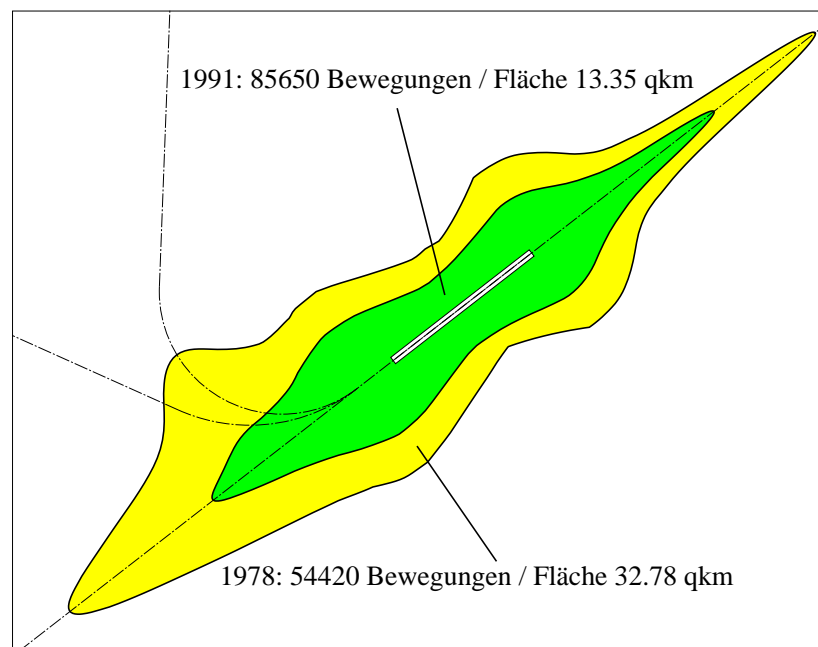


## Fluglärmrechnung und -prognose in Deutschland — eine Bestandsaufnahme nach mehr als 20 Jahren Praxis mit der AzB

### Die derzeitige Lärmsituation an zivilen Flughäfen

Fluglärm stellt nach wie vor ein umweltpolitisches Problem dar. Trotz der innerhalb der vergangenen Jahrzehnte erzielten Fortschritte in der Flugzeug- und Triebwerkstechnologie und des damit verbundenen starken Rückgangs der Lärmbelastung an zivilen Verkehrsflughäfen (siehe Bild 1) stellt der Lärm im direkten Umfeld dieser Flughäfen noch immer die maßgebliche mit dem Luftverkehr verknüpfte Umweltbelastung dar, insbesondere da er vom Menschen (im Gegensatz zu emittierten Schadstoffen) sensorisch direkt erfaßt und dem Flugverkehr zugeordnet werden kann.



**Bild 1:** Berechnete von den Kurven  $L_{eq} = 67$  dB umschlossene Flächen am Flughafen Düsseldorf für die Jahre 1978 und 1991. Startbahn und Flugstrecken sind zusätzlich eingetragen.

Es ist abzusehen, daß sich das Fluglärmproblem in der ersten Dekade des neuen Jahrtausends noch verschärfen wird: Zum Jahr 2002 müssen die relativ lauten Flugzeuge mit einem Lärmzeugnis nach ICAO Annex 16, Kap.2 — die schon wesentlich leiser als die Strahlflugzeuge der ersten Generation wie die B707 sind — ausgemustert werden. Derzeit beträgt der Prozentsatz dieser Flugzeuge an den im zivilen Luftverkehr eingesetzten Strahlflugzeugen an den deutschen Flughäfen in etwa noch 5 bis 10 Prozent. Die in den vergangenen Jahren erzielten Minderungen in der Lärmbelastung sind vor allem auf die schrittweise Ausmusterung dieser Flugzeuge zurückzuführen — ein Effekt, der den Einfluß der zunehmenden Verkehrszahlen überkompensieren konnte. Nach dem Jahr 2002 sind nur noch die leiseren, nach Kap.3 des Annex 16 zertifizierten Flugzeuge zugelassen. Da bei der gegenwärtigen Altersstruktur der Luftflotten abzusehen ist, daß sich der Flugzeugtypenmix in der nächsten Dekade nicht wesentlich ändern wird, werden die zunehmenden Bewegungszahlen zwangsläufig zu einem Wiederanstieg der Lärmbelastung führen. Der Einsatz noch leiserer Flugzeuge modernster Bauart (deren Entwicklung bereits begonnen hat) kann sich erst nach dieser Zeitperiode auswirken. Es ist noch offen, welcher Grad der Verbesserung in der Lärmemission

gegenüber den derzeit am Luftverkehr teilnehmenden Flugzeugmustern erzielt werden kann. Eine Reduktion der Fluglärmbelastung an zivilen Flughäfen ist kurz- und mittelfristig daher wohl nur vor allem auf operationeller Basis (verbesserte Flugverfahren und Flugverkehrsführung) zu erzielen. Fluglärmrechnungen werden deshalb in Zukunft auch weiterhin eine Rolle spielen, um das Fluglärmproblem zu minimieren.

### **Fluglärmparameter und ihre Verknüpfung**

Die Störwirkung eines einzelnen Vorbeifluggeräusches wird durch den am Immissionsort auftretenden zeitlichen Schallpegelverlauf bestimmt. Dieser läßt sich prinzipiell durch den auftretenden Maximalschallpegel sowie eine typische Einwirkzeit beschreiben (siehe Bild 2). Dem Schallpegelmaß liegt in der Regel eine dem menschlichen Geräuschempfinden angepaßte Frequenzbewertung (meist die A-Bewertung) zugrunde. Zusätzlich können ton- oder impulshaltiger Komponenten in die Bewertung mit einbezogen werden.

Maximalpegel und Dauer können auch zu einem sog. "Effektivpegel" kombiniert werden, der eine Näherung für den zeitlich integrierten Schallpegelverlauf (also im Prinzip die Schallenergie, mit der der Immissionsort durch dieses Geräusch beaufschlagt wird) darstellt.

In eine kumulative Betrachtung, wie sie bei der Ermittlung der Fluglärmbelastung in der Regel durchgeführt wird, gehen dann alle Fluglärmereignisse ein. Daraus wird im allgemeinen ein sog. "Fluglärmdeskriptor" ermittelt, der die längerfristige Lärmsituation am Immissionsort durch einen Einzahlwert charakterisiert. Der in Deutschland gebräuchliche Deskriptor ist der äquivalente Dauerschallpegel, wie er im Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm definiert ist (s.w.u).

Fluglärmdeskriptoren sind — im Gegensatz zu Maximalpegeln — sensorisch nicht erfassbar. Sie ergeben sich aber aus einer Berechnungsvorschrift, in die nur physikalisch meßbare Größen (Maximalpegel, Effektivpegel, Geräuschkdauer und -häufigkeit) eingehen, so daß sie meß- und auch rechen-technisch bestimmt werden können. Zu letzterem Zweck dienen Fluglärmrechnungsverfahren. Die meßtechnische Bestimmung von Fluglärmdeskriptoren kann natürlich nur für schon vergangene Flugbetriebsszenarien erfolgen. In der Regel wird dies an den deutschen Verkehrsflughäfen lokal durch Fluglärmmeßanlagen bewerkstelligt. Soll allerdings (z.B. zu Planungszwecken) die Belastung durch einen in der Zukunft zu erwartenden Flugbetrieb ermittelt werden, so ist man zwangsläufig auf die rechnerische Bestimmung angewiesen.

### **Fluglärmgesetz und äquivalenter Dauerschallpegel**

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  $L_{eq}$  einen Wert von 67 dB überschreitet. Dieser Bereich wird durch die Kurve  $L_{eq} = 75$  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.

Äquivalente Dauerschallpegel haben ganz allgemein die Form:

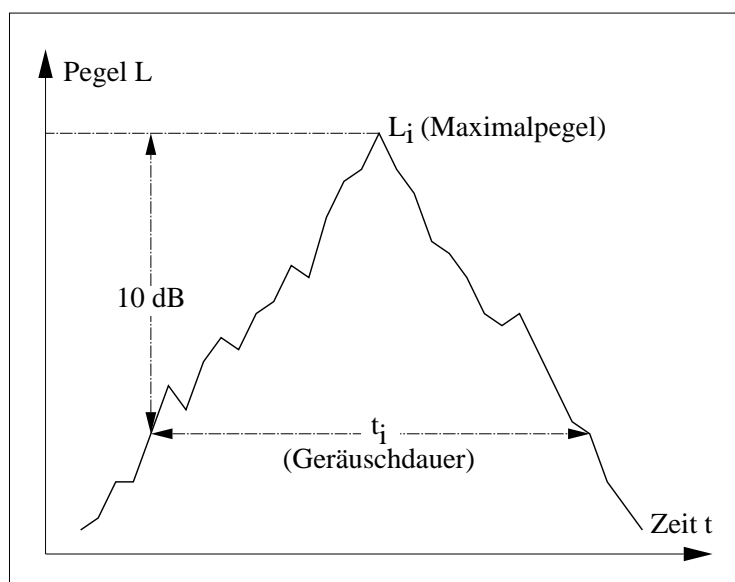
$$L_{eq} = k \cdot \lg \left( \sum_{i=1}^N g_i \cdot \frac{t_i}{T} \cdot 10^{L_i/k} \right) + C \quad [\text{dB}]$$

Sie werden an einem beliebigen Punkt in der Flughafenumgebung (Immissionsort) aus dem (bewerteten) Maximalschallpegel  $L_i$  sowie der Dauer  $t_i$  eines jeden Vorbeifluggeräusches (siehe Bild 2) ermittelt. Dabei werden alle  $N$  Geräusche berücksichtigt, die in den Bezugszeitraum  $T$  fallen. Die Größe  $k$  wird als "Äquivalenzparameter" bezeichnet, der Faktor  $g_i$  dient zur Wichtung für unterschiedliche Tageszeiten.  $C$  ist eine willkürliche Konstante.

Beim  $L_{eq}$  nach Fluglärngesetz wird der A-bewertete Schallpegel zugrunde gelegt. Der Äquivalenzparameter hat einen Wert von  $k = 13.3$ , was bedeutet, daß sich der  $L_{eq}$  bei einer Verdopplung der Geräuschkhäufigkeit um 4 dB erhöht. Die Konstante  $C$  ist Null, der Beurteilungszeitraum umfaßt die 6 verkehrsreichsten Monate eines Jahres. Nach obiger Formel sind mit

- a)  $g_i = 1.5$  für Tagflüge zwischen 6 und 22 Uhr  
 $g_i = 0$  für Nachtflüge zwischen 22 und 6 Uhr
- b)  $g_i = 1$  für Tagflüge zwischen 6 und 22 Uhr  
 $g_i = 5$  für Nachtflüge zwischen 22 und 6 Uhr

zwei äquivalente Dauerschallpegel zu ermitteln, deren höherer Wert den  $L_{eq}$  nach §2 des Fluglärngesetzes darstellt. Der Fall a) berücksichtigt also nur Tagesbewegungen, die durch den Faktor 1.5 auf 24 Stunden umgerechnet werden. Der Fall b) kommt bei einem höheren Anteil von Nachtbewegungen zum Tragen.



**Bild 2:** Schematischer zeitlicher Schallpegelverlauf  $L(t)$  zur Definition von Maximalpegel und Geräuschkdauer für die Berechnung eines  $L_{eq}$ .

Äquivalente Dauerschallpegel sind gängige Maße zur Bewertung von Fluglärm und weltweit in Gebrauch. Sie sind gut geeignet zur Beschreibung der mittleren Störwirkung über längere Zeiträume. International hat sich ein Äquivalenzparameter von  $k = 10$  durchgesetzt, der bei einer Verdopplung der Geräuschkhäufigkeit zu einer Erhöhung des  $L_{eq}$  um 3 dB führt ("Energieäquivalenz"). Allerdings sind die verschiedenen Formen des äquivalenten Dauerschallpegels hochgradig miteinander korreliert und mit guter Näherung ineinander umrechenbar, so daß aus wissenschaftlicher Sicht keine besondere Form vorzuziehen ist. Der Äquivalenzparameter  $k = 13.3$  des Fluglärngesetzes führt gegenüber dem Wert  $k = 10$  bei wachsendem Verkehrsaufkommen zu einer Verschärfung der Bewertung.

## AzB und DES

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 26, Nr.8 veröffentlicht. 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 Fluglärm Berechnung 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. 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 Mitte der 90er Jahre. Ein entsprechender Ergänzungsvorschlag, der den aktuellen Kenntnisstand widerspiegelt, liegt den zuständigen Bundesbehörden derzeit vor.

Um eine vollständige Fluglärm Berechnung 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 in eindeutiger Form beschrieben und gewährleistet, zusammen mit der streng definierten Rechenvorschrift der AzB, einen hohen Grad an Reproduzierbarkeit bei der Ermittlung von Lärmschutzbereichen.

### Die Berechnungsvorschrift nach AzB

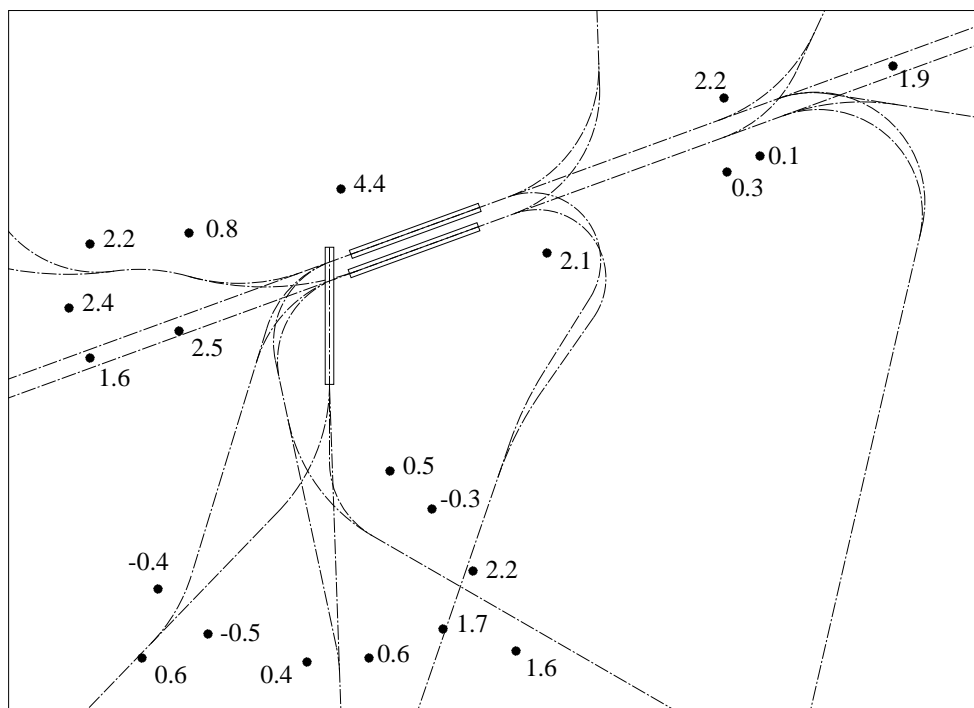
Beim AzB-Berechnungsverfahren ermittelt sich der Beitrag eines Vorbeifluges zum  $L_{eq}$  an einem vorgegebenen Immissionsort aus dem Maximalpegel sowie der Dauer des Vorbeifluggeräusches. Beide Größen werden für den kleinsten Vorbeiflugabstand berechnet. Dabei ist es unmaßgeblich, daß der Maximalpegel aufgrund der Richtcharakteristik des Flugzeugs in der Regel nicht bei dieser Konfiguration von Flugzeug und Immissionsort auftritt, da bei der Erstellung der AzB-Datensätze gerade eine entsprechende Geometrie zugrunde gelegt wird: Die der Berechnung des Maximalpegels zugrunde liegenden Oktavpegel sind auf den kleinsten Vorbeiflugabstand bezogen. Die Richtwirkung geht demgegenüber implizit in die Berechnung der Geräuschkdauer ein, die nach einer auf theoretischen Grundlagen erarbeiteten Näherungsformel aus Vorbeiflugabstand und der Fluggeschwindigkeit bestimmt wird. Die Parameter dieser Formel sind typenspezifisch in den AzB-Datenblättern der Flugzeugklassen aufgeführt.

Das AzB-Berechnungsverfahren beruht auf einem relativ einfachen Modell, das bei seiner Erarbeitung vor allem durch die seinerzeit zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten und Daten bestimmt wurde. Nichtsdestoweniger berücksichtigt es die wesentlichen physikalischen Einflüsse. Außerdem ist mit dem AzB-Verfahren 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 hat sich in der Praxis der Fluglärmprognose als sehr vorteilhaft erwiesen.

### Genauigkeit des AzB-Verfahrens

Beim Stand der heutigen Rechnertechnik wäre es prinzipiell ohne weiteres möglich, ein fortgeschrittenes Verfahren zu benutzen, das nach einem Simulationsprinzip arbeitet: Die Flugbahn wird dabei in einzelne Punkte zerlegt, an denen Fluggeschwindigkeit, Triebwerksleistung (und damit die Schallabstrahlungseigenschaften einschließlich der Richtwirkung) sowie die räumliche Orientierung des Flugzeugs bekannt sein müssen. Hiervon ausgehend kann dann am Immissionsort ein zeitlicher Schallpegelverlauf berechnet werden, der im Idealfall einem gemessenen Verlauf entspricht. Leider erfordert ein derartiges Verfahren sehr umfangreiche und genaue Eingabedaten. Diese sind in der Regel zwar bei den Flugzeugherstellern vorhanden, werden jedoch nicht zur Verfügung gestellt. Die Anwendung von Simulationsverfahren beschränkt sich daher z.Z. meist auf spezielle Probleme (z.B. Standläufe oder Einzelabschätzungen bei speziellen meteorologischen oder topographischen Bedingungen).



**Bild 3:** Differenz zwischen gemessenen und berechneten  $L_{eq}$ -Werten an den Messstellen des Flughafens Frankfurt für das Jahr 1995. Negative Werte bedeuten, daß der berechnete  $L_{eq}$  kleiner als der gemessene ist.

Demgegenüber hat die Praxis im Umgang mit dem AzB-Verfahren gezeigt, daß sich mit einem derartigen recht einfachen Modell — sofern nur die Eingabedaten sorgfältig gewählt werden — durchaus eine hohe globale Genauigkeit erreichen läßt. Damit ist gemeint, daß die für einen längeren Zeitraum berechneten äquivalenten Dauerschallpegel die während dieses Zeitraums tatsächlich gemessenen  $L_{eq}$ -Werte in der gesamten Umgebung des Flughafens im Mittel sehr gut wiedergeben. Allerdings können an exponierten Immissionsorten (z.B. in der Umgebung des Startrollpunktes)

durchaus größere Differenzen zwischen Rechnung und Messung auftreten. Die lokale Genauigkeit ist im allgemeinen also geringer als die globale Genauigkeit.

In der Regel sind gemessene Werte jedoch auch lokal mit einer Genauigkeit von etwa 2 dB reproduzierbar. Bild 3 zeigt die Resultate von Vergleichsberechnungen mit den neu für die AzB vorgeschlagenen Datensätzen für die  $L_{eq}$ -Werte an den Meßstellen der Fluglärmüberwachungsanlage am Frankfurter Flughafen für das Jahr 1995.

### **Die AzB im internationalen Umfeld**

Fast alle international gebräuchlichen Fluglärmerechnungsverfahren sind ähnlich aufgebaut wie die AzB: Sie beruhen auf einer Berechnung von Maximal- oder Effektivpegeln für den geringsten Vorbeiflugabstand. Die einzelnen Rechenvorschriften unterscheiden sich hauptsächlich in der Behandlung von Ausbreitungseffekten bei bodennaher Schallausbreitung und der Berücksichtigung gekrümmter Flugbahngeometrien. Wesentliche Unterschiede bestehen in der Regel jedoch in Qualität und Umfang der Datengrundlagen.

Das wohl weltweit gebräuchlichste Berechnungsverfahren ist das Integrated Noise Model INM, das von der amerikanischen Bundesluftfahrtbehörde FAA entwickelt wurde und seit 1982 vertrieben wird. Es besitzt eine umfangreiche Datengrundlage (mehr als 250 Kombinationen von Flugzeugtyp und Ab- bzw. Anfluggewicht), deren Qualität allerdings in den letzten Jahren — nicht zu Unrecht — vielfach angezweifelt wurde. Der derzeit vorliegende Ergänzungsvorschlag zur AzB geht von einer Einteilung in etwa 20 Gruppen aus, was ihn wesentlich geeigneter für Prognosezwecke als das INM macht. Außerdem ist die Datengrundlage besser überprüft: Zu ihrer Erarbeitung wurden mehrere Hunderttausend Messungen von Fluglärmüberwachungsanlagen an verschiedenen deutschen Verkehrsflughäfen herangezogen. Derartig umfangreiche Validierungsmaßnahmen sind im internationalen Umfeld eher selten.

Viele der international gebräuchlichen Berechnungsverfahren sind schon über viele Jahre im Gebrauch: Das niederländische Verfahren (das in weiten Bereichen identisch mit der AzB ist) wird seit mehr als 20 Jahren unverändert benutzt, das englische ANCON-Verfahren ist seit über 30 Jahren, das französische DIAPASPON-Verfahren seit etwa 20 Jahren in Gebrauch. Zwar sind diese Modelle oft überarbeitet worden, derartige Revisionen bezogen sich in der Regel aber auf die Datengrundlagen oder auf Verfeinerungen bei der Modellierung spezieller Einflußfaktoren. Die AzB-ähnliche Grundstruktur der Modelle blieb im wesentlichen erhalten.

Eine Ausnahme bildet das in der Schweiz vor etwa 10 Jahren entwickelte FLULA2-Modell, das auf einem Simulationsverfahren beruht. Die damit gemachten Erfahrungen sind gut, allerdings werden hohe Anforderungen an die Datengrundlage gestellt. Letztere basiert im wesentlichen auf umfangreichen Messungen am Züricher Flughafen. Ob diese spezielle Datengrundlage ausreichend für eine Erweiterung auf beliebige Flughäfen ist, müßte noch überprüft werden. Tendenziell ist im internationalen Bereich die Einstellung gegenüber Simulationsverfahren eher zurückhaltend.

### **Ist die AzB renovierungsbedürftig ?**

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. Insbesondere ist die AzB auf die Behandlung prognostizierter Flugbetriebsszenarien zugeschnitten (einfache Form der Flugstreckenbeschreibung,

überschau- und handhabbare Flugzeuggruppeneinteilung). Aufgrund der klar definierten Rechenvorschrift und der im DES streng vorgegebenen Datenformate sind nach dem AzB-Verfahren ermittelte Ergebnisse sehr gut reproduzierbar und daher als Grundlage planungsrechtlicher Entscheidungen geeignet. Nicht geeignet ist die AzB zur Beschreibung einzelner Schallereignisse — wozu sie häufig mißbraucht wird. Das war allerdings auch nicht die Zielsetzung bei ihrer Erarbeitung.

Nichtsdestoweniger könnte die AzB (wie alle derzeit gebräuchlichen Rechenverfahren) in einigen Punkten verbessert werden. Dies betrifft insbesondere die Berechnungen im Einflußbereich gekrümmter Flugstrecken. Eine wesentliche Erhöhung der globalen Genauigkeit dürfte allerdings nicht zu erwarten sein. Demgegenüber steht — bei Verwendung eines ungeänderten Berechnungsformalismus — eine Vergleichbarkeit der Rechenergebnisse über längere Zeiträume, was unter Berücksichtigung planerischer Aspekte von Vorteil ist.

Notwendig ist allerdings eine regelmäßige Überarbeitung der Datengrundlage, da deren Qualität die Genauigkeit der Rechenergebnisse wesentlich stärker als das Rechenverfahren selbst bestimmt. 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.

Zusammenfassend kann man 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 Fluglärmrechnung dar, das auch Vergleiche im internationalen Umfeld nicht zu scheuen braucht.