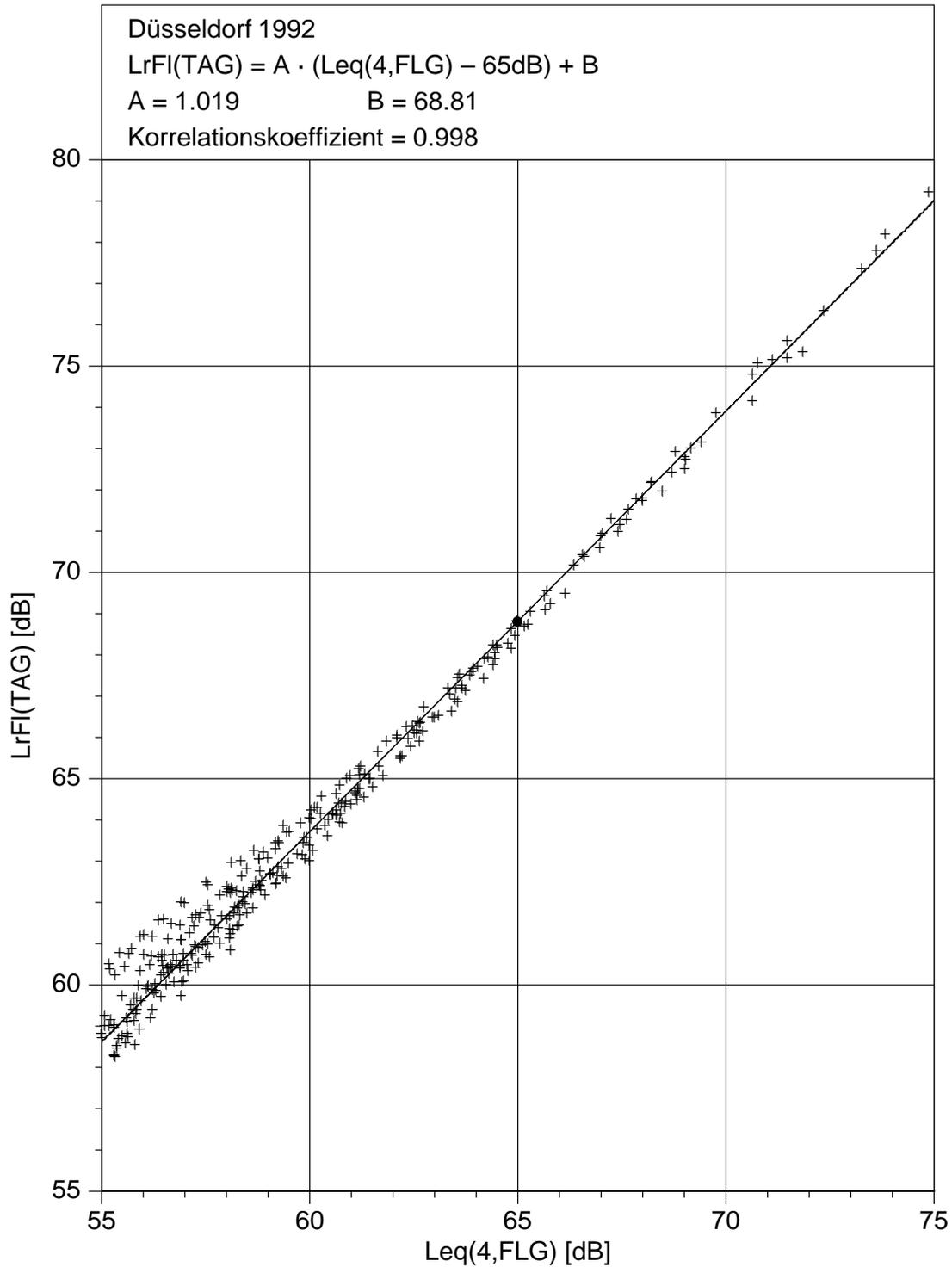


Abb.A-8: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und L_{rFl} für den Flugbetrieb Düsseldorf 1992.

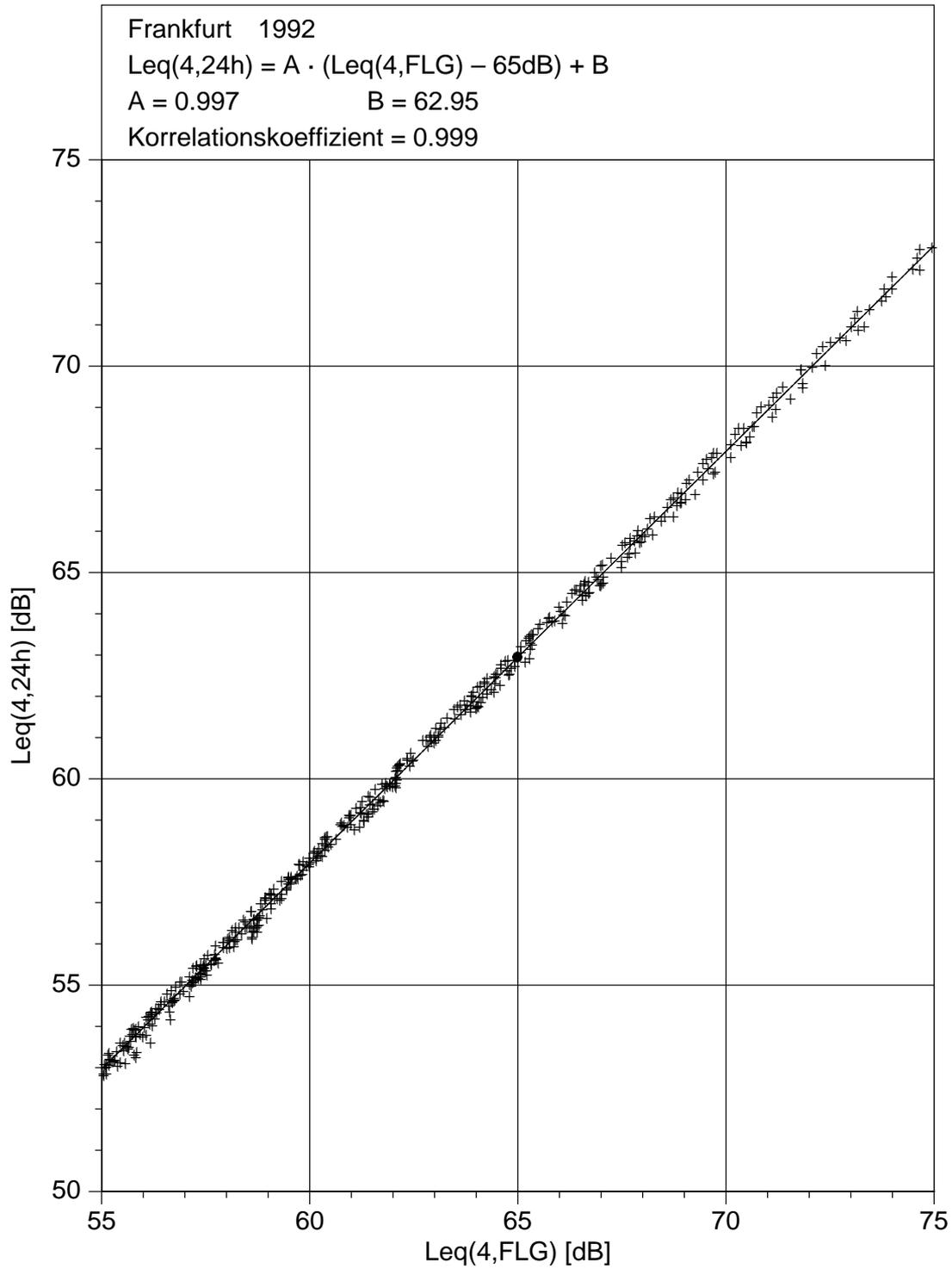


Abb.A-9: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und $L_{eq}(4,24h)$ für den Flugbetrieb Frankfurt 1992.

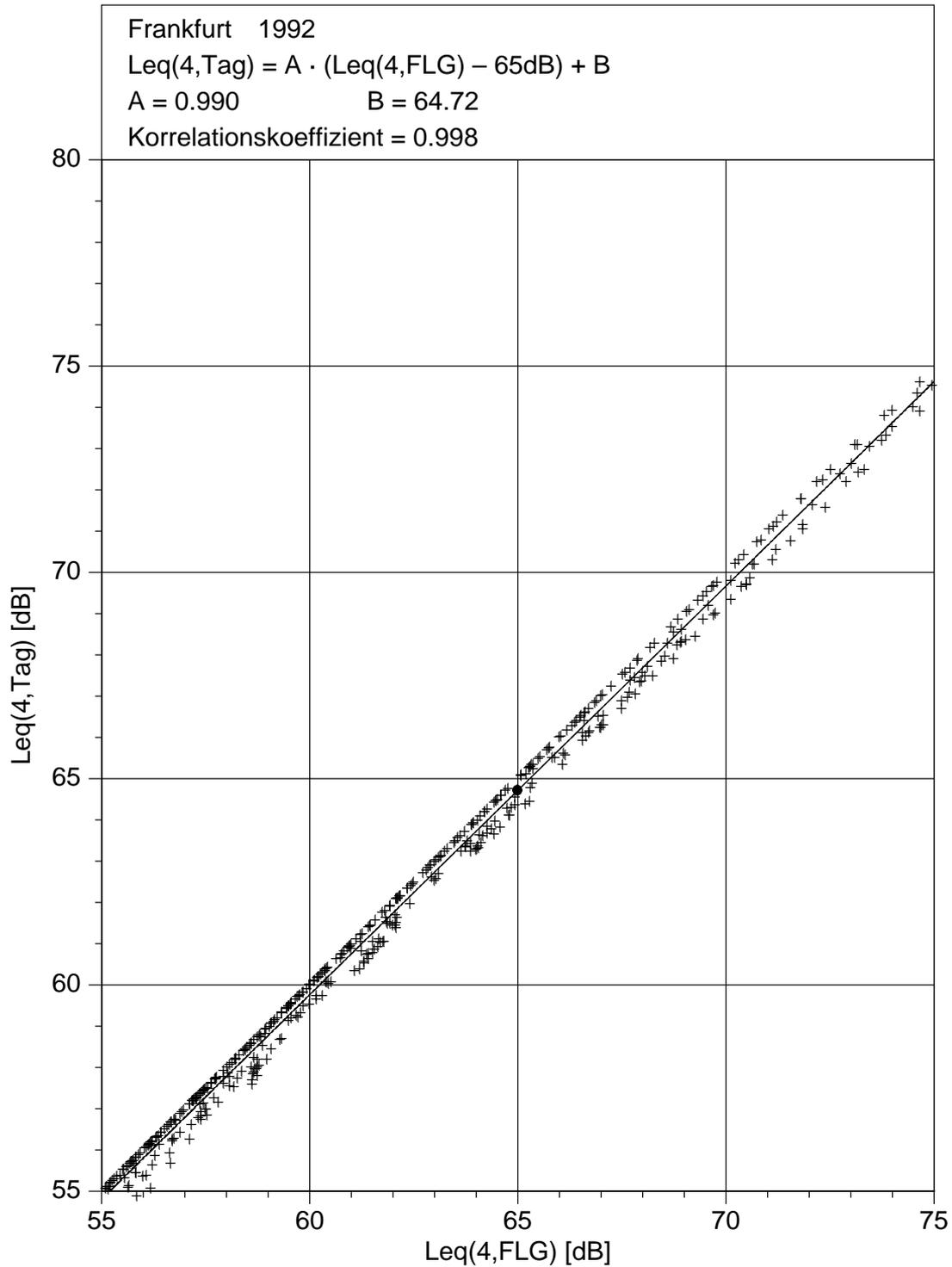


Abb.A-10: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und $L_{eq}(4,Tag)$ für den Flugbetrieb Frankfurt 1992.

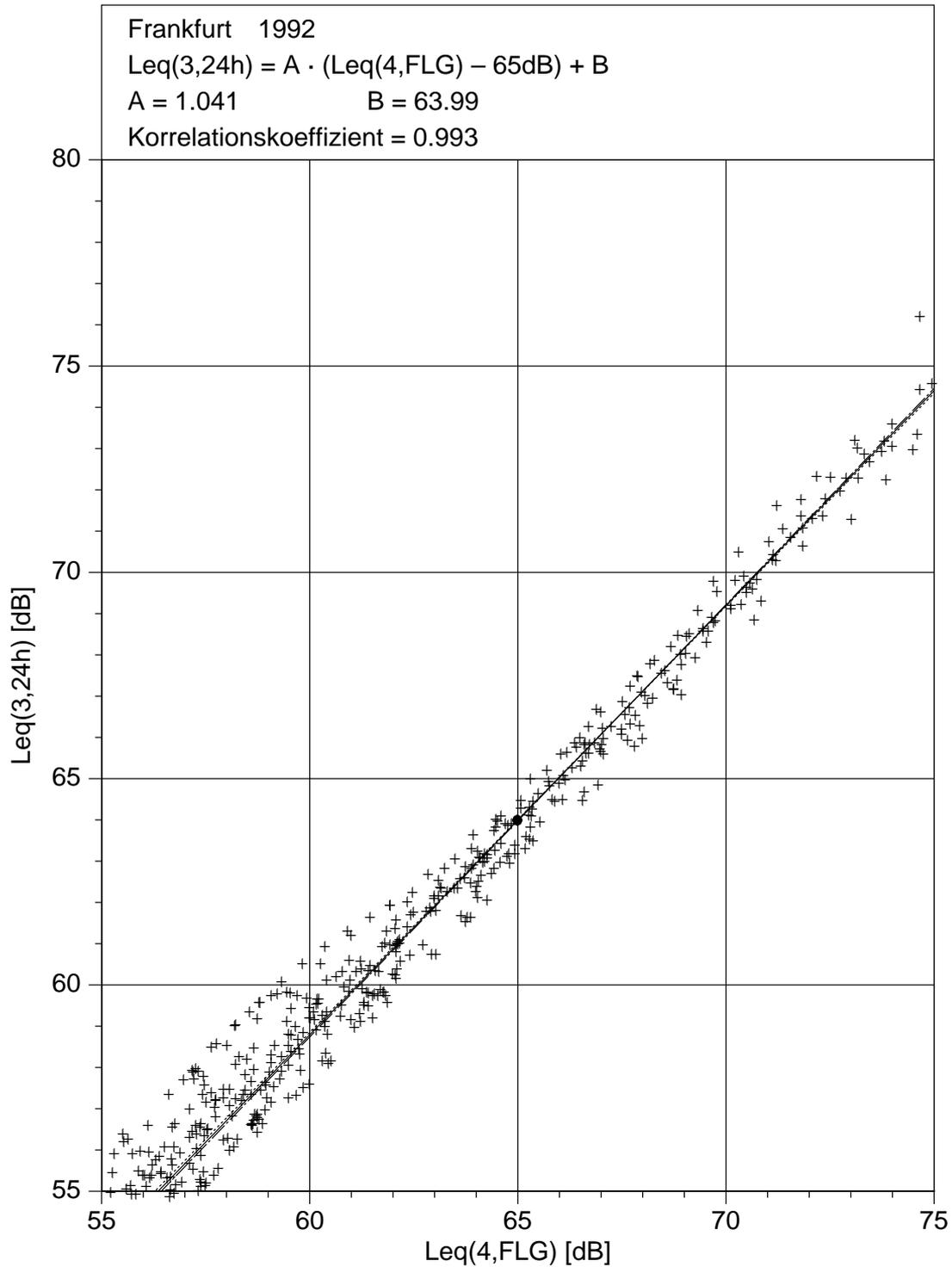


Abb.A-11: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und $L_{eq}(3,24h)$ für den Flugbetrieb Frankfurt 1992.

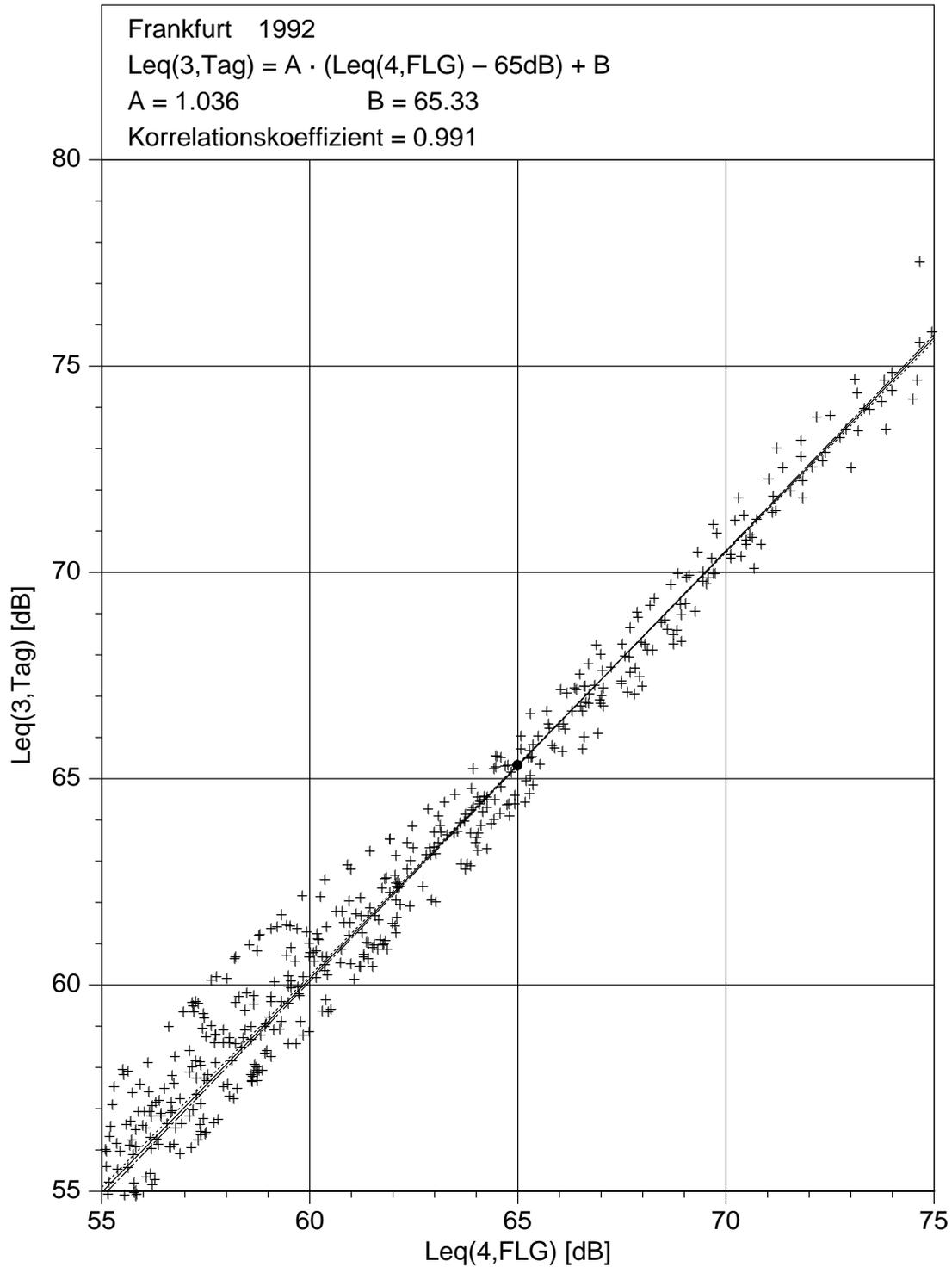


Abb.A-12: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und $L_{eq}(3,Tag)$ für den Flugbetrieb Frankfurt 1992.

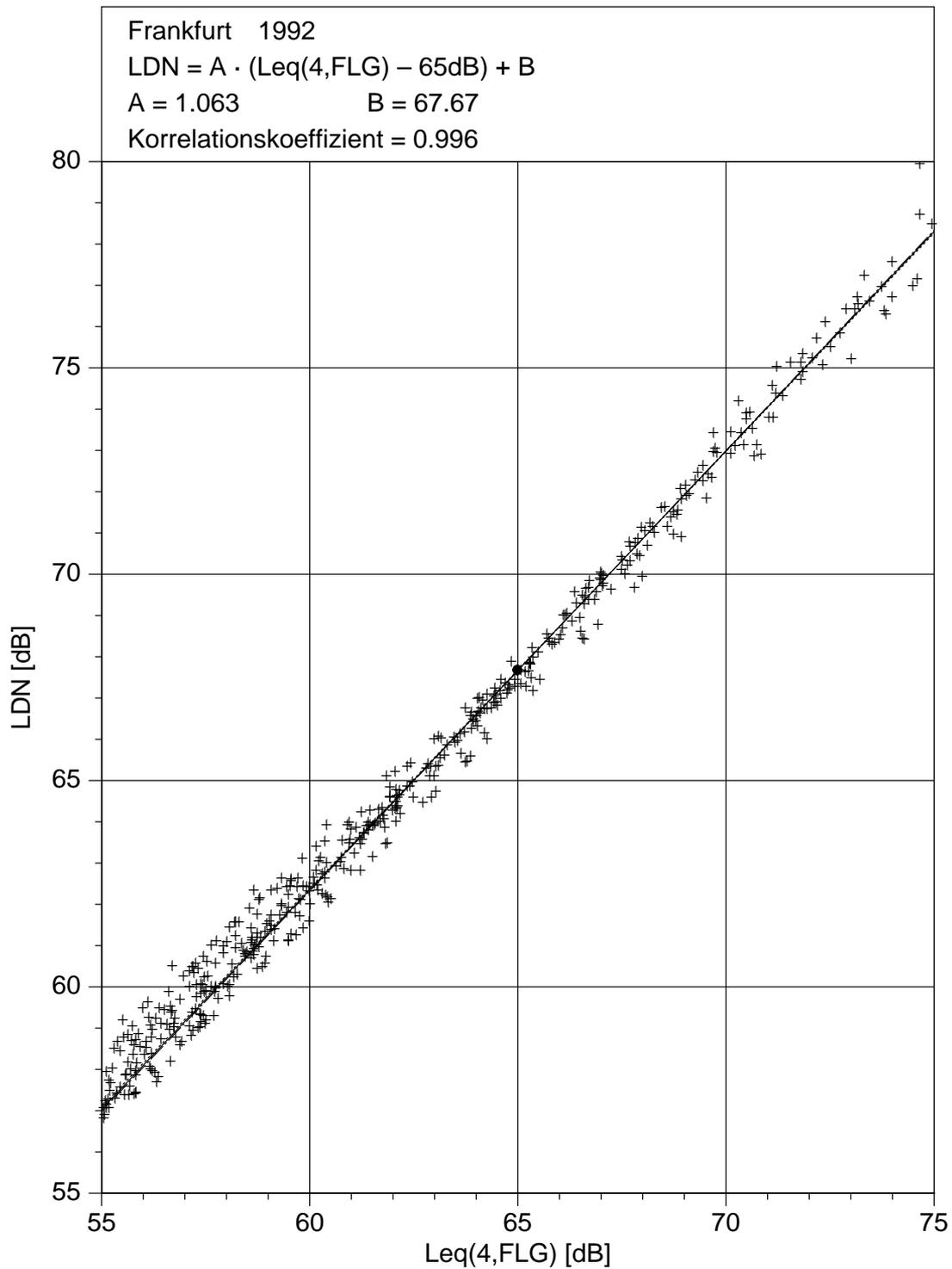


Abb.A-13: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq(4,FLG)}$ und L_{DN} für den Flugbetrieb Frankfurt 1992.

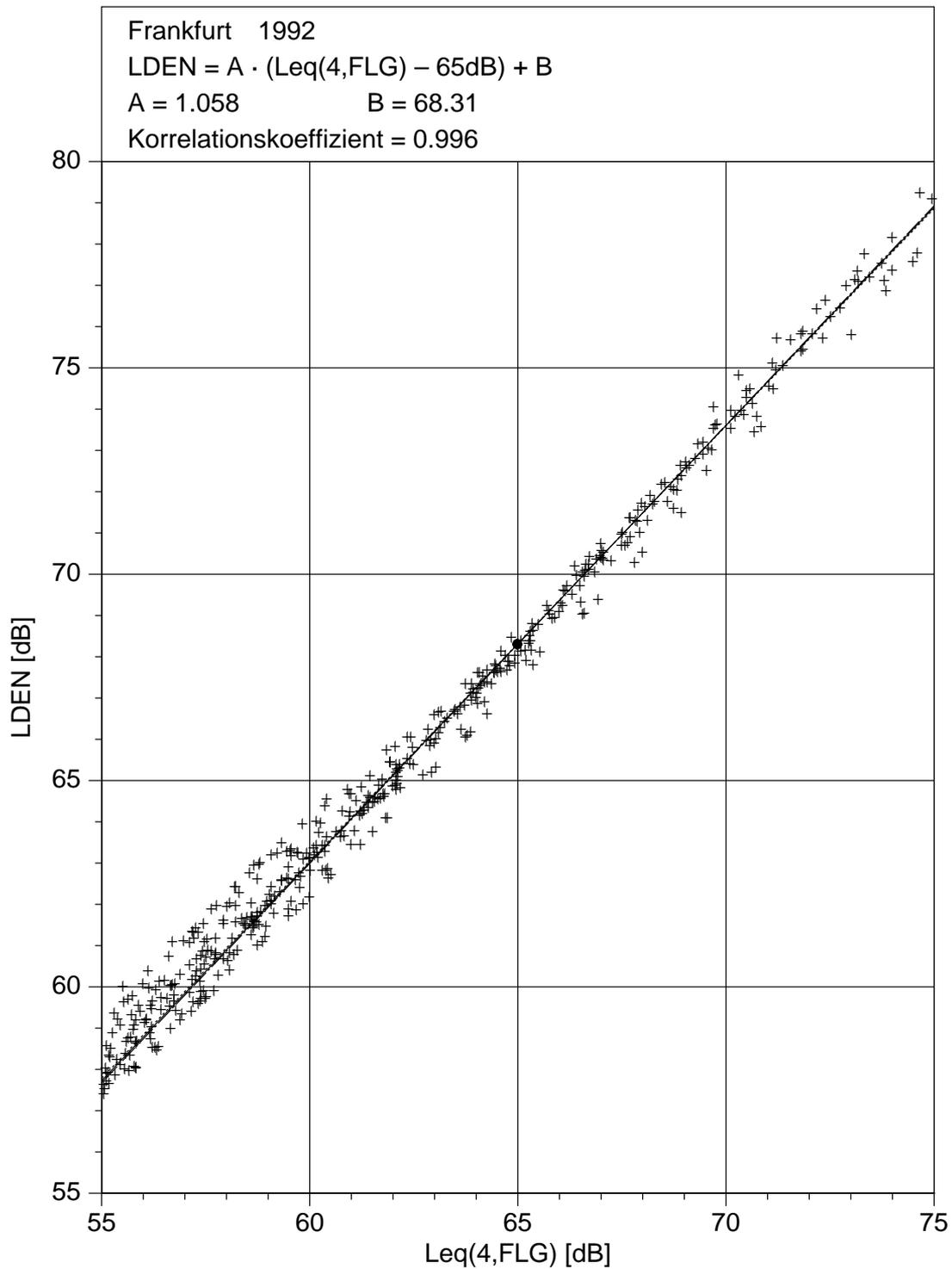


Abb.A-14: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq(4,FLG)}$ und L_{DEN} für den Flugbetrieb Frankfurt 1992.

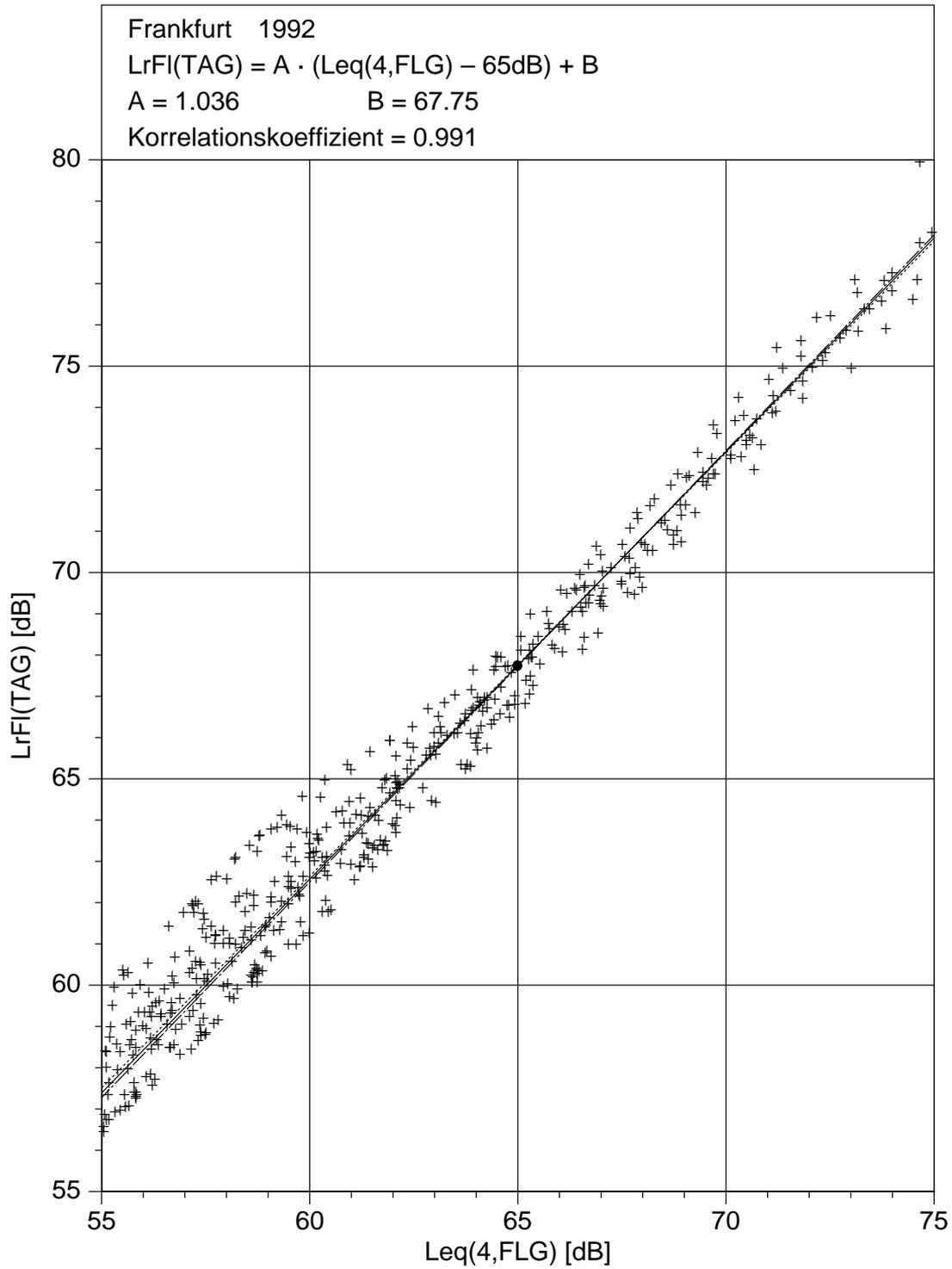


Abb.A-15: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und L_{rFl} für den Flugbetrieb Frankfurt 1992.

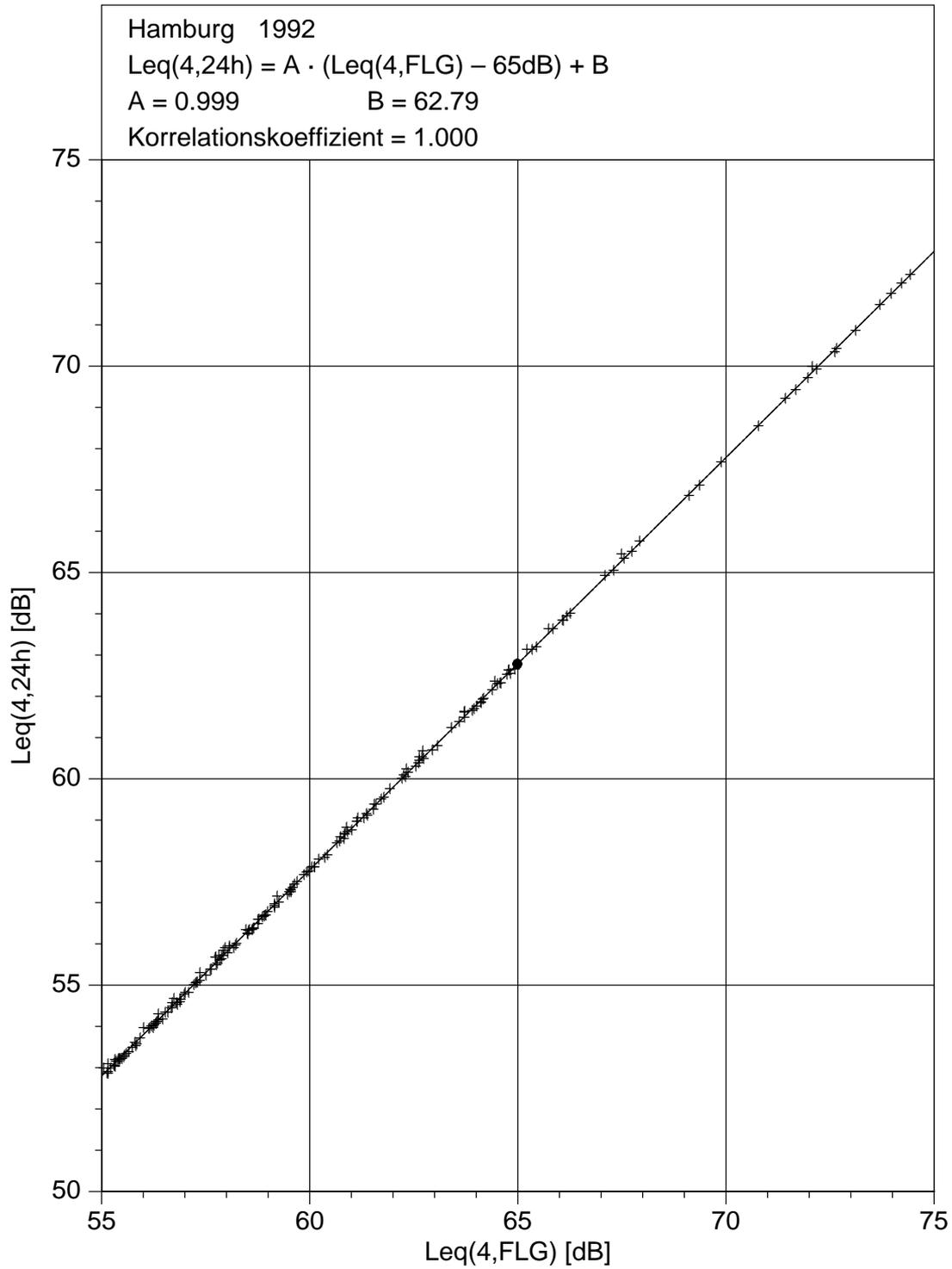


Abb.A-16: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und $L_{eq}(4,24h)$ für den Flugbetrieb Hamburg 1992.

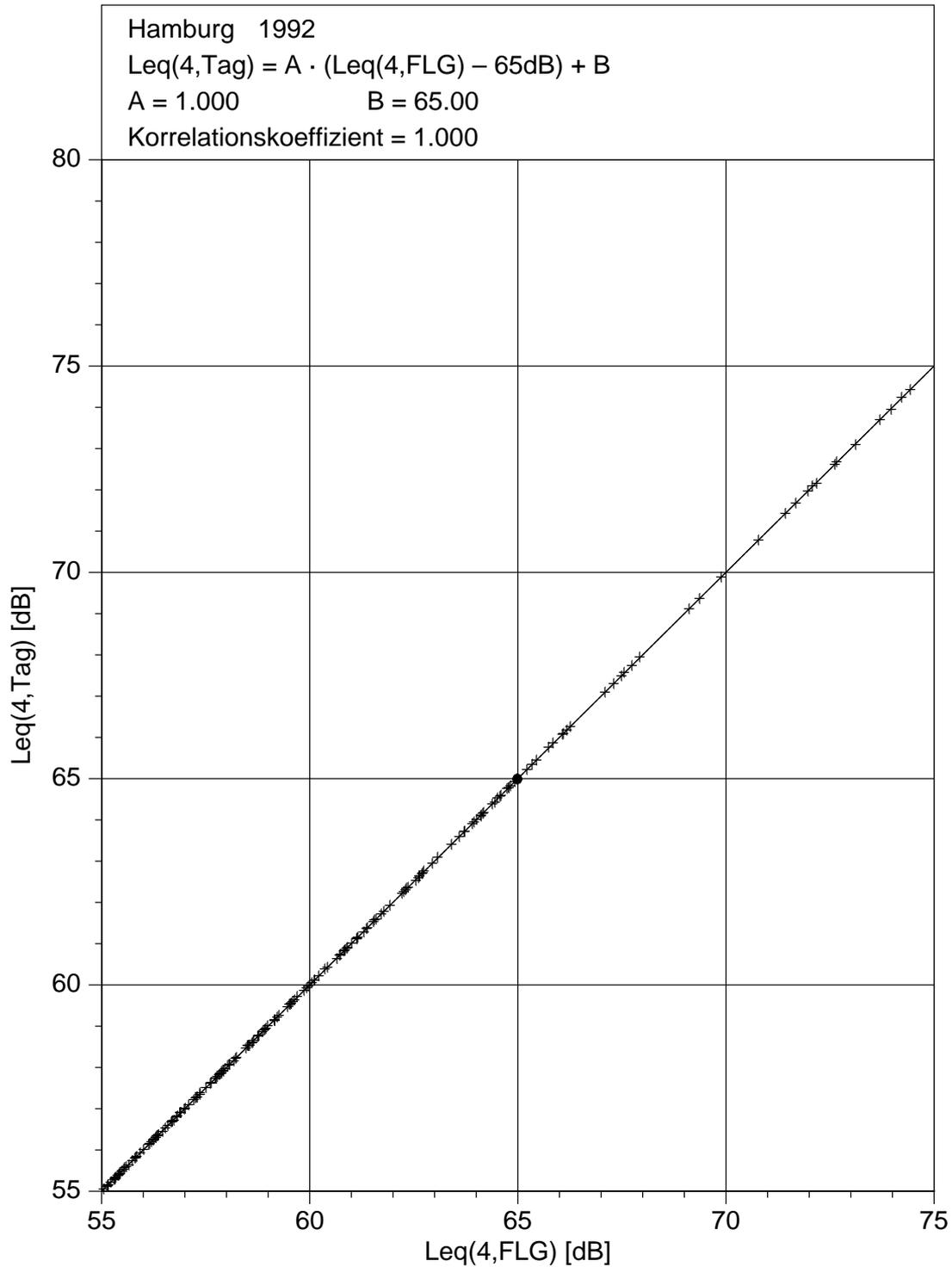


Abb.A-17: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und $L_{eq}(4,Tag)$ für den Flugbetrieb Hamburg 1992.

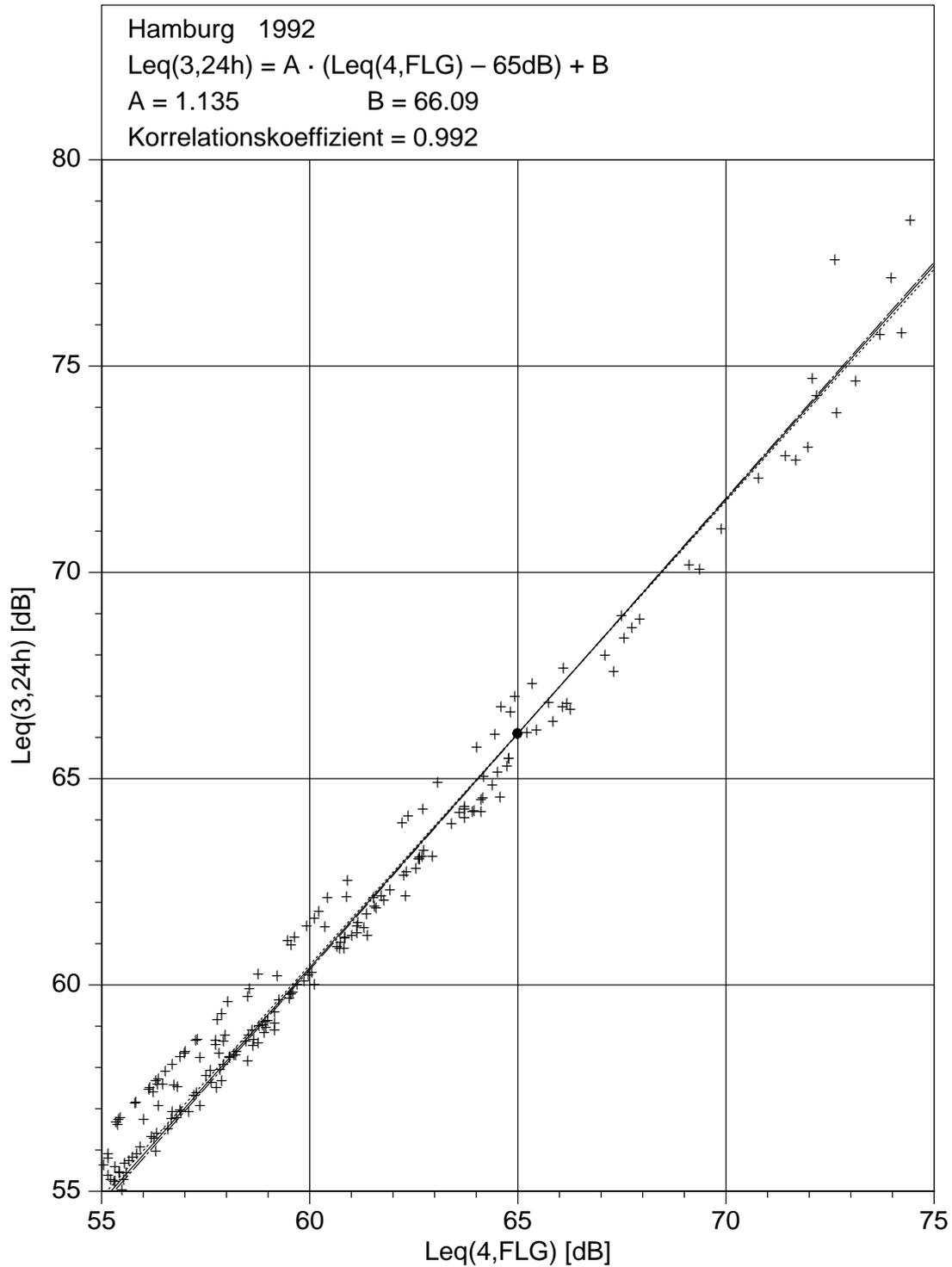


Abb.A-18: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und $L_{eq}(3,24h)$ für den Flugbetrieb Hamburg 1992.

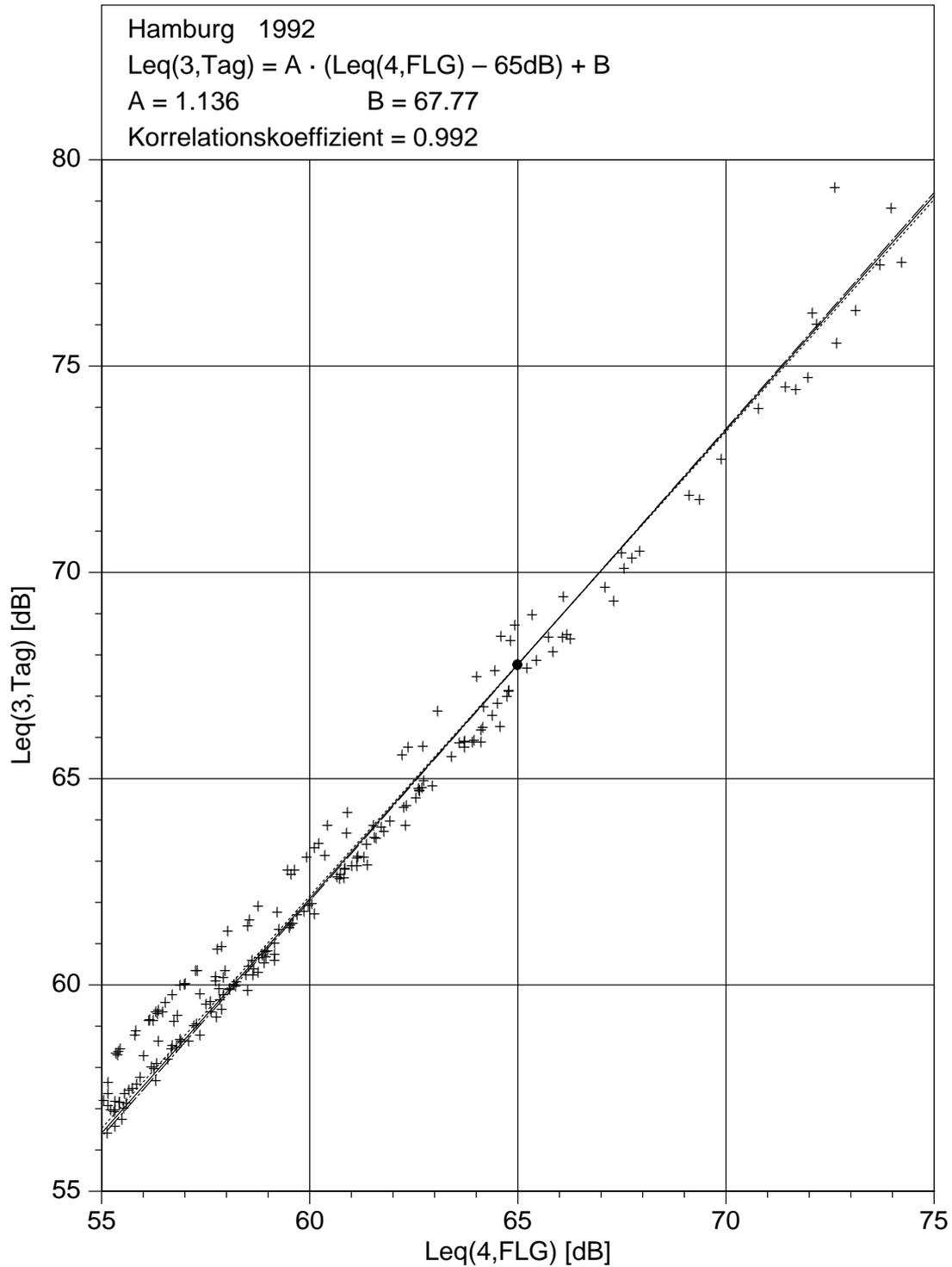


Abb.A-19: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und $L_{eq}(3,Tag)$ für den Flugbetrieb Hamburg 1992.

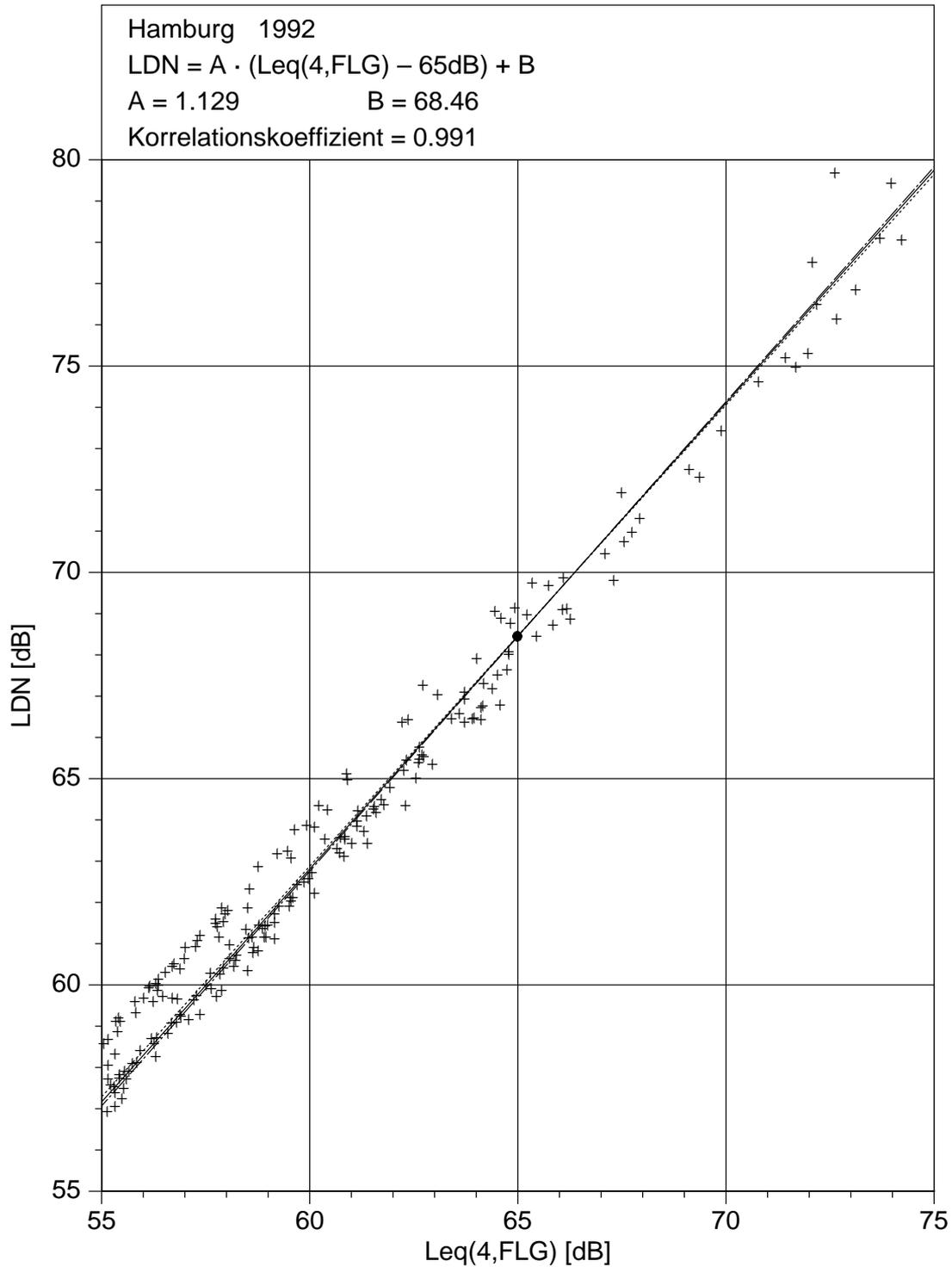


Abb.A-20: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq(4,FLG)}$ und L_{DN} für den Flugbetrieb Hamburg 1992.

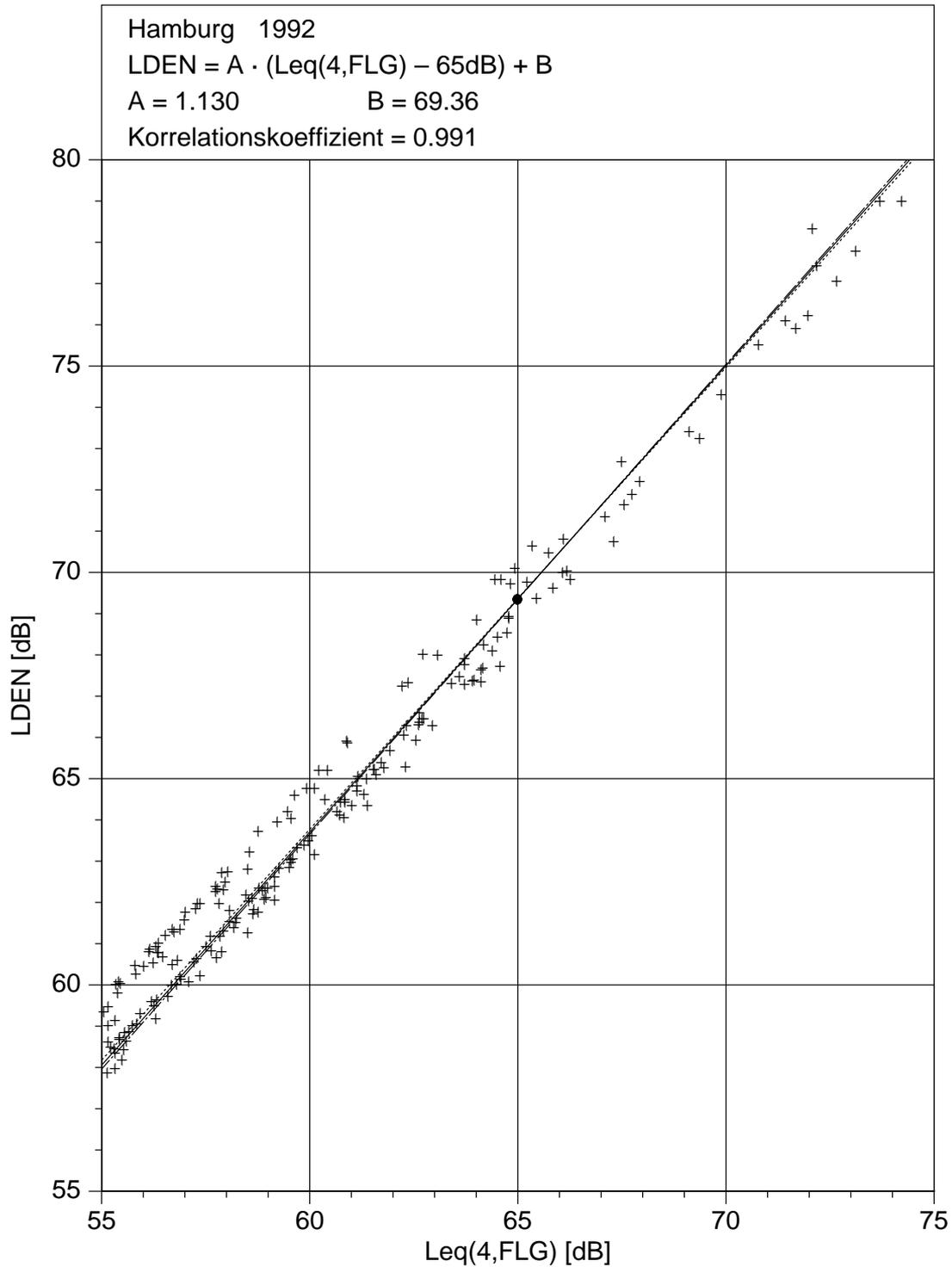


Abb.A-21: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq(4,FLG)}$ und L_{DEN} für den Flugbetrieb Hamburg 1992.

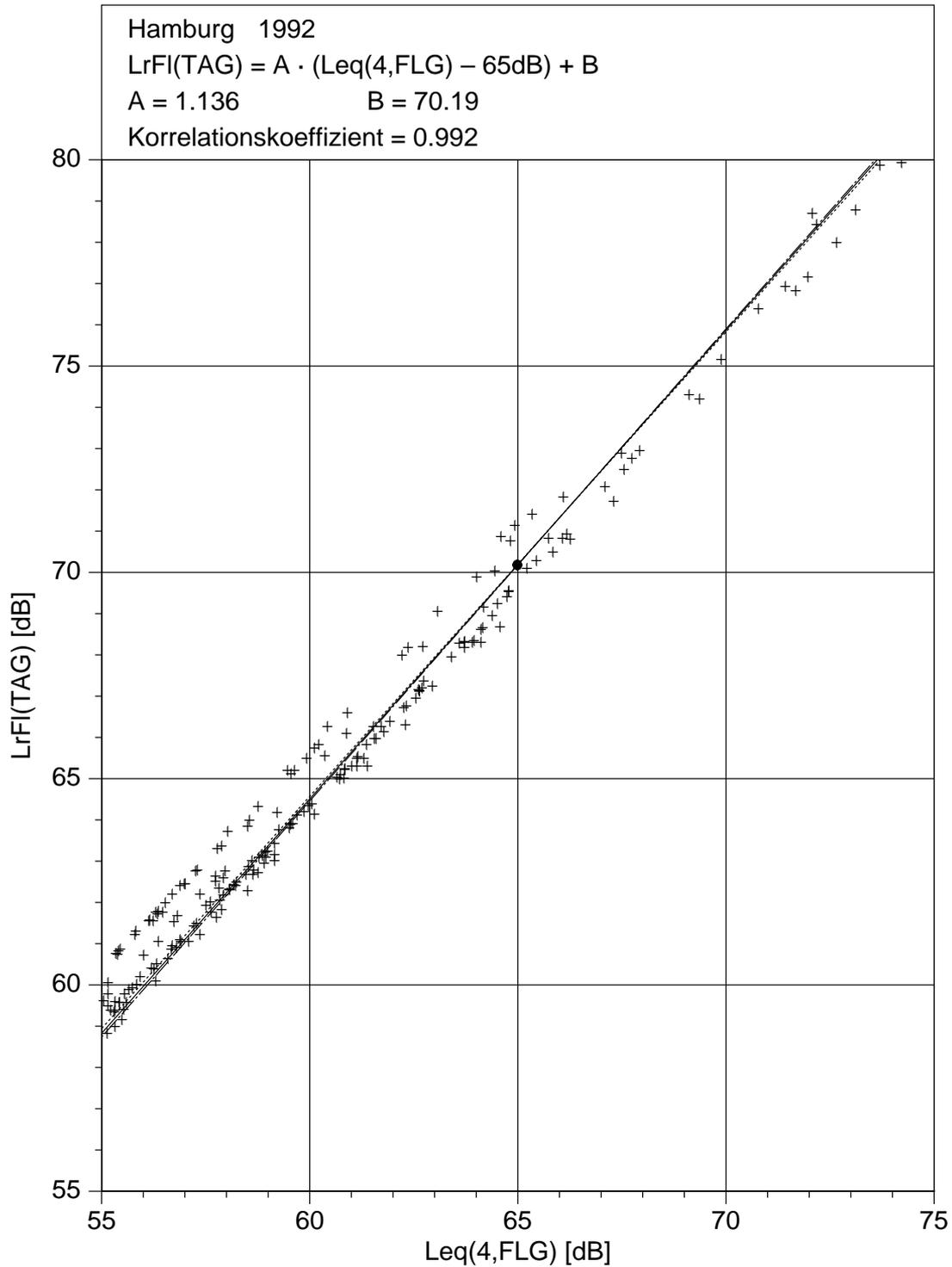


Abb.A-22: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und L_{rFl} für den Flugbetrieb Hamburg 1992.

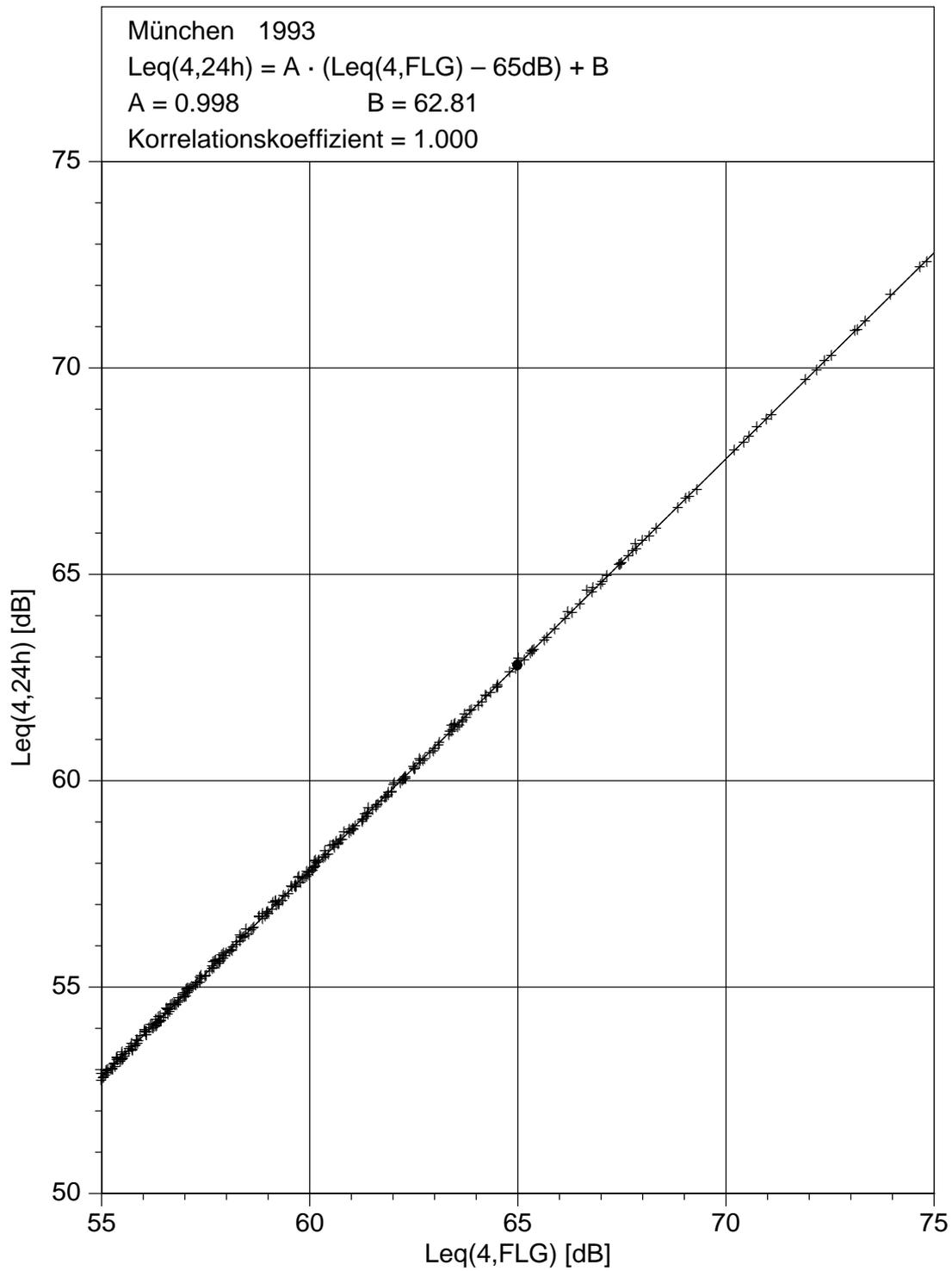


Abb.A-23: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und $L_{eq}(4,24h)$ für den Flugbetrieb München 1993.

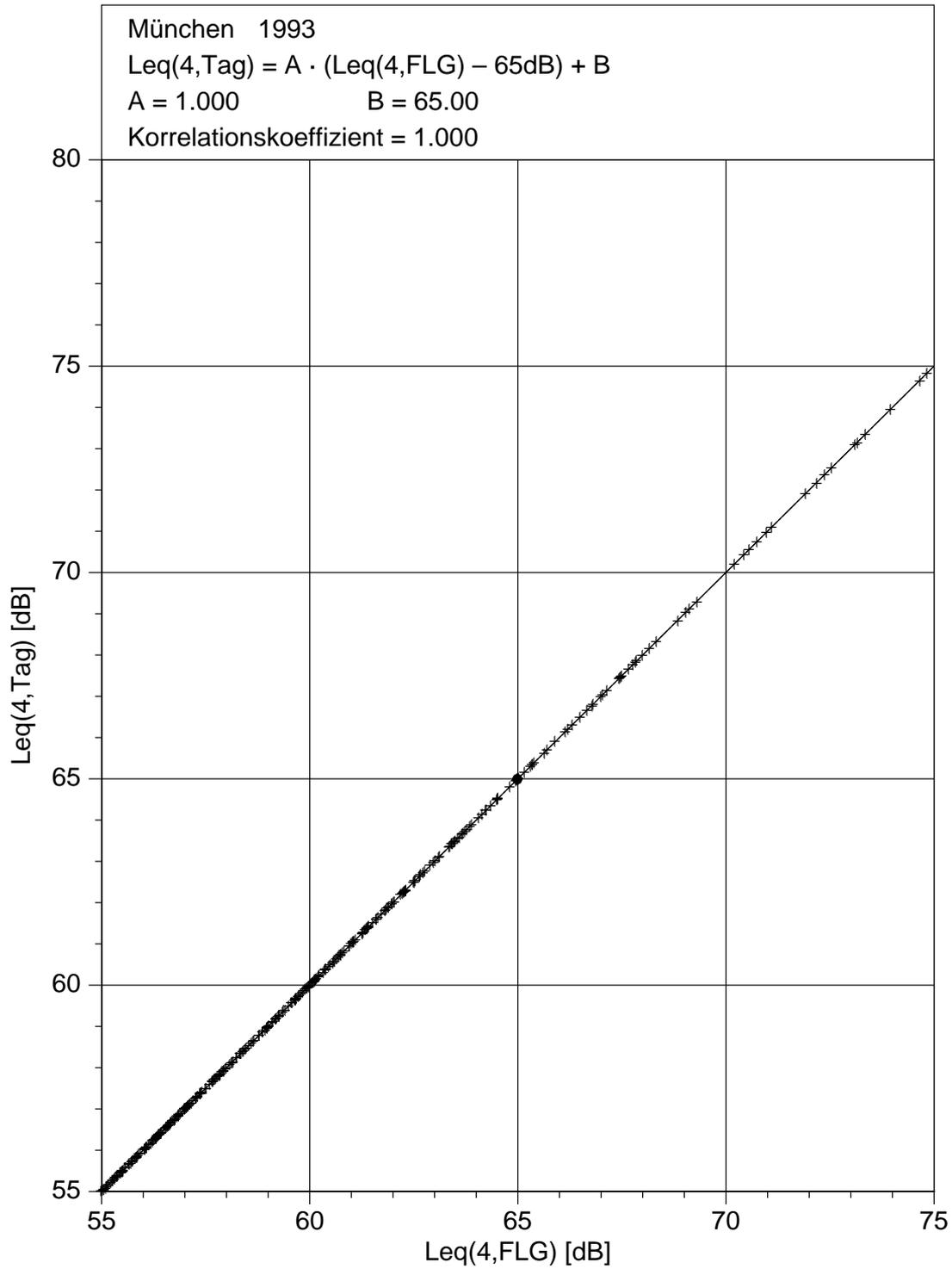


Abb.A-24: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und $L_{eq}(4,Tag)$ für den Flugbetrieb München 1993.

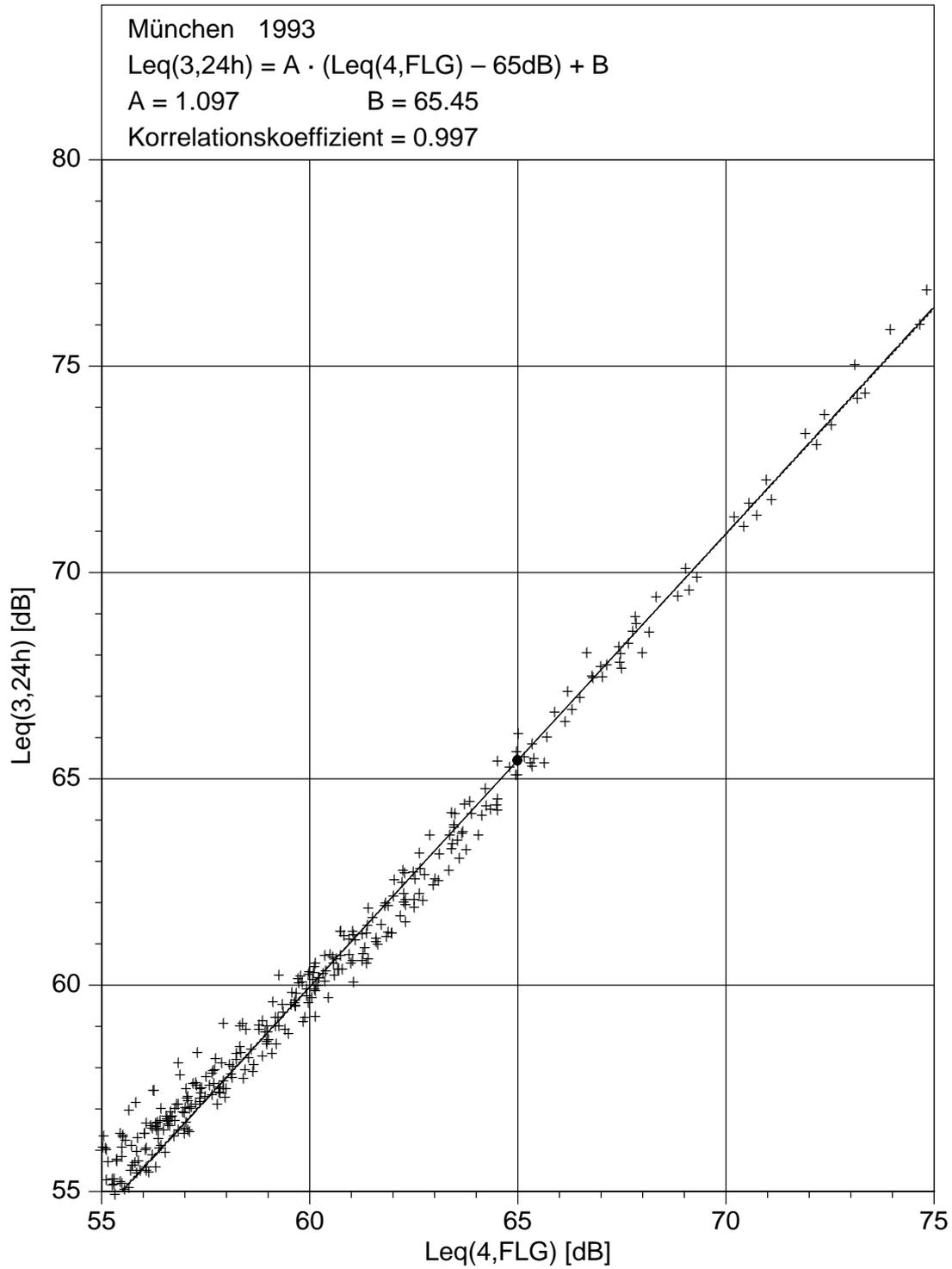


Abb.A-25: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und $L_{eq}(3,24h)$ für den Flugbetrieb München 1993.

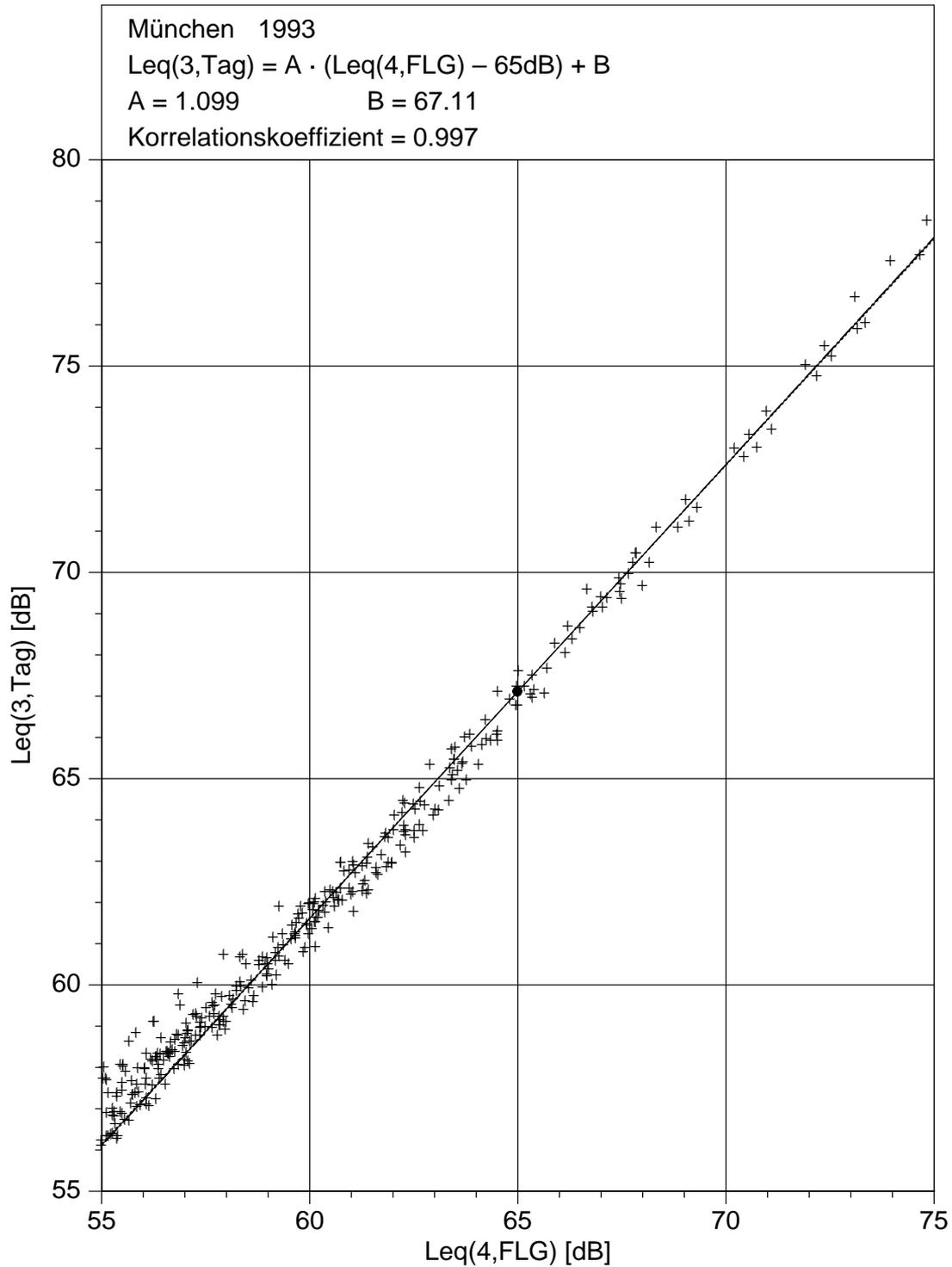


Abb.A-26: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und $L_{eq}(3,Tag)$ für den Flugbetrieb München 1993.

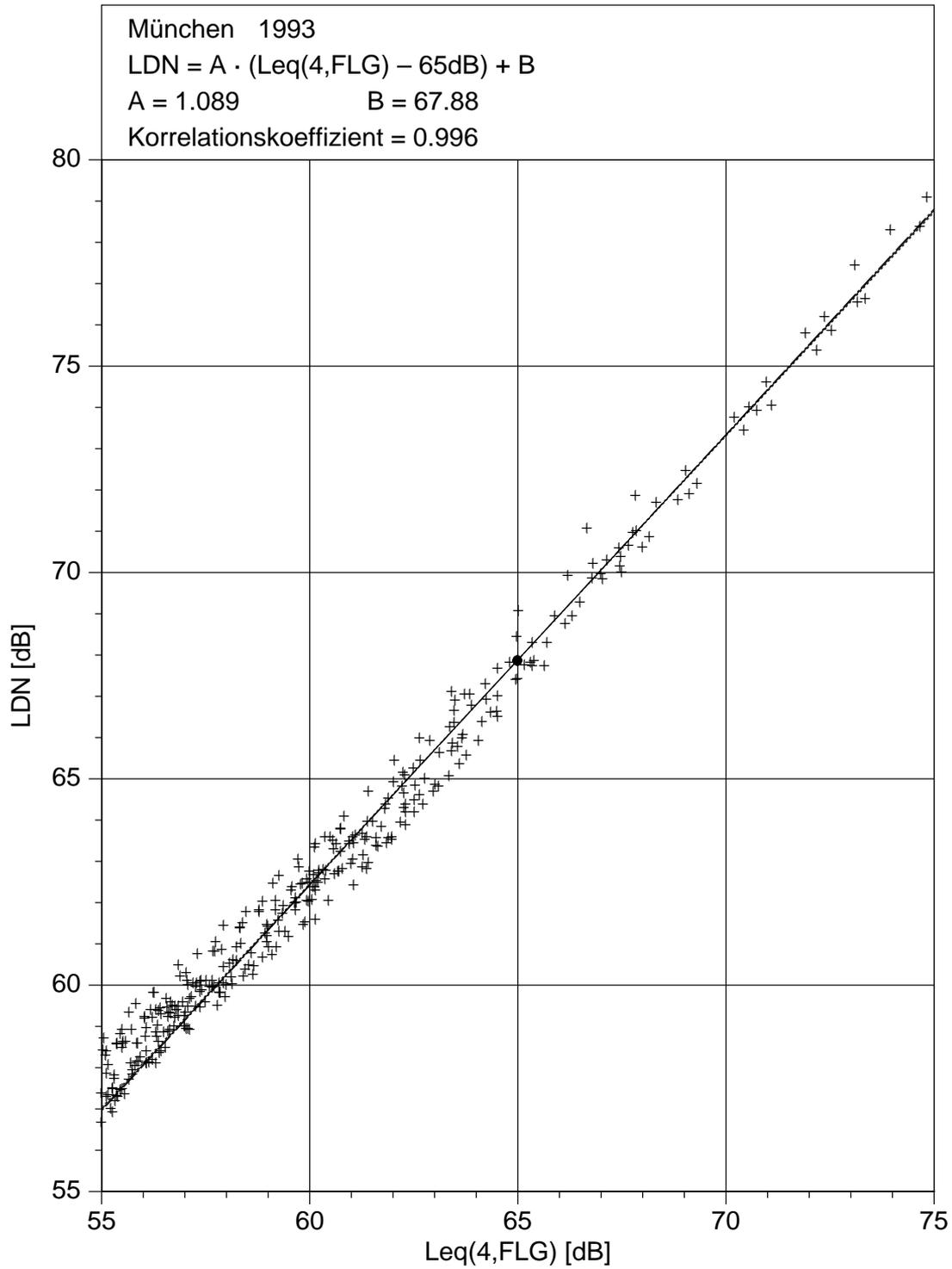


Abb.A-27: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq(4,FLG)}$ und L_{DN} für den Flugbetrieb München 1993.

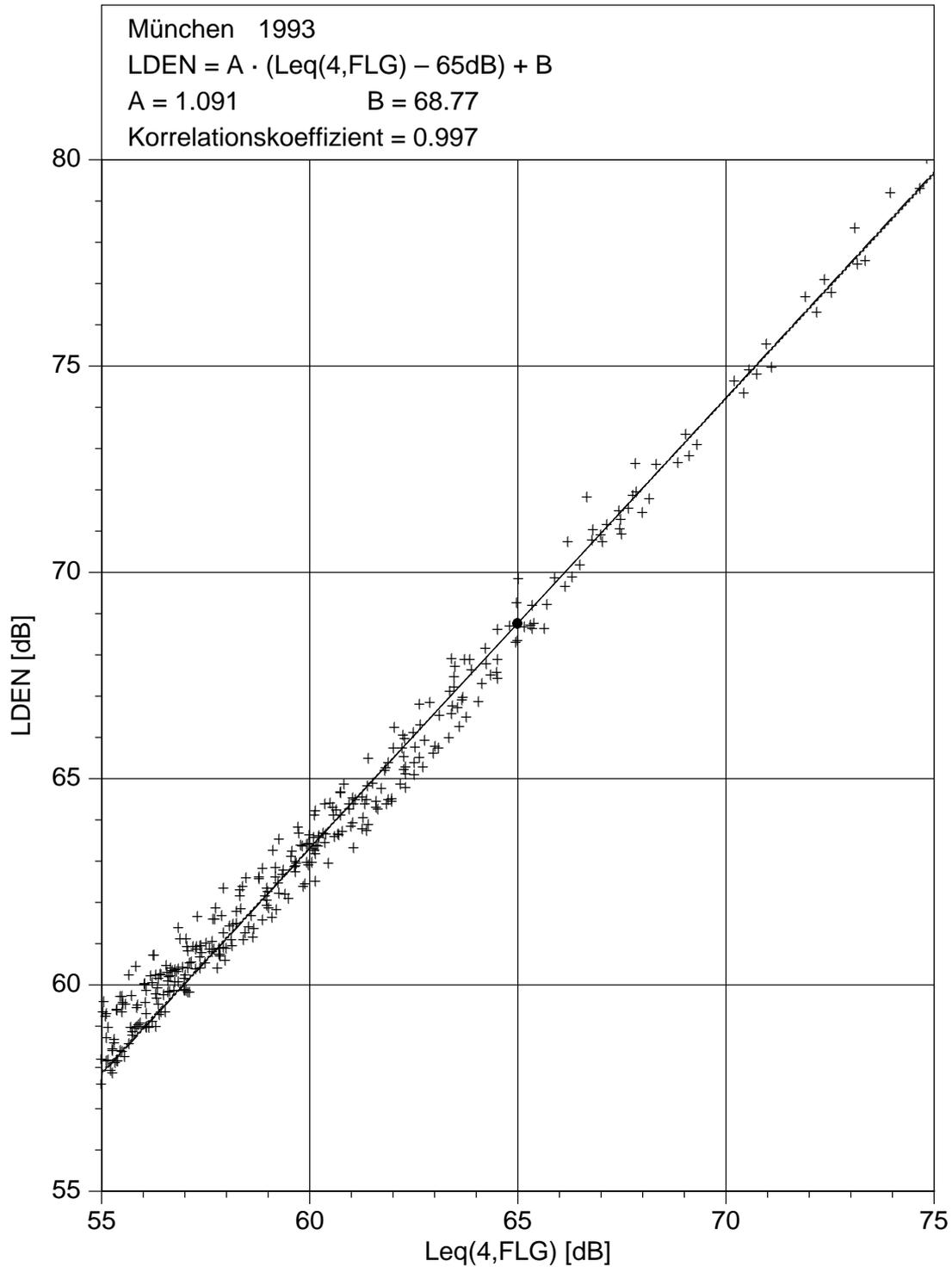


Abb.A-28: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq(4,FLG)}$ und L_{DEN} für den Flugbetrieb München 1993.

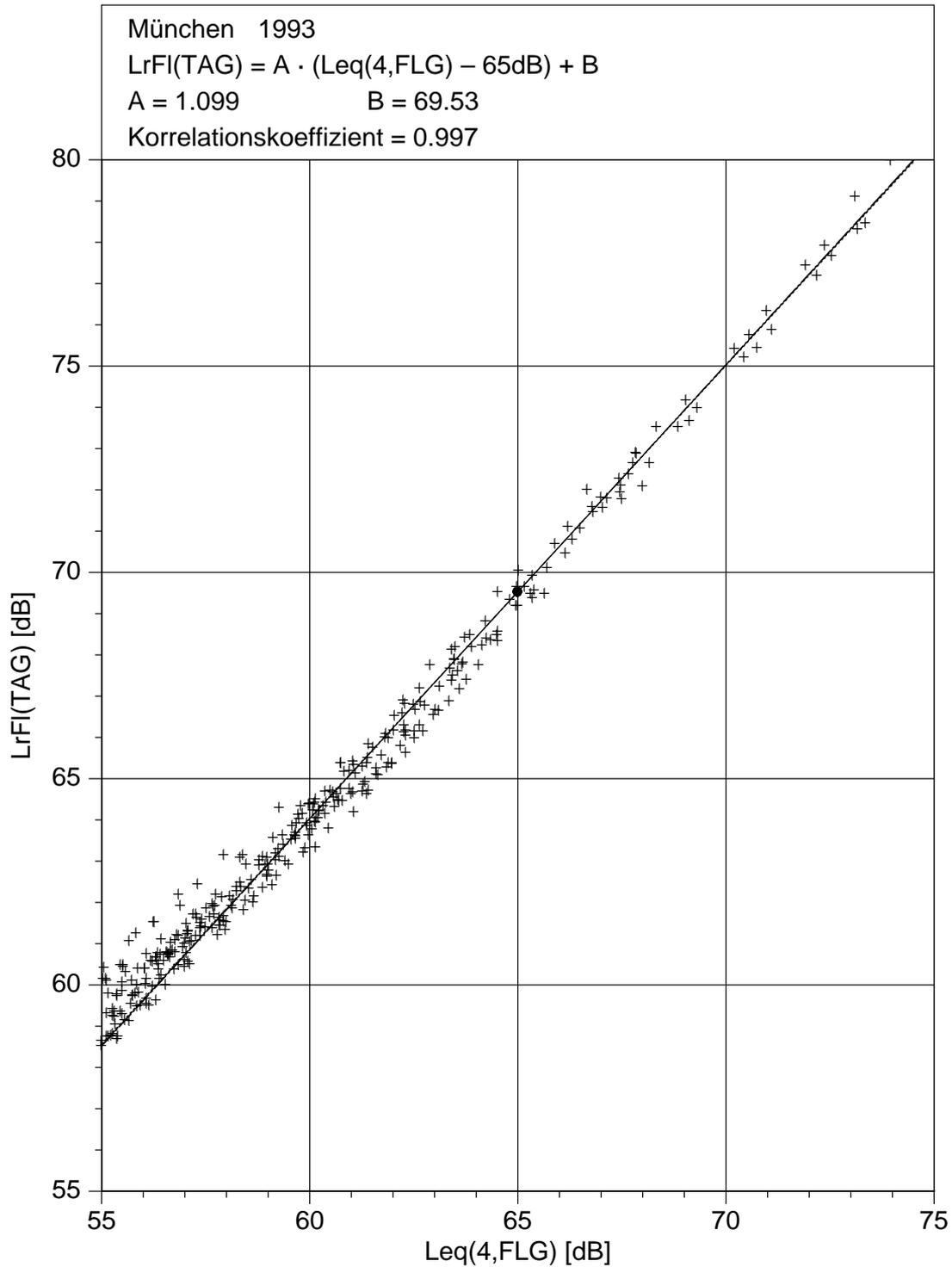


Abb.A-29: Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen $L_{eq}(4,FLG)$ und L_{rFl} für den Flugbetrieb München 1993.