

## Leiser Flugverkehr II – Abschlussveranstaltung Hauptarbeitspaket 4B – Lärmprognoseverfahren

**U. Isermann, U. Binder, O. Boguhn, R. Schmid**

**DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Göttingen**

(korrigierte Version vom 22.10.2007)



Abschlussveranstaltung LFVK II, Göttingen, 17.09.2007, Folie 1

Im HGF/DLR-Projekt „Leiser Flugverkehr“ wurde ein auf einer Simulationstechnik basierendes Verfahren zur rechnerischen Fluglärmprognose (SIMUL) entwickelt, das die maßgeblichen physikalischen Effekte bei der Schallemission und Schallausbreitung berücksichtigt.

Anwendungsbereiche des Verfahrens sind z.B. die Optimierung von lärmarmen Flugverfahren sowie Immissionsberechnungen für spezielle Ausbreitungssituationen. Insbesondere können Untersuchungen mit dem SIMUL-Verfahren dazu herangezogen werden, konventionelle Rechenverfahren zu verbessern.

Im Rahmen des Folgeprojekts „Leiser Flugverkehr II“ wurde im Hauptarbeitspaket 4B das SIMUL-Verfahren vor allem zur Analyse spezieller Problemstellungen, die von konventionellen Verfahren nur pauschal berücksichtigt wurden, herangezogen. Der Einsatz bei der Entwicklung lärmarmen Flugverfahren erfolgte parallel dazu im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Projekts „Lärmarme An- und Abflugverfahren LAnAb“.

Ansprechpartner:

Dr. Ullrich Isermann  
DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik  
Abt. Technische Strömungen  
Bunsenstrasse 10  
37073 Göttingen  
Tel. 0551 709 2255  
Fax. 0551 709 2581  
E-Mail: ullrich.isermann@dlr.de

## Im HAP 4B bearbeitete Problemstellungen

- Langzeiteinfluss von typischen Wettersituationen
- Atmosphärische Dämpfung und Schallausbreitung aus großen Höhen
- Modellierung von bodengebundenen Operationen
- Praktikabilität von Lärmbewertungsmaßen
- Modellierung von Flugbahntrajektorien

## Unterschiede zum „Leisen Flugverkehr I“

- Bearbeitung praxisorientierter Problemstellungen (z.B. hinsichtlich AzB)
- Einsatz des in LFVK I erarbeiteten Rechenprogramms SIMUL als Werkzeug

## Enge Verknüpfung der Aktivitäten zum BMBF-Vorhaben LAnAb !

Im Hauptarbeitspaket 4B wurden folgende Problemstellungen bearbeitet:

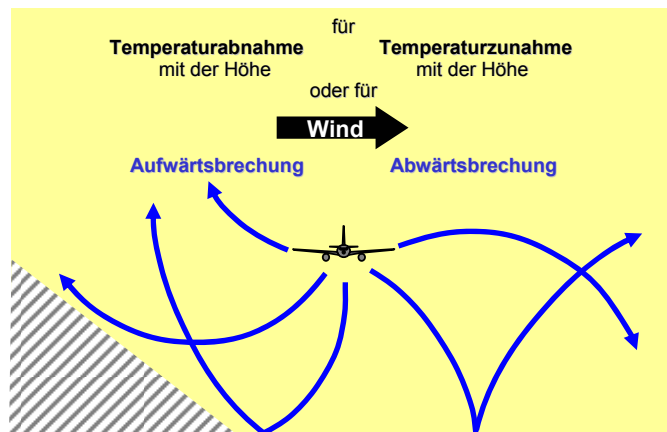
- Es sollte der Einfluss der langjährigen Wettersituation auf die Schallimmission modelliert und mit den bei konventionellen Rechenverfahren getroffenen Standardannahmen verglichen werden.
- Der Einfluss der atmosphärischen Dämpfung unter realen atmosphärischen Bedingungen sollte analysiert und mit den in konventionellen Rechenverfahren verwendeten Standardannahmen verglichen werden. Unter anderem sollten auch Effekte bei der Schallausbreitung aus großen Höhen untersucht werden.
- Das SIMUL-Verfahren sollte auf bodengebundene Operationen wie Umkehrschub, Rollvorgänge, Betrieb von Hilfstriebwerken (APU) und Triebwerksprobeläufe erweitert werden. Hierzu war auch eine Messkampagne geplant.
- Es sollten grundlegende Untersuchungen zur Praktikabilität (also insbesondere Mess- und Berechenbarkeit) von Lärmbewertungsmaßen durchgeführt werden. Dies geschah in enger Zusammenarbeit mit dem Hauptarbeitspaket zur Lärmwirkungsforschung.
- Die letzte Teilaufgabe betraf die Modellierung von realen Flugbahntrajektorien und hier insbesondere Verfahren zur Auswertung von Radardaten. Hierzu wurden nur grundlegende Untersuchungen durchgeführt – diese Thematik wird in Zukunft in einer Kooperation mit der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt EMPA durchgeführt (Projekt AVINO).

Insgesamt waren die Aufgabenstellungen also stark praxisorientiert – das SIMUL-Programm sollte hier erstmalig in größerem Umfang als Werkzeug eingesetzt werden. Insbesondere waren die Untersuchungen auch an Problemstellungen orientiert, die bei einer Fortschreibung der Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen (AzB) abzusehen waren.

Die Arbeiten waren eng verknüpft zu den Aktivitäten im BMWi-Vorhaben LAnAb, in dem SIMUL zur Optimierung von Flugverfahren eingesetzt und auch messtechnisch validiert wurde.

## Problemstellung

- Temperaturgradienten und Wind beeinflussen die Schallausbreitung.
- Sie variieren tages- und jahreszeitlich z.T. beträchtlich.



**Konventionelle Rechenverfahren (AzB) berücksichtigen diese Einflüsse nicht – in welcher Größenordnung liegen die Abweichungen im Jahresmittel ?**

Temperaturgradienten und Wind beeinflussen die Schallausbreitung z.T. beträchtlich. Geht man von einem Strahlenmodell für die Schallausbreitung aus, äußert sich der Einfluss der Meteorologie in gekrümmten Schallstrahlenverläufen, die entweder zu Aufwärtsbrechung und der Bildung von akustischen Schattenzonen, oder aber zur Abwärtsbrechung führen. Durch letzteren Effekt kann Schall in Bodennähe über große Distanzen und sogar über Hindernisse transportiert werden (z.B. bei Inversionswetterlagen).

Die meteorologischen Bedingungen variieren sowohl tages- als auch jahreszeitlich beträchtlich. Konventionelle Fluglärmrechnungsverfahren wie die AzB berücksichtigen diese Einflüsse nicht. Sie gehen in der Regel von einer isothermen Atmosphäre ohne Wind aus. Ziel der Untersuchungen war es, herauszufinden, zu welchen Abweichungen diese Annahmen gegenüber einer detaillierten Berücksichtigung der Meteorologie führen. Von besonderer Bedeutung sind die auf eine Jahres- oder Halbjahresmittel bezogenen Abweichungen, da konventionelle Rechenverfahren zur Ermittlung der Schallimmissionen über längere Zeiträume herangezogen werden.

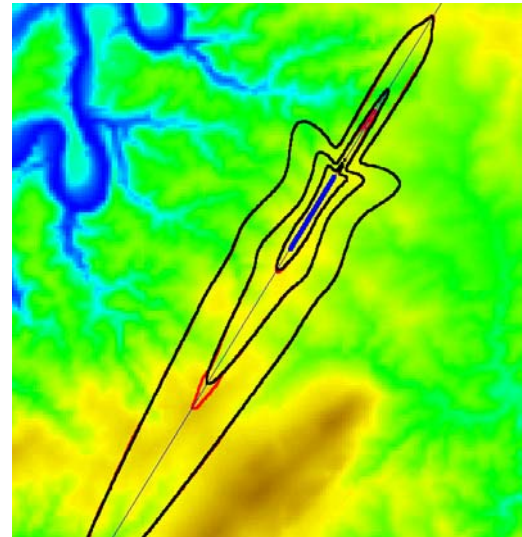
## Flughafen Hahn – Referenzjahr 2001

### Auswertung von AKTERM-Daten des DWD

- Stündliche Erfassung von Windgeschwindigkeit und –richtung sowie Stabilitätsklasse
- 12 Wetterkategorien
- Analyse der Windrichtungsverteilung und Stabilitätsklassen im Jahresgang

### Immissionsberechnungen mit SIMUL

- Ausbreitungsmodell DLR-IPA
- keine Topografie berücksichtigt
- Einfluss auf Flugleistungen ignoriert



Die Analysen erfolgten auf der Basis von Wetterdaten aus dem Jahr 2001 für den Flughafen Hahn. Diese vom Deutschen Wetterdienst gelieferten AKTERM-Daten umfassten stündliche Werte für Windgeschwindigkeit und –richtung sowie für die meteorologische Stabilitätsklasse. Eingeteilt wurde nach Klug-Manier in 12 Stabilitätsklassen.

Zunächst erfolgte eine Analyse der Windrichtungsverteilung und der Stabilitätsklassen. Dadurch wurden der Jahresgang auf eine handhabbare Anzahl von Kombinationen von Wind- und Stabilitätsklasse reduziert.

Anschließend erfolgten Immissionsberechnungen mit dem SIMUL-Verfahren, aufsetzend auf je einem Ab- und Anflug eines A320. Ermittelt wurde der Sound Exposure Level SEL im Bereich von 70 bis 90 dB. Das entspricht typischerweise um 15-20 dB geringeren Werten des äquivalenten Dauerschallpegels.

Bei der Berechnung erfolgte die Berücksichtigung der Meteorologie nach dem am DLR-Institut für Physik der Atmosphäre (IPA) entwickelten Ausbreitungsmodell. Um bei der Untersuchung keine Vermischung mit anderen Effekten zu erhalten, wurde kein Einfluss der Topografie und kein Einfluss der meteorologischen Bedingungen auf die Flugleistungen (also insbesondere Triebwerksleistung und Steigverhalten) berücksichtigt. Die ersten Analysen im Vorgängerprojekt hatten ohnehin ergeben, dass sich die Meteorologie auf die Ausbreitung primär im Flughafennahbereich, auf die Flugleistungen dagegen eher in größeren Entfernungen vom Flughafen auswirkt.

## Einteilung in Stabilitätsklassen SK

Stabilität	stabil			neutral						instabil		
Klasse SK	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$v_{W,10m}$ [m/s]	0	1	2	0	1	2	5	10	20	0	1	2
$\gamma_{Prandtl}$ [K/m]	+0.1			-0.01						-0.02		
$\gamma_{Ekman}$ [K/m]	+0.05			-0.01						-0.01		
$\gamma_{frei}$ [K/m]	-0.0065			-0.0065						-0.0065		

### Meteo-Boden-Dämpfung $A_{MB}$ tabelliert als Funktion von:

- **Stabilitätsklasse**
- **horizontaler Entfernung Flugzeug – Immissionsort**
- **Flughöhe**
- **Winkel zwischen Ausbreitungsrichtung und bodennaher Windrichtung**

Das IPA-Modell basiert auf der in der Meteorologie üblicherweise benutzten Einteilung in Stabilitätsklassen nach Klug-Manier. Aufgeteilt wird in insgesamt 12 Klassen, je drei für eine stabile und instabile Atmosphäre und sechs für eine neutrale Schichtung. Die Unterteilung dieser Kategorien erfolgt auf der Grundlage der in 10 m Höhe gemessenen Windgeschwindigkeit  $v_{W,10m}$ . Die drei Kategorien unterscheiden sich durch unterschiedliche vertikale Temperaturgradienten in den bodennahen Prandtl- und Ekman-Schichten. In der freien Atmosphäre oberhalb dieser Schichten wird der Temperaturgradient der Standardatmosphäre mit einer Abnahme von 6.5 K pro Kilometer Höhenzunahme angesetzt. Das Modell berücksichtigt außerdem die Drehung der Windrichtung mit der Höhe (geostrophischer Wind) sowie einen Parameter für die Bodenrauigkeit. Näheres zum IPA-Modell findet sich u.a. im Bericht zum „Leisen Flugverkehr“.

Auf der Basis des IPA-Modells wird eine sog. Meteo-Boden-Dämpfung  $A_{MB}$  berechnet. Die Werte für diese Größe sind durch ein hochwertiges Euler-Modell am IPA vorberechnet und im SIMUL-Verfahren in Form von Lookup-Tables implementiert. Diese Tabellen sind parametrisiert nach Stabilitätsklasse, horizontaler Entfernung zwischen Immissionsort und Flugzeug, Flughöhe sowie dem Winkel zwischen Ausbreitungsrichtung und bodennaher Windrichtung.

## Verteilung auf Stabilitätsklassen und Windrichtung (12 Monate)

Tag	stabil [%]			neutral [%]						instabil [%]		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
30° ⇒ 120°	-	0.8	2.1	-	-	1.3	7.6	0.0	-	-	0.3	2.3
120° ⇒ 210°	-	1.2	3.3	-	-	2.2	12.0	0.6	-	-	0.3	2.5
210° ⇒ 300°	-	0.6	2.5	-	-	2.6	34.1	4.0	-	-	0.4	2.4
300° ⇒ 30°	-	0.7	1.8	-	-	1.5	9.5	0.7	-	-	0.4	2.4

Nacht	stabil [%]			neutral [%]						instabil [%]		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
30° ⇒ 120°	-	1.3	4.0	-	-	0.3	7.1	0.0	-	-	-	-
120° ⇒ 210°	-	4.2	10.9	-	-	1.4	11.9	0.6	-	-	-	-
210° ⇒ 300°	-	0.9	7.7	-	-	1.3	34.5	2.5	-	-	-	-
300° ⇒ 30°	-	1.1	4.0	-	-	0.4	5.9	0.2	-	-	-	-

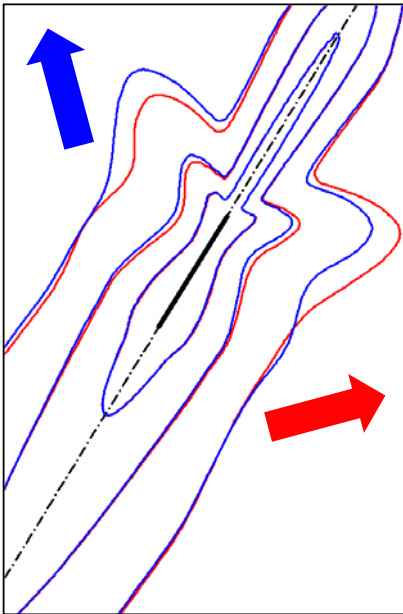
Diese Tabelle zeigt die prozentuale Verteilung der Wetterlagen für 12 Monate auf Windrichtungen und Stabilitätsklassen. Die Analysen der Windrichtungsverteilung ergaben, dass es im Jahresmittel zwei dominierende Windrichtungen gibt – ein Hauptmaximum im Bereich von etwa 270° sowie ein Nebenmaximum im Bereich von etwa 150° (jeweils rechtweisend auf Nord bezogen). Auf der Basis dieser Beobachtung wurde die Windrichtung in vier 90°-Sektoren zerlegt, die dann jeweils nach Stabilitätsklassen unterteilt wurden. Dabei zeigte sich, dass von den 12 möglichen Stabilitätsklassen in der Praxis tagsüber nur 7 regelmäßig vorkommen. Nachts reduziert sich diese Anzahl auf 5 Klassen, da instabile Schichtungen hier in der Regel nicht auftreten.

Die Aufteilung in Tag und Nacht erfolgte in Anlehnung an die bei Fluglärmrechnungen verwendete Konvention in die Zeitscheiben 6-22 Uhr und 22-6 Uhr.

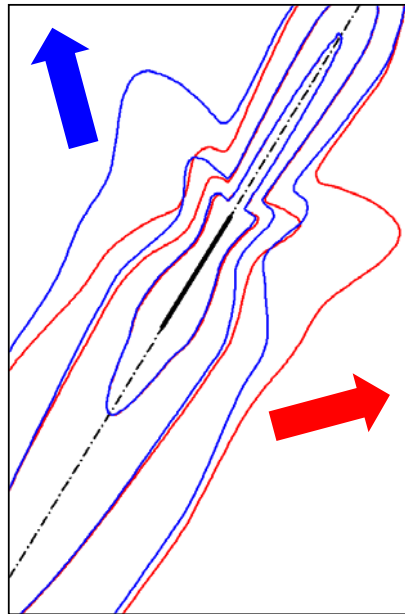
Die Tabelle macht deutlich, dass die Wetterlagen mit etwa 70% von neutralen Bedingungen dominiert werden, wovon etwa die Hälfte auf die Stabilitätsklasse 7 und das Windrichtungsmaximum aus 270° fällt.

## Windeinfluss auf SEL-Konturen (Betriebsrichtung 21)

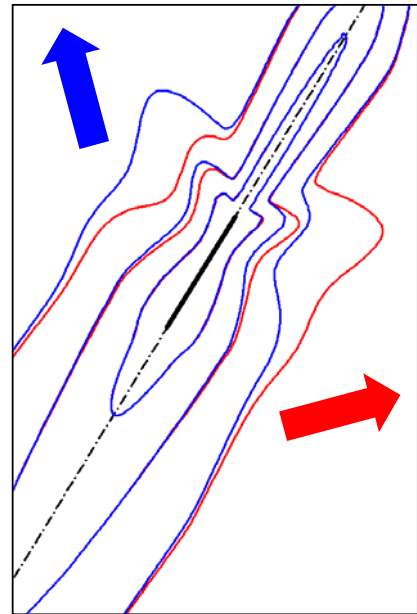
stabil,  $v_w = 2 \text{ m/s}$  (SK 3)



neutral,  $v_w = 5 \text{ m/s}$  (SK 7)



labil,  $v_w = 2 \text{ m/s}$  (SK 12)

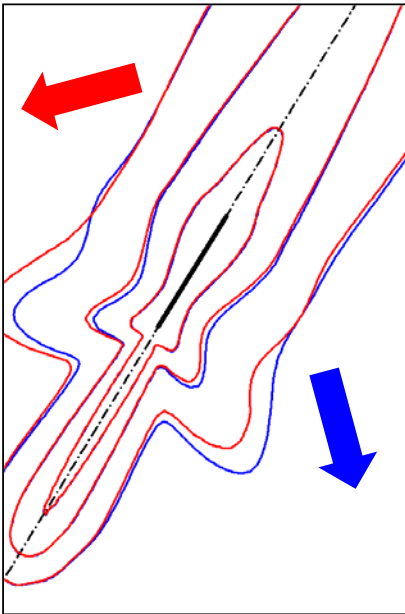


Diese Abbildungen zeigen exemplarisch die Einflüsse von Wind und Temperaturgradienten auf ermittelte SEL-Konturen – dargestellt sind die Konturen 70, 80 und 90 dB. Angenommen sind südliche Windrichtungen, bei denen die Bahn in Richtung 21 (210° rechtweisend gegen Nord) betrieben wird. Dargestellt sind die Stabilitätsklassen, die für die Kategorien stabil, neutral und instabil am häufigsten auftraten (siehe Tabelle vorhergehende Folie). Berechnet sind jeweils separate Konturen für die beiden Windsektoren (rot Südwest, blau Südost).

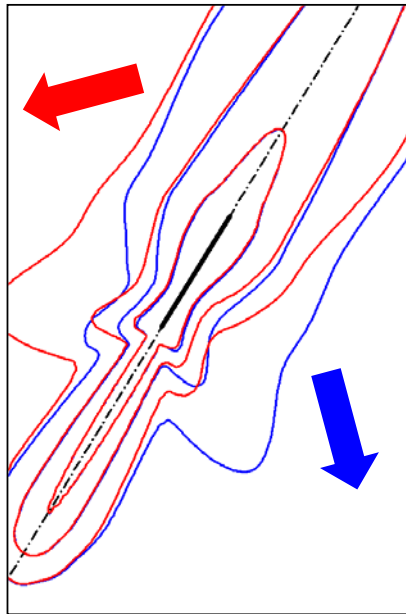
Man erkennt eine deutliche, durch den Wind hervorgerufene Asymmetrie der Konturen – der Schall wird jeweils in Windrichtung transportiert, gegen die Windrichtung gedämpft. Dieser Effekt – der natürlich bei Stabilitätsklasse 7 am stärksten ausgeprägt ist – überlagert sich dem Effekt des Temperaturgradienten. Letzterer führt bei stabiler Schichtung aufgrund von Abwärtsbrechung zu einer tendenziellen Verbreiterung der Konturen. Bei neutraler oder instabiler Schichtung zeigt sich der entgegengesetzte Effekt.

## Windeinfluss auf SEL-Konturen (Betriebsrichtung 03)

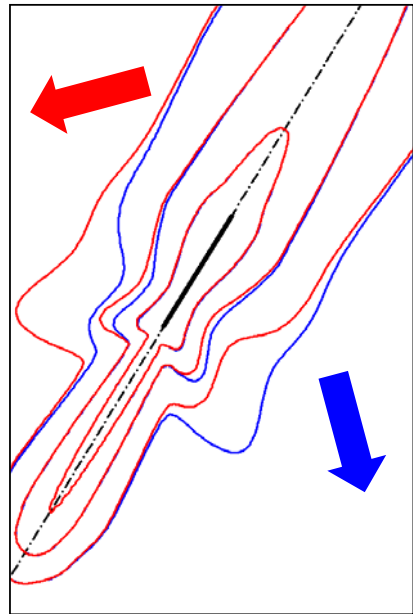
stabil,  $v_w = 2 \text{ m/s}$  (SK 3)



neutral,  $v_w = 5 \text{ m/s}$  (SK 7)



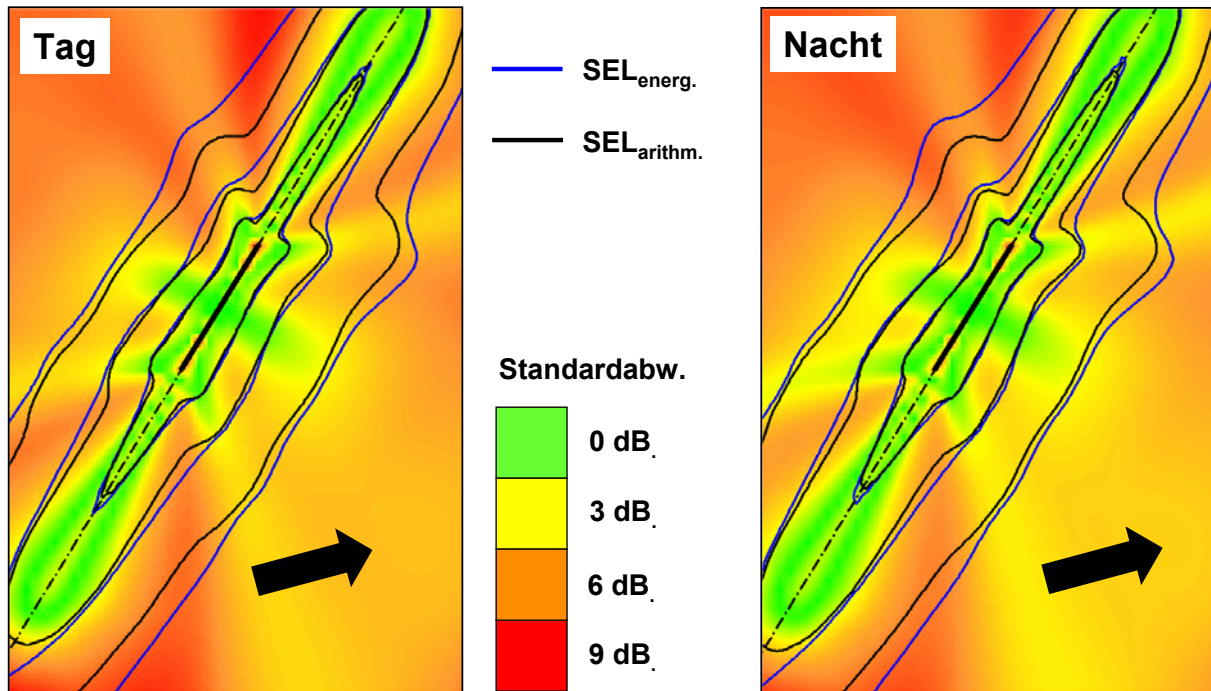
labil,  $v_w = 2 \text{ m/s}$  (SK 12)



Diese Abbildungen zeigen die gleiche Situation bei Winden aus nördlicher Richtung. In diesen Fällen wird die Startbahn in Richtung 03 (30° rechtweisend gegen Nord) betrieben.

Für jede der in der Verteilungstabelle nach Windrichtung und Stabilitätsklasse auftretende Kombination wurde nun ein Gitter von SEL-Werten mit einer Maschenweite von 250 m berechnet. Damit ergaben sich insgesamt 28 Immissionsgitter. Diese wurden dann entsprechend den prozentualen Anteilen des Auftretens energetisch zu einem resultierenden Wert SEL aufsummiert, der die Wettersituation für 12 Monate repräsentiert.

## Konturen SEL = 70, 80, 90 dB im Jahresmittel

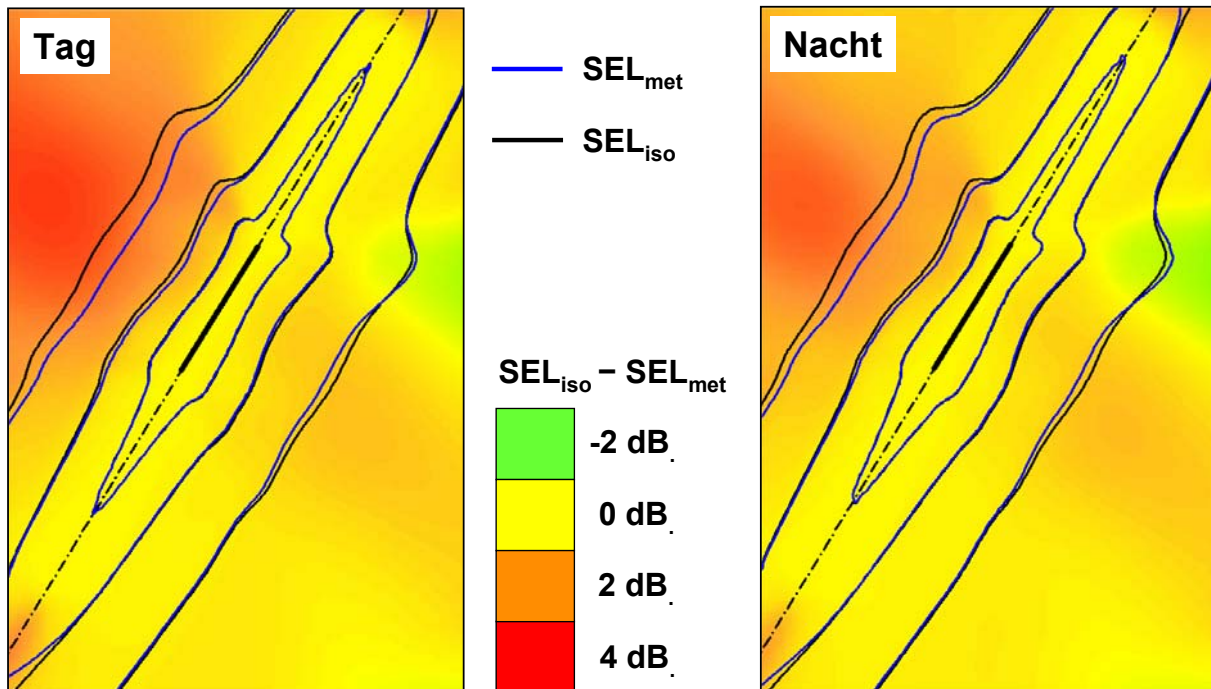


Diese Abbildungen zeigen das Ergebnis der gewichteten Überlagerung der einzelnen Immissionsgitter. Die blauen Kurven repräsentieren die auf energetischer Addition resultierenden SEL-Werte – also einen SEL, wie er üblicherweise gebildet wird.

Um eine Aussage über die Schwankungsbreite des SEL im Jahresmittel treffen zu können, wurden zusätzlich der arithmetische Mittelwert sowie die Standardabweichung der lokalen SEL-Verteilungen ermittelt. Letztere sind farblich kodiert als Hintergrund dargestellt. Der arithmetische Mittelwert wird durch die schwarzen Kurven repräsentiert. Er ist zwar physikalisch nicht interpretierbar, aber trotzdem dargestellt – letztendlich verdeutlicht er die Tatsache, dass bei Pegelverteilungen die Differenz zwischen energetischem und arithmetischem Mittel mit der Standardabweichung zunimmt.

Die Darstellungen für Tag und Nacht unterscheiden sich nur unwesentlich, ein Zeichen dafür, dass die Ausbreitungssituation im wesentlichen durch neutrale Südwestlagen dominiert wird.

## Konturen SEL = 70, 80, 90 dB (Vergleich mit isothermer Atmosphäre)



Diese Folie zeigt das eigentliche Ergebnis der Untersuchung. Verglichen wurden hier die SEL-Konturen für das Gesamtjahr ( $SEL_{met}$ ) mit denjenigen Konturen  $SEL_{iso}$ , die sich bei Annahme einer isothermen Atmosphäre ohne Windeinfluss ergeben. Bei diesen Kurven erfolgte die Berechnung des SEL auf der Basis einer nach der Betriebsrichtungsverteilung gewichteten energetischen Addition. Diese Kurven basieren also auf der gleichen Annahme, die bei konventionellen Rechenverfahren wie der AzB getroffen werden.

Farblich hinterlegt ist die Differenz  $SEL_{iso} - SEL_{met}$ . Sie ist fast durchweg positiv, d.h. bei Annahme einer isothermen Atmosphäre werden die Immissionswerte in der Regel überschätzt. Lediglich in einem engen Sektor im Startbahnbereich in Hauptwindrichtung erfolgt eine Unterschätzung, die aber kaum Auswirkungen auf die Konturen zeigt.

Erklärbar ist dieser Effekt durch zwei gegenläufige Einflüsse: Aufgrund der dominierenden neutralen und instabilen Wetterlagen (also Aufwärtsbrechung) verkleinern sich die Konturen gegenüber der isothermen Situation. Dem überlagert sich der Windeinfluss, der den Effekt im Nordostbereich verringert und zum Teil überkompensiert, im Nordwestbereich dagegen verstärkt.

Trotz des gegenüber der Tagessituation erhöhten Anteils an stabilen, also ausbreitungsförderlichen Wetterlagen, unterscheiden sich die Darstellungen für Tag und Nacht kaum.

## Fazit

- Für das untersuchte Beispiel zeigt sich, dass die Annahme einer isothermen Atmosphäre ohne Wind eine vernünftige Näherung darstellt.
- Dauerschallpegel werden im Mittel überschätzt, gegenüber einer realen Wettersituation liegen die Pegeldifferenzen im Bereich von  $\pm 2$  dB.
- Es gibt keine deutlichen Unterschiede zwischen Tages- und Nachtbetrachtung bzw. zwischen einer Mittelung über 6 bzw. 12 Monate.
- **These: Solange neutrale Wettersituationen dominieren, dürften die Ergebnisse auch auf andere deutsche Flughäfen übertragbar sein.**

Insgesamt lässt sich – zumindest für die untersuchte Situation – folgendes Fazit aus den durchgeführten Untersuchungen ziehen:

- Die bei konventionellen Berechnungsverfahren getroffene Annahme einer isothermen atmosphärischen Schichtung ohne Wind stellt bezogen auf Jahresmittelwerte eine vernünftige Näherung dar.
- Dauerschallpegel werden im Mittel überschätzt, die gegenüber realen Wetterbedingungen auftretenden Pegeldifferenzen decken einen Bereich von  $\pm 2$  dB ab, wobei die hohen Differenzen nur lokal auftreten.
- Deutliche Unterschiede zwischen Tag und Nacht sind nicht festzustellen. Das Gleiche gilt für einen Vergleich von Jahreswerten mit den sechs Monaten Mai bis Oktober (in dieser Präsentation nicht explizit ausgewiesen).

Ob die analysierte Situation repräsentativ ist, ist natürlich zu hinterfragen. Trotzdem sei die These aufgestellt, dass die Ergebnisse auf andere deutsche Flughäfen übertragbar ist. Dies kann man wie folgt begründen:

- Die Untersuchung erfolgte auf der Basis von An- und Abflügen eines einzelnen Flugzeugmusters. Die Effekte dürften aber weitestgehend quellenunabhängig sein, solange sich die spektralen Eigenschaften der Quelle nicht ändern. Für zivile Strahlflugzeuge kann man das annehmen.
- Die typischen Wettersituationen dürften in Deutschland nicht so extrem variieren. Solange sie durch neutrale Wetterlagen dominiert werden, werden sich entsprechende Effekte zeigen.
- Die Bahnkonfiguration entspricht einer charakteristischen Ein- bzw. Parallelbahnorientierung in westlicher bzw. südwestlicher Richtung. Eine zusätzliche Analyse für gekreuzte Bahnsysteme wäre aber noch sinnvoll.

## Problemstellung

- Feuchtigkeit und Temperatur bestimmen die atmosphärische Dämpfung.
- Sie variieren mit der Höhe sowie tages- und jahreszeitlich z.T. beträchtlich.
- Konventionelle Rechenverfahren (AzB) gehen von einer homogenen Atmosphäre aus (z.B. 15°C, 70% relative Feuchte).

## Zu klärende Fragen

- Wie ändert sich die atmosphärische Dämpfung gegenüber der homogenen Atmosphäre, wenn reale meteorologische Vertikalprofile (z.B. aus Radiosondenaufstiegen) zu Grunde gelegt werden?
- Welche Abweichungen treten auf, wenn die Bedingungen der internationalen Standardatmosphäre (ISA) verwendet werden?
- Wie gut geben die verwendeten Näherungen den meteorologischen Jahresgang wieder?

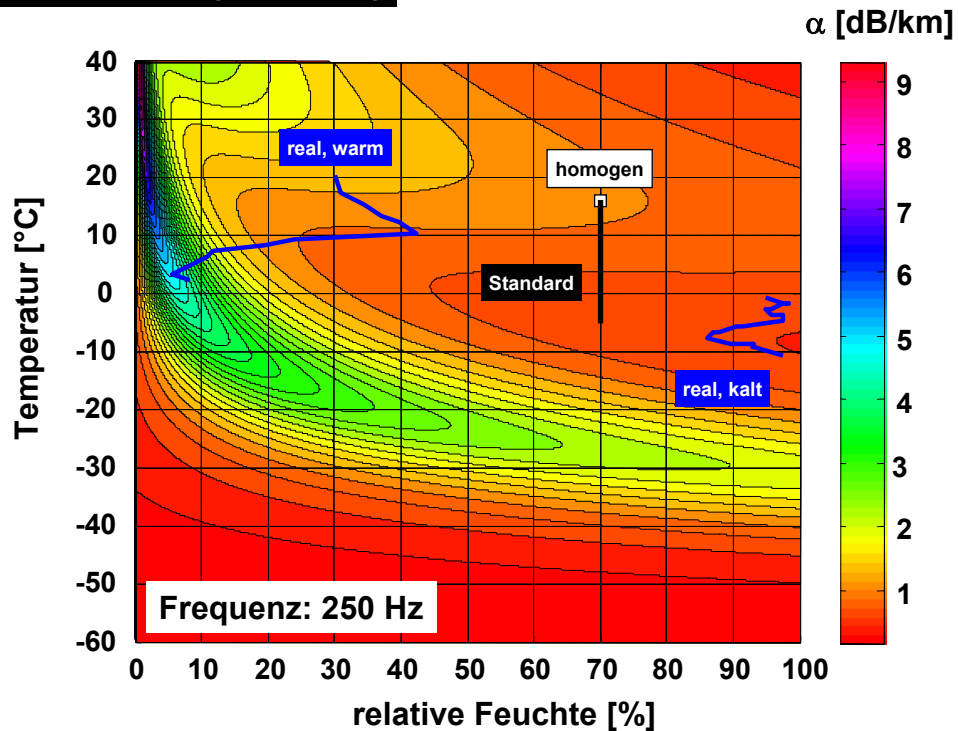
Schall wird beim Durchgang durch die Atmosphäre durch Dissipation und molekulare Wechselwirkungen gedämpft. Diese atmosphärische Dämpfung wird im wesentlichen bestimmt durch die Temperatur und die relative Feuchte. Diese beiden Größen variieren tages- und jahreszeitlich, vor allem aber mit der Höhe über dem Erdboden beträchtlich.

Konventionelle Fluglärmrechnungsverfahren wie die AzB gehen aber von einer homogenen Atmosphäre aus, d.h. Temperatur und Feuchte werden über die gesamte Atmosphäre als konstant angesehen. In der Regel wird dabei eine Temperatur von 15°C sowie eine relative Feuchte von 70% angenommen. Insofern sind hier Abweichungen bei der Ermittlung der atmosphärischen Dämpfung zu erwarten.

In diesem Zusammenhang sind eine Reihe von Fragen zu klären:

- Wie gut gibt diese Näherung bei Immissionsberechnungen den Effekt der realen meteorologischen Bedingungen (z.B. aus Radiosondenaufstiegen abgeleitet) wieder?
- Ergibt sich eine bessere Vergleichbarkeit, wenn das Temperaturprofil der Internationalen Standardatmosphäre (ISA) zu Grunde gelegt wird?
- Wie gut geben die Näherungen den meteorologischen Jahresgang (durchschnittliche Situation, Extrembedingungen) wieder?

## Dämpfungskoeffizient $\alpha$ (ISO 9613)



Die atmosphärische Dämpfung nimmt für feste Werte von Frequenz  $f$ , Temperatur  $T$  und relativer Feuchte  $RH$  linear mit der Ausbreitungsentfernung zu. Sie wird durch einen Dämpfungskoeffizienten  $\alpha(f, T, RH)$  beschrieben. Dieser kann nach verschiedenen internationalen Standards berechnet werden.

Das Bild zeigt eine farbcodierte Darstellung des Dämpfungskoeffizienten für 250 Hz als Funktion von Temperatur und Feuchte. Für andere Frequenzen sieht das Bild ähnlich aus, tendenziell nimmt die Dämpfung mit der Frequenz stark zu.

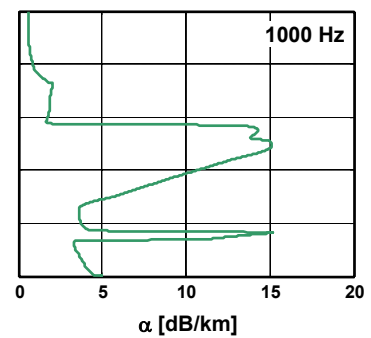
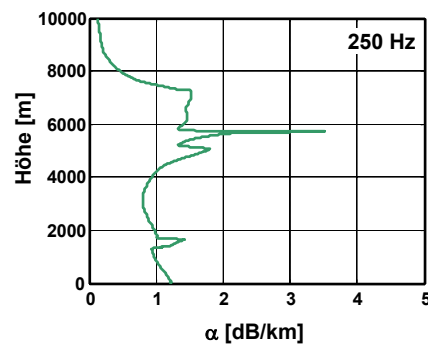
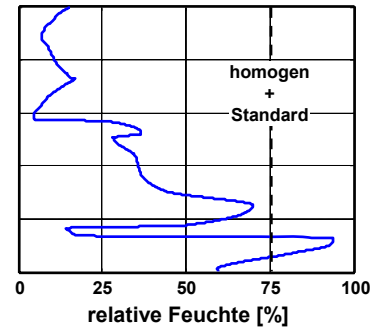
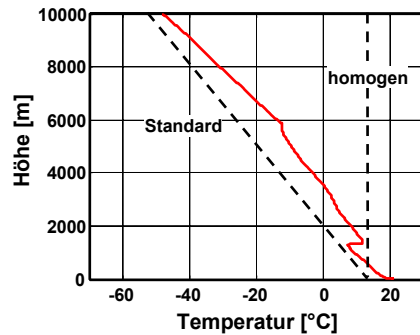
Im Bild eingetragen sind zusätzlich verschiedene Verläufe von Temperatur und Feuchte im Bereich bis zu 3000 m Höhe. Die homogene Atmosphäre wird in dieser Darstellung durch einen Punkt bei  $T=15^\circ\text{C}$  und  $RH=70\%$  repräsentiert. Die Standardatmosphäre weist am Boden die gleichen Werte auf, die Temperatur nimmt aber linear mit der Höhe mit  $6.5^\circ\text{C}$  pro Kilometer ab. Entsprechend ergibt sich im Diagramm ein gerader Verlauf parallel zur Temperaturachse bis hin zu  $T=-4.5^\circ\text{C}$ .

Zusätzlich eingetragen sind gemessene reale Vertikalverläufe für einen warmen und einen kalten Tag. Man erkennt insbesondere beim warmen Tag, dass der Dämpfungskoeffizient über die Atmosphäre stark variieren kann, während er bei einem typischen kalten Tag vergleichsweise konstant bleibt.

## Meteorologisches Vertikalprofil Sommer

Radiosondenaufstieg  
Observatorium  
Lindenberg

12 Uhr 17.08.2005



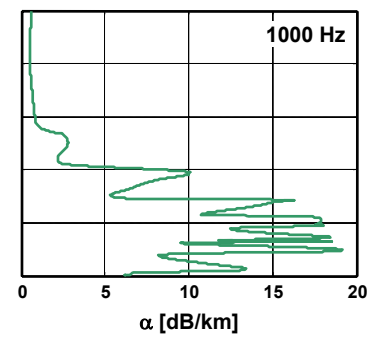
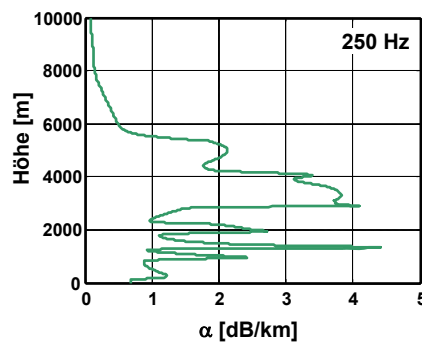
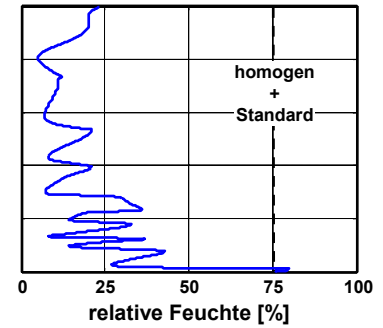
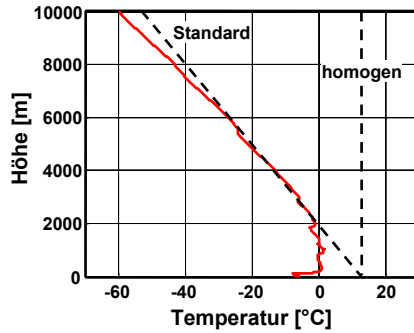
Diese Darstellung zeigt im oberen Teil die Vertikalprofile von Temperatur und Feuchte, wie sie an einem Sommertag mittags bei einem Radiosondenaufstieg am Observatorium Lindenberg aufgenommen wurden. Eingetragen sind zusätzlich die entsprechenden Verläufe für eine homogene Atmosphäre und die ISA-Standardatmosphäre.

Die unteren Diagramme zeigen den zugehörigen Vertikalverlauf der Koeffizienten der atmosphärischen Dämpfung für Frequenzen von 250 und 1000 Hz.

## Meteorologisches Vertikalprofil Winter

Radiosondenaufstieg  
Observatorium  
Lindenberg

12 Uhr 12.01.2006



Diese Folie zeigt eine entsprechende Darstellung für einen typischen Wintertag.

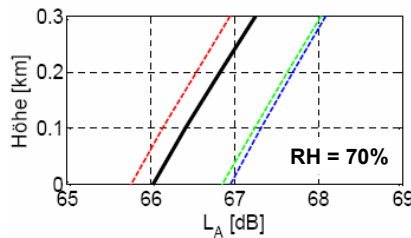
## Parametervariationen (Temperatur, Feuchte)

### Maximalpegelverläufe in Bodennähe (Quelle mit A320-Spektrum in 3 km Höhe)

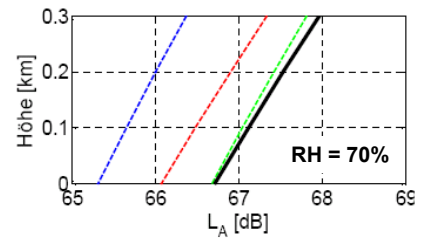
#### Bodentemperatur

- ⋯ -5°C
- ⋯ 5°C
- 15°C
- ⋯ 25°C

#### homogene Atmosphäre

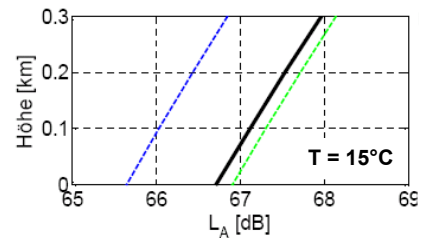
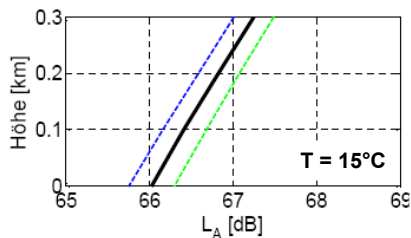


#### Standardatmosphäre



#### relative Feuchte

- ⋯ 30%
- 70%
- ⋯ 100%



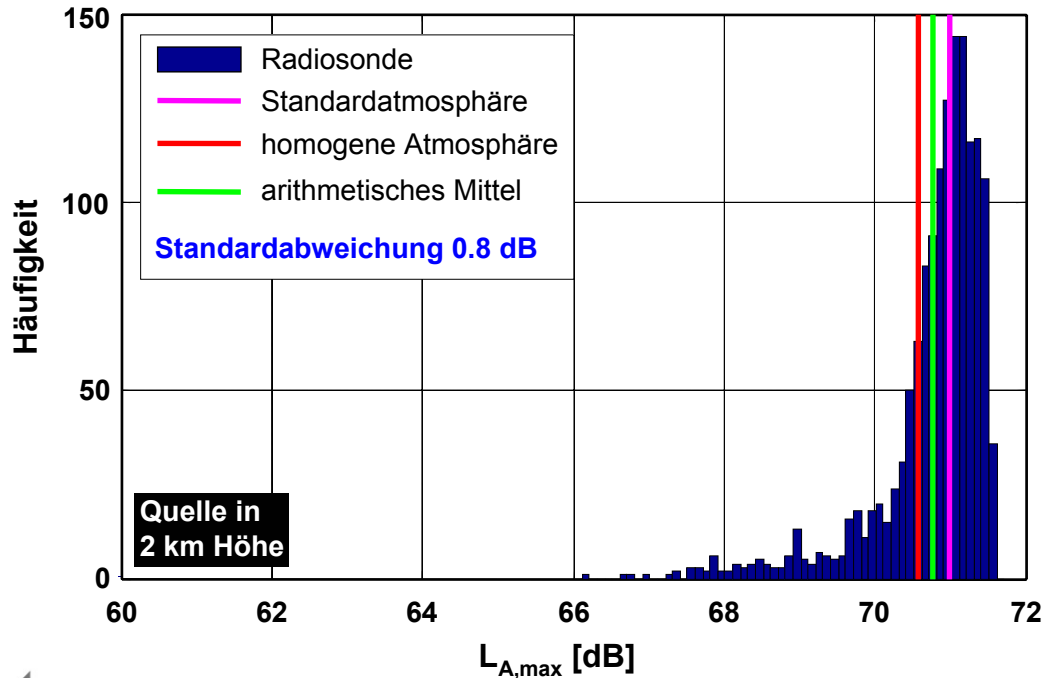
Zunächst wurden Parametervariationen zum Einfluss von Temperatur und Feuchte auf A-bewertete Maximalschallpegel am Boden durchgeführt. Zu Grunde lag einmal eine homogene Atmosphäre (linke Teilbilder) und einmal eine Standardatmosphäre (rechte Teilbilder).

Ausgegangen wurde von einer Schallquelle mit einem typischen Strahlflugzeugspektrum (A320), die sich 3 Kilometer über dem Boden befindet. Eingezeichnet sind jeweils die Verläufe des A-bewerteten Maximalschallpegels in den unteren 300 Metern über dem Boden.

Zunächst wurde die Temperatur (obere Teilbilder) im Bereich von -5°C bis 25°C bei einer festen relativen Feuchte von 70% variiert. Dadurch ergeben sich in beiden Fällen am Boden Pegelunterschiede in der Größenordnung von etwa 1 dB. Bei homogener Atmosphäre nimmt die Dämpfung mit zunehmender Temperatur zu, was man für 70% Feuchte und 250 Hz tendenziell aus dem schon gezeigten Diagramm  $\alpha(T, RH)$  entnehmen kann – hier würde sich der eingezeichnete Punkt lediglich vertikal verschieben. Bei der Standardatmosphäre ist dies nicht so systematisch – hier würde die eingetragene Linie im Diagramm  $\alpha(T, RH)$  vertikal verschoben werden und so verschiedene lokale Minima und Maxima überdecken.

Die unteren Teilbilder zeigen entsprechende Diagramme für Variation der Feuchte zwischen 30% und 100% bei einer Temperatur von 15°C. Im  $\alpha(T, RH)$ -Diagramm entspricht diese Verschiebung des Punktes bzw. der Geraden in horizontaler Richtung. Hier nimmt in beiden Fällen mit zunehmender Feuchte die Dämpfung ab, die Systematik ist also die gleiche. Die Pegeldifferenzen liegen wie bei der Variation der Temperatur im Bereich von etwa 1 dB, allerdings reagiert die homogene Atmosphäre nicht so sensibel auf Feuchtigkeitsänderungen.

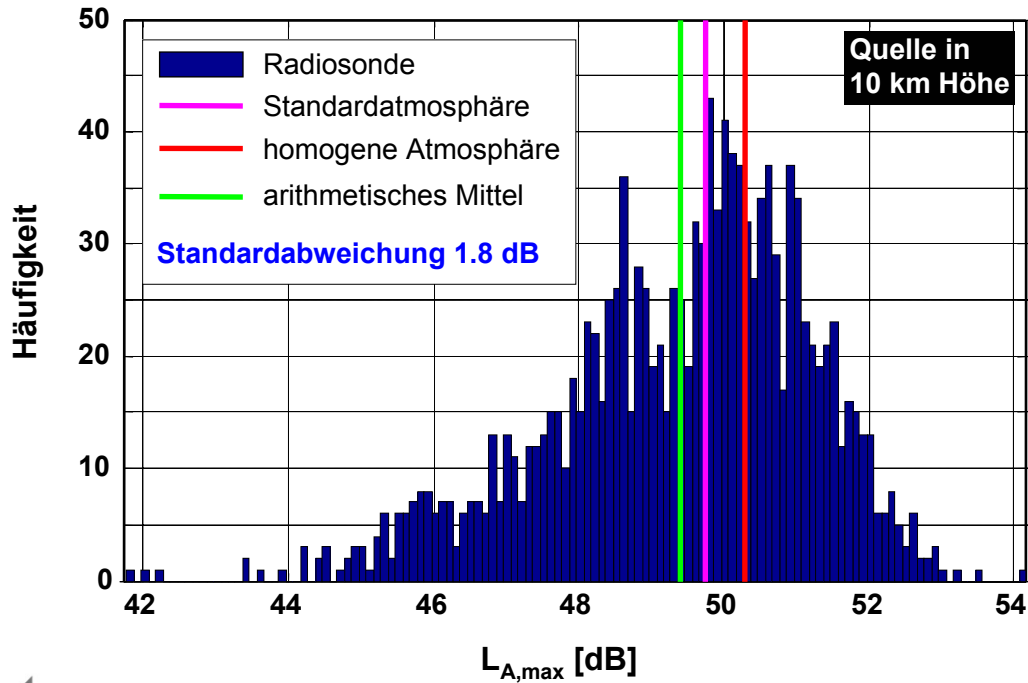
## Maximalpegel am Boden (Jahresauswertung, 1464 Messungen)



Anschließende Untersuchungen wurden mit realen Meteo-Profilen aus Radiosondenaufstiegen durchgeführt. Das Bild zeigt die Verteilung der A-bewerteten Maximalschallpegel am Boden, wie sie sich aus den Radiosondendaten für das Gesamtjahr 2004 ergeben würde. Ausgewertet sind 1464 Messungen, die Quellhöhe ist hier mit 2 km angenommen, liegt also im oberen Höhenbereich, der für die Berechnungen von Lärmkonturen eine Rolle spielt.

Die Verteilung weist eine Standardabweichung von lediglich 0.8 dB auf, ist aber stark asymmetrisch. Die zugehörigen Pegelwerte für homogene und Standardatmosphäre mit 70% Feuchte und 15°C Bodentemperatur sind ebenfalls eingetragen. Beide differieren um ca. 0.5 dB, der Mittelwert der Verteilung liegt dazwischen.

## Maximalpegel am Boden (Jahresauswertung, 1464 Messungen)



Diese Darstellung zeigt die Situation bei einer Quellhöhe von 10 km. Der Range der Verteilung beträgt etwa 10 dB, die Standardabweichung knapp 2 dB. Auch hier liegen das Mittel der Verteilung und die Werte für homogene bzw. Standardatmosphäre eng zusammen.

## Fazit

- Bei homogener bzw. Standardatmosphäre resultieren Temperatur- und Feuchtevariationen in Maximalpegelvariationen von bis zu etwa 1 dB.
- Es zeigt sich im Jahresmittel eine gute Übereinstimmung zwischen realen Situationen und Standard- bzw. homogener Atmosphäre.
- In Einzelfällen können die am Boden auftretenden Maximalpegel um 6-10 dB für vertikale Ausbreitung im Bereich von 3-10 km variieren.
- Die Standardatmosphäre liefert geringfügig realistischere Werte für die kumulative atmosphärische Dämpfung als die homogene Atmosphäre.
- Die Annahme einer homogenen Atmosphäre ist aber aus praktischen Gesichtspunkten bei Immissionsberechnungen für Langzeitmittelwerte gerechtfertigt.

Aus den Untersuchungen zur atmosphärischen Dämpfung lässt sich folgendes Fazit ziehen:

- Variationen von Luftfeuchtigkeit und Temperatur im praktisch relevanten Bereich liefern sowohl für eine homogene als auch eine Standardatmosphäre Variationen im A-bewerteten Schallpegel in der Größenordnung von bis zu etwa 1 dB.
- Bezogen auf reale meteorologische Bedingungen liefern Standard- und homogene Atmosphäre im Jahresmittel gute Übereinstimmungen. In Einzelfällen können am Boden auftretenden Maximalpegel bei vertikalen Ausbreitungsentfernungen von 3 bis 10 km allerdings um 6 bis 10 dB variieren.
- Tendenziell liefert eine Standardatmosphäre, die ja einen vertikalen Temperaturgradienten berücksichtigt, realistischere Werte für die kumulative atmosphärische Dämpfung als eine homogene Atmosphäre. Allerdings sind die Differenzen nur gering.
- In Anbetracht praktischer Gesichtspunkte (Programmierung, Rechengeschwindigkeit) ist es daher gerechtfertigt, bei Immissionsrechnungen für Langzeitmittelwerte von einer homogenen Atmosphäre auszugehen.

Die Untersuchungen zur atmosphärischen Dämpfung wurden im Rahmen einer Dissertation durchgeführt. Sie stellen nur einen Teilaspekt dieser Arbeit dar, die sich insbesondere mit den Effekten der Schallausbreitung aus großen Höhen auseinandersetzt.

## Teilaufgaben

- Erweiterung des SIMUL-Quellcodes auf bodengebundene Operationen (Rollvorgänge, APU, Triebwerksprobeläufe)
- Vermessung und Auswertung von Emissionsdaten im Flughafenbereich (Messkampagne am Flughafen MUC)
- Integration und Validierung der Ausbreitungsmodelle aus HAP 4A

⇒ **Vorschläge zur Integration bodengebundener Operationen in konventionelle Rechenmodelle**

Unter bodengebundenen Operationen von Flugzeugen versteht man Rollvorgänge, Betrieb von Hilfstriebwerken (APU) sowie Triebwerksprobeläufe. Die Simulation von letzteren wird in der Praxis in häufig durchgeführt – hier existieren auch entsprechende Datengrundlagen. Anders ist es mit Rollvorgängen und APU-Betrieb.

Die Zielsetzungen der Arbeiten zum Lärm bodengebundener Operationen waren folgende:

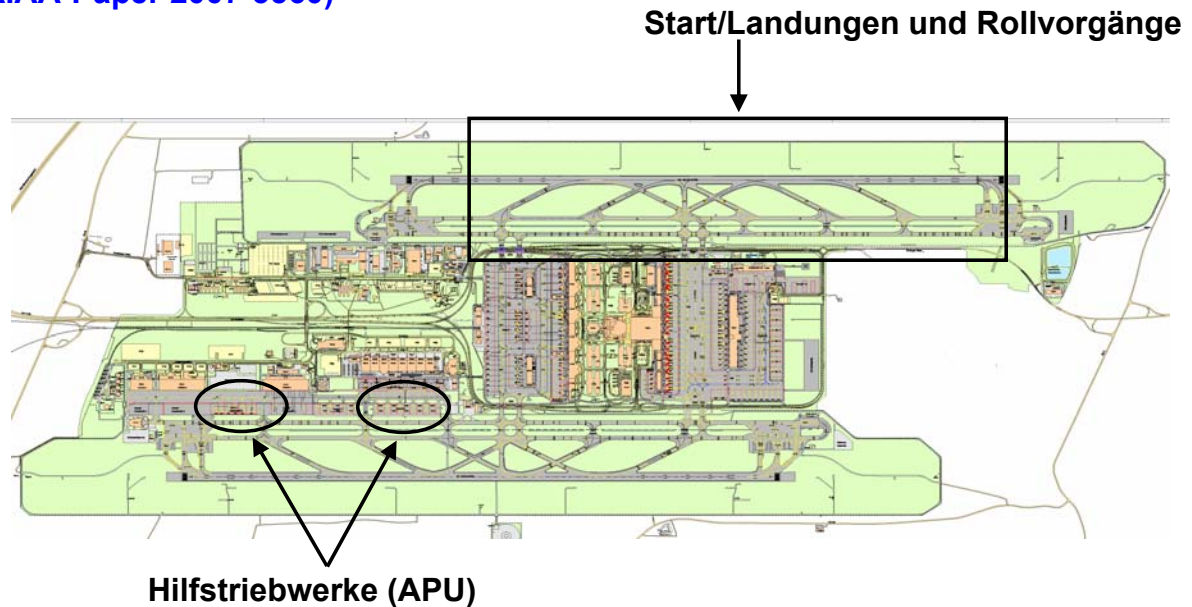
- Der SIMUL-Quellcode sollte hinsichtlich der Berücksichtigung bodengebundener Operationen erweitert werden.
- Im Rahmen einer Messkampagne, die letztendlich am Flughafen München durchgeführt wurde, sollten Emissionsdaten für bodengebundene Operationen, aber auch zum Einsatz von Umkehrschub bei der Landung, gewonnen werden.
- Teilaspekt dieser Vermessung war auch die Validierung der Ausbreitungsmodelle, die im Hauptarbeitspaket 4A vom DLR-Institut für Physik der Atmosphäre (IPA) weiterentwickelt wurden.

Insgesamt sollten es die Arbeiten ermöglichen, Vorschläge zur Integration bodengebundener Operationen in konventionelle Rechenmodelle zu ermöglichen.

Im folgenden werden die Untersuchungen zur Modellierung von APU-Betrieb vorgestellt.

## Messkampagne am Flughafen München (Mai 2005)

(AIAA-Paper 2007-3560)



**Unterstützt durch FMG, DLH, DFS**

Die Messkampagne am Flughafen München wurde im Mai 2005 durchgeführt. Ermöglicht wurde sie nur aufgrund der Unterstützung durch die Flughafen München GmbH (FMG), die Deutsche Lufthansa (DLH) und die Deutsche Flugsicherung (DFS). Federführung bei der Messung hatte die Abteilung Technische Akustik des DLR-Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik in Braunschweig.

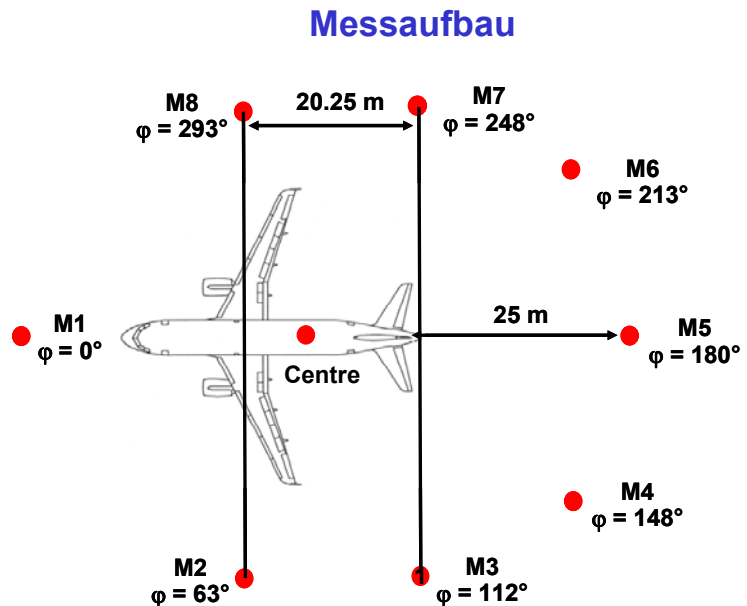
Die Folie zeigt den Messaufbau am Flughafen München: Untersuchungen zu Start- und Landelärm erfolgten an der Nordbahn bei Westbetrieb. In diesem Bereich wurden auch Rollvorgänge vermessen. Die Untersuchungen zum Betrieb von Hilfstriebwerken (APU) erfolgten auf den Abstellplätzen im südwestlichen Bereich des Flughafens.

Eine zusammenfassende Beschreibung der Untersuchungen sowie der Resultate wurde als 2007 als AIAA-Paper 2007-3560 veröffentlicht.

## Vermessung von APU-Betrieb

### Vermessene Typen:

- Airbus A340-300
- Airbus A319-100
- Airbus A321-100
- Boeing B737-300
- Boeing B757-200

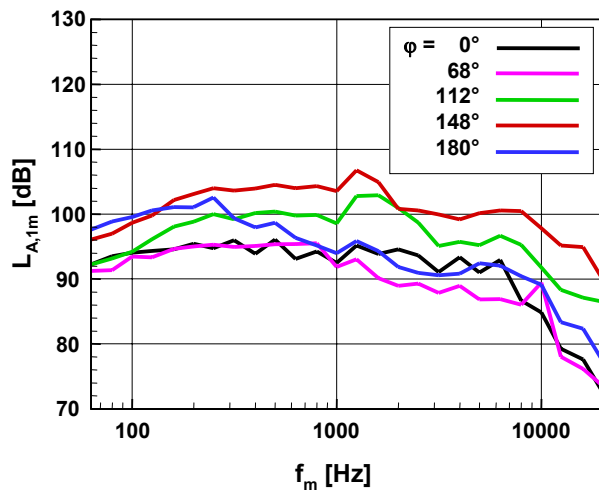


Diese Darstellung zeigt den bei der Untersuchung des APU-Betriebs verwendeten Messaufbau. Bei jeder Vermessung waren 8 Bodenmikrofone symmetrisch im Abstand von 25 m um das zu vermessende Flugzeug gruppiert. Vermessen wurde der APU-Betrieb mit und ohne Einsatz der Klimaanlage (AC).

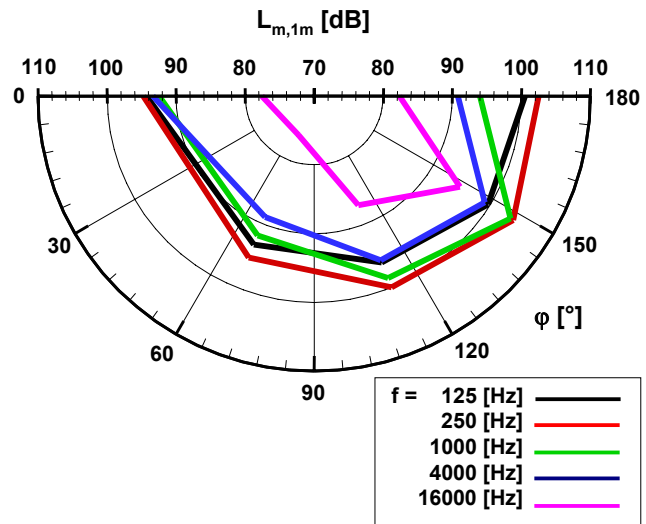
Insgesamt wurden 5 Typen untersucht. Die Muster A319, A321, B737 und B757 fallen nach dem Gruppierungsschema der AzB in eine Gruppe (S5.2). Zusätzlich wurde der Airbus A340 vermessen. Dieser unterscheidet sich insofern von den anderen untersuchten Typen, als der Austritt der APU nicht zentral am Heck, sondern an der linken Heckseite liegt. Daher war zu erwarten, dass die vermessene Richtcharakteristik für dieses Flugzeugmuster asymmetrisch ist, was sich auch bestätigte.

## APU-Referenzdatensatz für B737/B757/A319...A321 (S5.2 nach AzB)

### Spektren



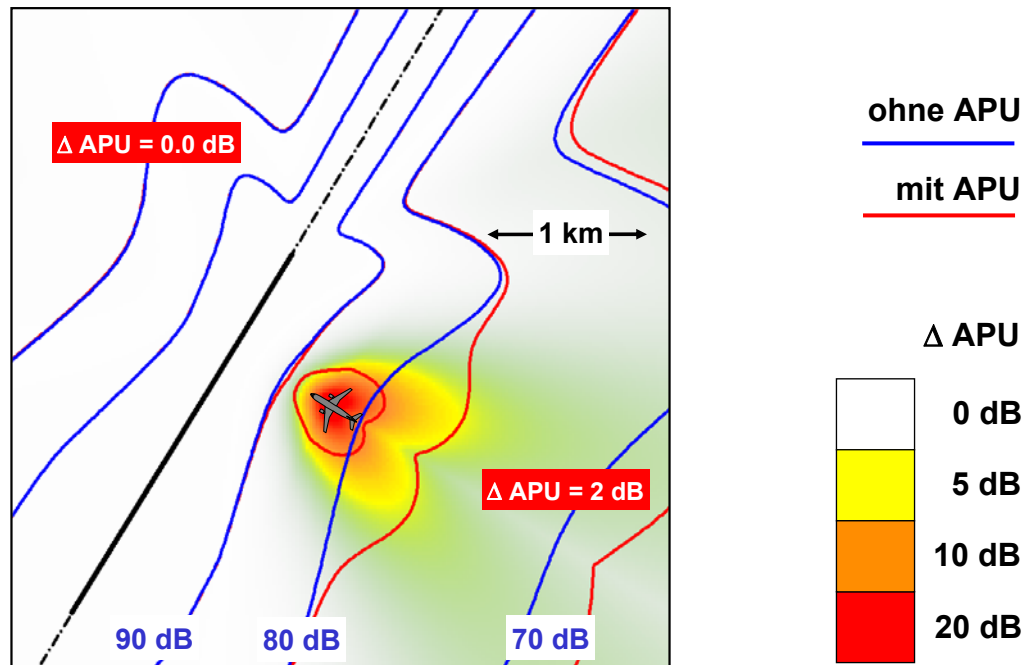
### Richtcharakteristiken



Diese Darstellung zeigt einen aus den Messungen für die Muster A319, A321, B737 und B757 abgeleiteten (also die AzB-Gruppe S5.2 charakteristischen) Referenzdatensatz für den APU-Betrieb. Links sind die auf 1m normierten, A-bewerteten Terzspektren für die vermessenen Abstrahlrichtungen angegeben. Das rechte Teilbild zeigt die spektralen Richtcharakteristiken. Diese sind symmetrisch zur Flugzeuglängsachse.

Die Darstellungen gelten für den APU-Betrieb ohne Einsatz der Klimaanlage. Die Messungen zeigten für diese Flugzeugkategorie keinen signifikanten Unterschied für den Betrieb mit und ohne Klimaanlage.

## APU-Einfluss auf SEL-Konturen (1 Start, 1 Landung, 30 min APU)



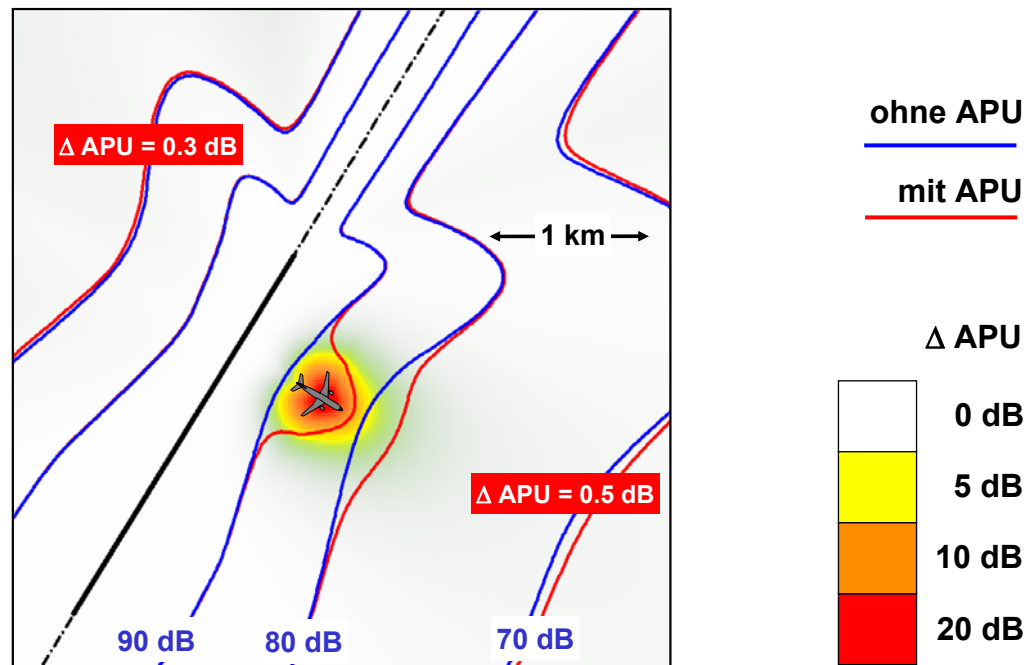
Basierend auf dem ermittelten Referenzdatensatz wurde mit dem entsprechend modifizierten SIMUL-Programm eine Proberechnung durchgeführt. Dabei wurde – wie in den Untersuchungen zum Wittereinfluss – die Bahngeometrie des Flughafens Hahn herangezogen. Berechnet wurden SEL-Konturen für eine Kombination von je einem An- und Abflug eines A320 einmal ohne Betrieb der APU sowie einmal für einen 30-minütigen Einsatz des Hilfsaggregats.

Die gezeigten Modellrechnungen berücksichtigen keine Abschirmung. In der Regel werden die Gebäude am Flughafen die Ausbreitung des Lärms von Hilfsaggregaten aber noch unterdrücken. Insofern stellen die Ergebnisse schon eine Worst-Case-Abschätzung dar.

Das vorliegende Beispiel stellt den Fall einer ungünstigen Orientierung des Flugzeugs auf der Abstellposition dar: Diese wurde in einem Abstand von 1000 m senkrecht zur Bahn angenommen, und zwar in einem Bereich, in dem die SEL-Konturen für eine Kombination von An- und Abflug den geringsten Querabstand zu Bahn haben. Das Flugzeug wurde am Abstellplatz so orientiert, dass das Abstrahlmaximum der APU von der Bahn weg, also in Richtung abnehmender Pegel zeigte. Dargestellt sind die SEL-Konturen, die sich mit (rot) bzw. ohne APU-Betrieb (blau) ergeben. Der Hintergrund zeigt farblich codiert die Differenz zwischen beiden Situationen.

In dieser Konfiguration liefert der APU-Betrieb deutliche Beiträge im direkten Abstrahlmaximum der APU, die in Abständen von etwa 3 km noch zur Erhöhung des SEL um etwa 2 dB führen können. In den übrigen Richtungen wird der Lärm des Hilfsaggregats durch den Start- und Landelärm vollständig überdeckt.

## APU-Einfluss auf SEL-Konturen (1 Start, 1 Landung, 30 min APU)



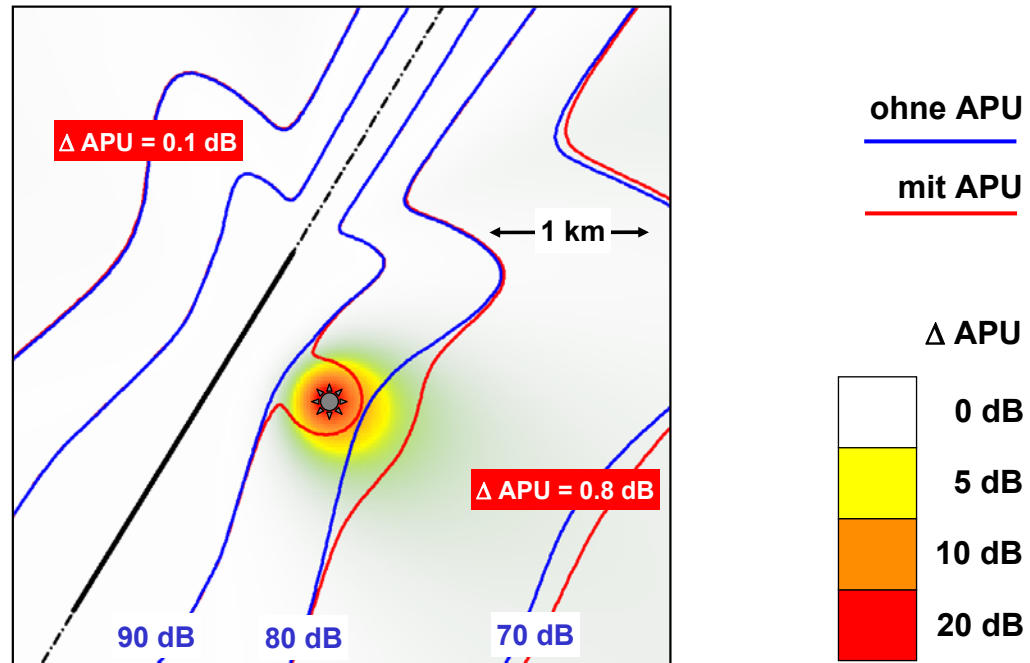
Diese Darstellung zeigt die Situation, wenn das Flugzeug auf der Abstellposition um 180° gedreht wird, die Hauptabstrahlung durch die APU also in Richtung der Bahn (also zunehmender Pegel) erfolgt. Der Effekt resultiert in einer deutlichen Reduktion des Gesamtlärms gegenüber der vorher gezeigten Variante:

- Im südöstlichen Bereich, der nun im Abstrahlminimum der APU liegt, reduzieren sich die Pegelerhöhungen im Umfeld der Kontur SEL = 70 dB von etwa 2 dB auf 0.5 dB.
- Der Bereich im Nordwesten liegt zwar nunmehr im Abstrahlmaximum, der APU-Lärm erhöht den Gesamtlärm im Umfeld der Kontur SEL = 70 dB aber nur um etwa 0.3 dB.

Durch geeignete Orientierung des Flugzeugs auf der Abstellposition lässt sich also der von Hilfsaggregaten erzeugte Lärm durch den Lärm des fliegenden Verkehrs stark maskieren. Wenn die Richtwirkung der APU asymmetrisch ist (wie beim A340) bestehen hier sogar noch bessere Möglichkeiten zur Optimierung.

Im Fall von Parallelbahnsystemen, bei denen die Abstellpositionen zwischen den Bahnen positioniert sind, dürften die Auswirkungen von Hilfstriebwerken weitestgehend durch den fliegenden Verkehr maskiert werden.

## APU-Einfluss auf SEL-Konturen (1 Start, 1 Landung, 30 min APU)



Die Tatsache, dass die Orientierung des Flugzeugs auf der Abstellposition den Einfluss des APU-Betriebs stark bestimmt, erfordert in praktischen Fällen – wie z.B. der Implementierung von APU-Betrieb in ein Rechenverfahren wie die AzB – bei der Bereitstellung der Eingabedaten einen hohen Aufwand. Im Grunde genommen müsste für jede Abstellposition bekannt sein, welches Flugzeug wo und wie orientiert steht (bzw. stehen wird – im Fall einer Prognose).

Ungeachtet des Aufwandes sei dahingestellt, ob diese Informationen überhaupt bereitgestellt werden können. Einen einfachen, aber handhabbaren Ansatz würde die Annahme einer ungerichteten Schallabstrahlung durch APUs sein.

Das Beispiel zeigt diese Situation: Die Richtungszuschläge wurden hier logarithmisch über die Abstrahlrichtungen gemittelt. Im Prinzip würde das heißen, dass die Orientierung der Flugzeuge auf den Abstellpositionen gleichmäßig verteilt über alle Richtungen ist.

## Fazit

- **Unter ungünstigen Bedingungen (lange APU-Laufzeit, ungünstige Positionierung/Orientierung des Flugzeugs, keine Abschirmung) kann APU-Betrieb Dauerschallpegel lokal deutlich erhöhen.**
- **Dieser Effekt kann durch geschickte Wahl der Betriebsbedingungen stark reduziert werden (insbesondere bei Parallelbahnsystemen).**
- **Eine vereinfachende Alternative für konventionelle Rechenverfahren wäre die Annahme ungerichteter Schallabstrahlung durch Hilfsaggregate.**
- **Bezüglich Maximalpegeln ist APU-Betrieb unkritisch.**
- **Rollvorgänge können aufgrund der kurzen Einwirkzeit (abgesehen von sehr ungünstigen Konfigurationen) vernachlässigt werden**

Zusammenfassend können zum Einfluss von Hilfsaggregaten auf die Gesamtlärmbelastung folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Bei langen Laufzeiten und ungünstiger Positionierung des Flugzeuges kann der Lärm von APUs Dauerschallpegel lokal auch in größeren Entfernungen um mehrere Dezibel erhöhen, falls eine ungehinderte Schallausbreitung möglich ist.
- Dies kann durch geeignete Orientierung des Flugzeugs weitestgehend reduziert werden. Insbesondere bei Parallelbahnsystemen, bei denen die Abstellpositionen zwischen den Bahnen positioniert sind, dürfte APU-Betrieb nur zu geringen Erhöhungen der Lärmbelastung führen.
- Für konventionelle Rechenverfahren könnte man aus praktischen Gründen (Bereitstellung der Informationen über Stellflächen und Flugzeugorientierung) die Annahme einer ungerichteten Abstrahlung treffen.
- Bezüglich Maximalpegeln ist der APU-Betrieb als unkritisch einzustufen – die Belastung wird hier primär durch die langen Laufzeiten verursacht.

Die durchgeführten Untersuchungen auf der Basis des A320 dürften repräsentativ für viele Flughäfen sein, da Flugzeuge dieser Größenordnung den Großteil des Luftverkehrs bestreiten.

Abschließend noch eine Anmerkung zum Einfluss von Rollvorgängen: Die verfügbaren Daten weisen darauf hin, dass Rollvorgänge in der Regel hinsichtlich der Lärmbelastung vernachlässigbar sind. Die auftretenden Maximalpegel sind wesentlich niedriger als die bei Start und Landung erzeugten Pegel und die Einwirkdauern im Vergleich zum APU-Betrieb gering. Es sind allerdings Konfigurationen denkbar (z.B. kleinere Flughäfen, bei denen Bebauung nahe an den Rollwegen liegt), bei denen auch Rollvorgänge zusätzliche Belastungen erzeugen.

## Grundanforderung an Lärmbewertungsmaße

**„A practical noise index must be simple, practical, unambiguous, and capable of accurate measurement (using conventional, standard instrumentation). It must also be suitable for estimation by calculation from underlying source variables and robust - not over-sensitive to small changes in input variables.“**

ECAC Document Doc.29 3rd Edition

„Methodology for Computing Noise Contours Around Civil Airports“

Volume I, „Applications Guide“

**Diese Forderung muss auch auf Rechenverfahren erweitert werden !**



Deutsches Zentrum  
DLR für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Abschlussveranstaltung LFKV II, Göttingen, 17.09.2007, Folie 28

Die dritte Auflage des ECAC-Dokuments 29 stellt im ersten Teil, dem „Applications Guide“ eine Grundanforderung, die von einem praktikablen Lärmbewertungsmaß eingehalten werden sollte:

- Es sollte einfach, eindeutig definiert und messtechnisch mit Standardausrüstung ermittelbar sein.
- Es sollte auf der Basis von verfügbaren Daten (Flugbetriebsdaten und flugzeugspezifische Daten) berechenbar sein.
- Es sollte stabil gegenüber kleinen Änderungen in den Eingangsdaten sein.

Diese eigentlich selbstverständliche Forderung sollte auch auf Lärmberechnungsverfahren jeder Art erweitert werden: Solche Verfahren sollten so eindeutig definiert und auch umgesetzt – also programmiert – werden können, dass eine Berechnung nicht aufgrund kleiner Änderungen in den Randbedingungen (z.B. in der Segmentierung von Flugwegen) starke Änderungen in den Rechenergebnissen liefert.

Die folgenden Ausführungen befassen sich durchweg mit sog. Maximalpegelkriterien. Gleichwohl sind im Rahmen des Projekts noch weitergehenden Untersuchungen sowohl zu Bewertungsmaßen als auch zu Berechnungsverfahren durchgeführt worden.

## Maximalpegelkriterien

### Gebräuchliche Kriterien:

- **Number Above Threshold (NAT)**
- **Aufwachwahrscheinlichkeit nach DLR-Kriterium (AWR)**
- **mittlerer Maximalpegel**
- **Noise and Number Index (NNI)**

### Mindestanforderung an Berechenbarkeit:

- **Berechnung einer Pegel-Häufigkeitsverteilung mit ist möglich**

Neben den weltweit schon lange verwendeten Dauerschallpegeln – die eigentlich die Standard-Bewertungsmaße darstellen – haben sich in den letzten Jahren verstärkt auch allein auf Maximalpegeln basierende Kriterien etabliert. Gerade in Deutschland gibt es zu diesen Bewertungsmaßen eine lange Historie, und im novellierten Fluglärngesetz haben sie mittlerweile auch Eingang gefunden.

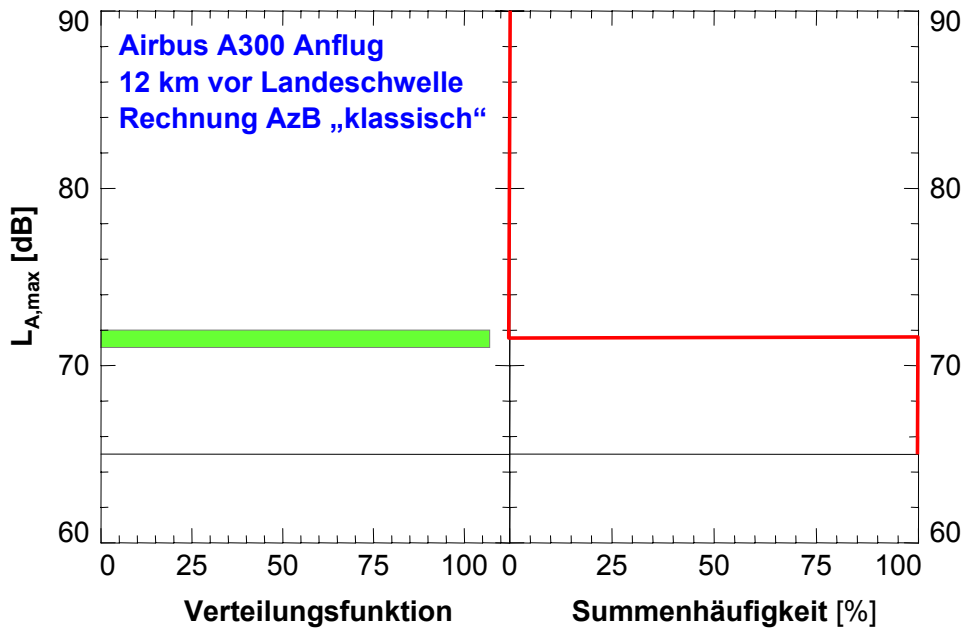
Der Anwendungsbereich von Maximalpegelkriterien ist primär auf die Nacht ausgelegt, da Störungen des Schlafes besser mit Maximalpegeln korrelieren als mit zeitintegrierten Pegeln. In Deutschland sind hier zwei wichtige Vertreter zu nennen:

- Number Above Threshold bzw. NAT-Kriterien beruhen auf einer Kombination von Pegel und Häufigkeit. Auf der Basis von NAT-Kriterien wird die Nacht-Lärmschutzzone nach dem neuen Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm ermittelt.
- Im Rahmen des Vorgängerprojekts „Leiser Flugverkehr“ wurde am DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin eine Dosis-Wirkungs-Beziehung (DLR-Kriterium) entwickelt, die es ermöglicht, auf der Basis gemessener oder berechneter Maximalpegel Aufwachwahrscheinlichkeiten und damit auch die Anzahl von fluglärminduzierten Aufwachreaktionen zu ermitteln.

Daneben wird in Deutschland noch der mittlere Maximalschallpegel verwendet. Er findet allerdings eher Anwendung bei der Auslegung von Schallschutz. Im internationalen Rahmen war bis vor einigen Jahren noch der Noise and Number Index NNI im Gebrauch (UK, CH). Er wurde aber – trotz gewisser Vorteile – fast durchweg durch Dauerschallpegel abgelöst. Dies trifft auch auf den in den Niederlanden benutzten Kosten-Index zu.

Um ein Maximalpegelkriterium ermitteln zu können, ist die Kenntnis einer lokalen (berechneten oder gemessenen) Maximalpegel-Häufigkeitsverteilung notwendig, was generell kein Problem ist. In gewissen Fällen – wenn z.B. nur unvollständige Verteilungen zur Verfügung stehen – kann es aber durchaus zu Komplikationen bei der Ermittlung solcher Kriterien kommen.

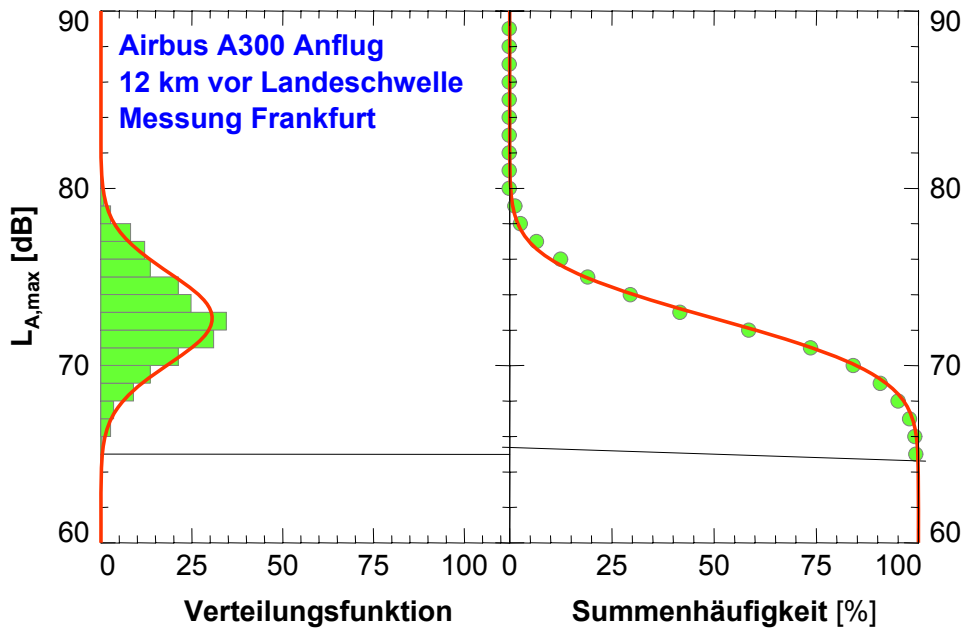
## Modell normalverteilter Pegel bei Maximalpegel-Kriterien



Bei Bestimmung von Maximalpegelverteilungen liefern Fluglärmrechnungsverfahren oft nur einen festen Pegelwert für eine gegebene Kombination von Immissionsort, Flugstrecke und Flugzeugtyp. Für mehrere Vorbeiflüge des gleichen Typs erhält man damit eine Pegelhäufigkeitsverteilung, die nur einen diskreten Wert zeigt. Die zugehörige Summenhäufigkeitsfunktion ist also eine Stufenfunktion.

Die Abbildung zeigt diesen Sachverhalt, wie er sich bei einer klassischen Berechnung nach dem AzB-Verfahren für einen Anflug eines A300 in 12 km Abstand am Standort einer Messstation der Fluglärmüberwachungsanlage ergeben würde.

## Modell normalverteilter Pegel bei Maximalpegel-Kriterien

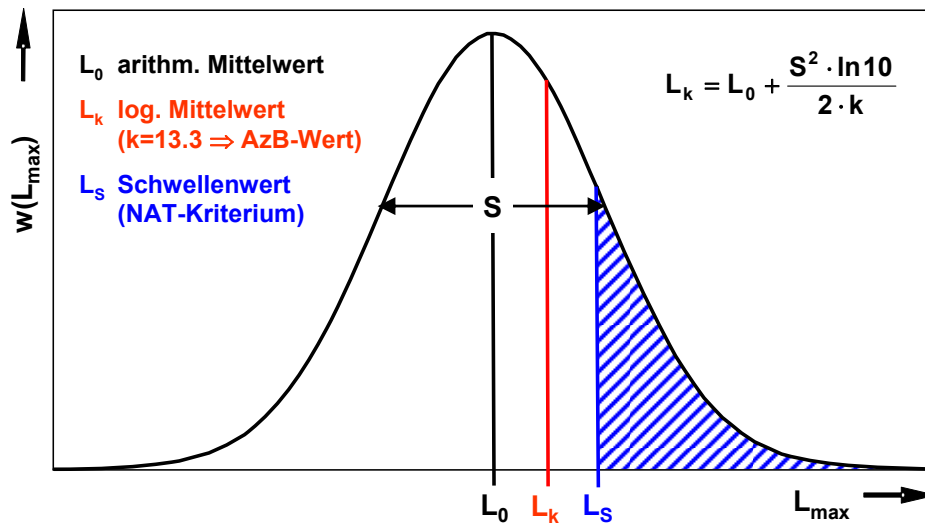


Gemessen wird an diesem Standort für Flugzeuge des Typs A300 aber eine Pegelverteilung. Der Mittelwert dieser Verteilung sollte im Idealfall den berechneten Wert repräsentieren.

Auswertungen für eine Vielzahl von Messstationen an verschiedenen deutschen Flughäfen haben ergeben, dass in den meisten Fällen bei einer festen Kombination von Flugstrecke und Flugzeugtyp bzw. -Kategorie derartige Verteilungen nahezu Normalverteilungen entsprechen.

## Modell normalverteilter Pegel bei Maximalpegel-Kriterien

Normalverteilung 
$$w(L_{\max}, L_0, S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot S} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{L_{\max} - L_0}{S} \right)^2 \right]$$

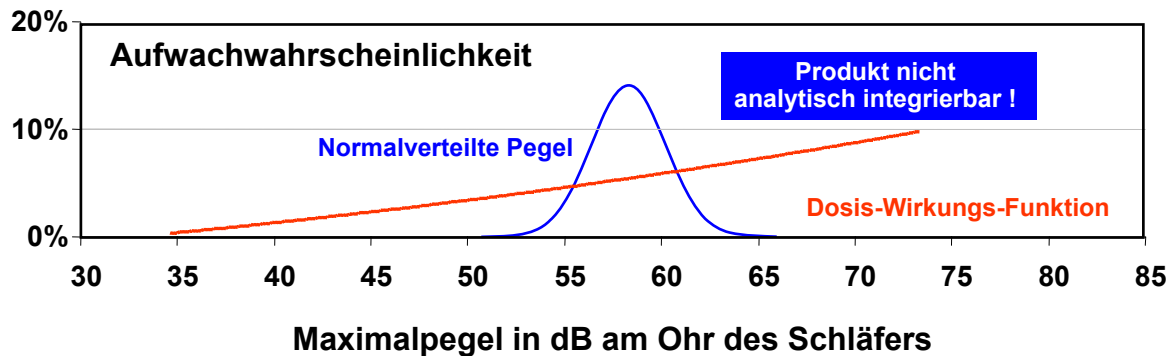


Basierend auf dieser Tatsache kann man ein Modell definieren, dass davon ausgeht, dass ein bestimmter Flugzeugtyp (bzw. Flugzeugklasse nach AzB-Notation) keinen festen Emissionswert liefert, sondern dass die Emissionspegel normalverteilt sind.

Dies hat u.a. Einfluss auf die Bildung von Mittelwerten: Pegel werden in der Regel logarithmisch gemittelt, und zwar auf der Basis eines bestimmten Äquivalenzparameters  $k$ . Der sich dadurch ergebende Mittelwert  $L_k$  ist größer als der arithmetische Mittelwert  $L_0$  der Verteilung. Die Differenz hängt quadratisch von der Standardabweichung der Normalverteilung ab.

Bezüglich der Berechnung einer Maximalpegelverteilung heißt dies, dass die klassisch ermittelte, aus wenigen diskreten Werten bestehende Verteilung verschmiert wird. Realisiert werden kann dies dadurch, dass man eine solche Verteilung mit einer Normalverteilung einer bestimmten Standardabweichung faltet.

## Das DLR-Kriterium



### Vorteil einer integrierbaren Näherung:

- ⇒ keine Probleme mit Pegelklassenbreiten
- ⇒ Erhöhung der Rechengeschwindigkeit

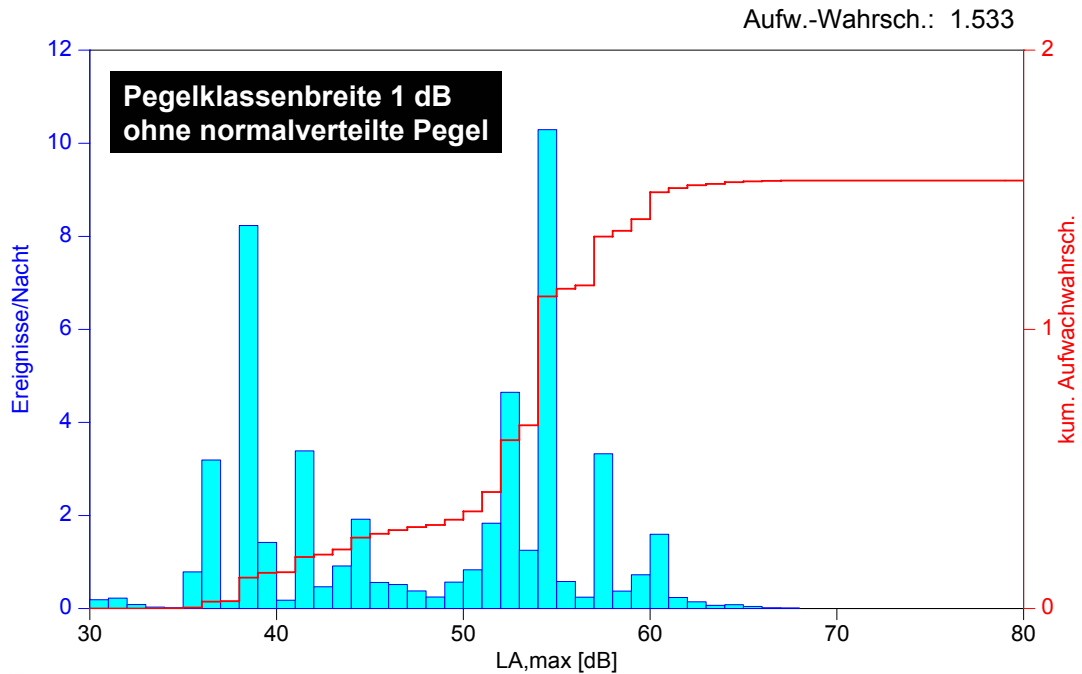
Das DLR-Kriterium liefert für ein einzelnes Geräusch einen Zusammenhang zwischen dem Maximalpegel (ermittelt am Ohr des Schläfers) und einer Aufwachwahrscheinlichkeit. Diese wird dann über alle auftretenden Geräusche aufsummiert.

Der funktionale Zusammenhang ist ein Polynom 2. Grades. Unterhalb eines Auslösewertes von etwa 33 dB wird die Aufwachwahrscheinlichkeit gleich Null gesetzt.

Geht man bei einer Berechnung vom klassischen Ansatz fester Pegelwerte aus, ist die Berechnung einfach durchzuführen. Wenn man dagegen verteilte Pegel ansetzt, muss die Verteilungsfunktion mit der Dosis-Wirkungs-Beziehung gefaltet werden. Eine Normalverteilung kann aber analytisch nicht mit einem quadratischen Polynom kombiniert werden – man muss hier also über eine Aufteilung in Pegelklassen bestimmter Breite arbeiten. Über diese Klassenbreite bringt man aber einen Parameter ein, der das Berechnungsergebnis beeinflussen kann.

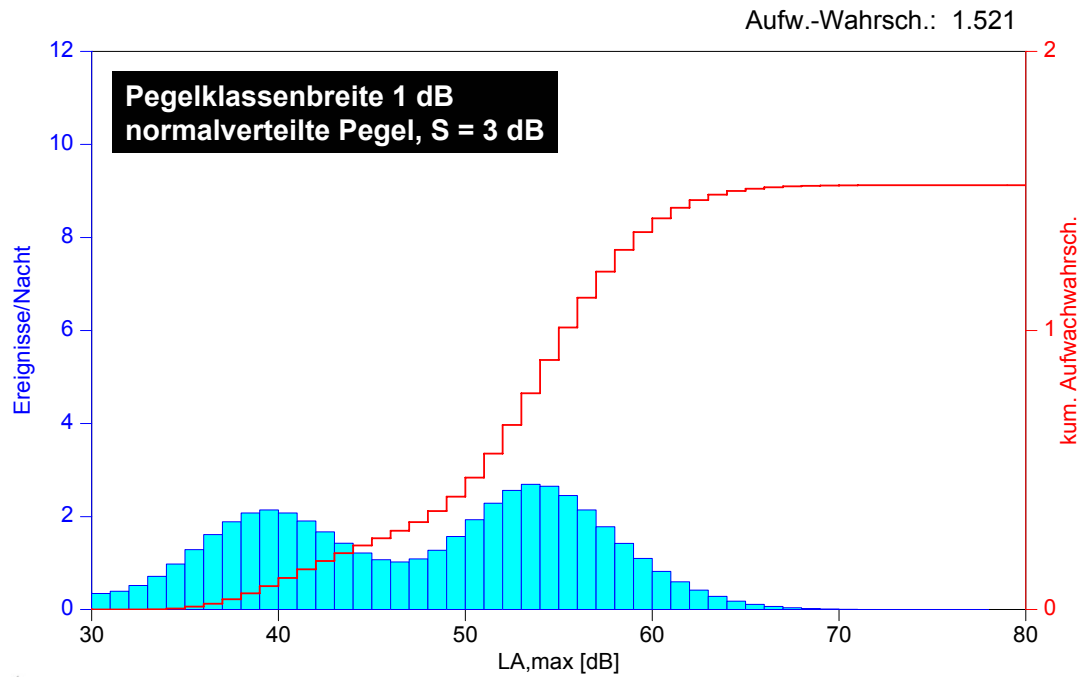
Wäre die Dosis-Wirkungs-Beziehung linear, könnte man die Verteilung analytisch falten und man würde die Einführung von Pegelklassen vermeiden. Zusätzlich könnte man dadurch noch die Rechengeschwindigkeit erhöhen.

## DLR-Kriterium und Häufigkeitsverteilung



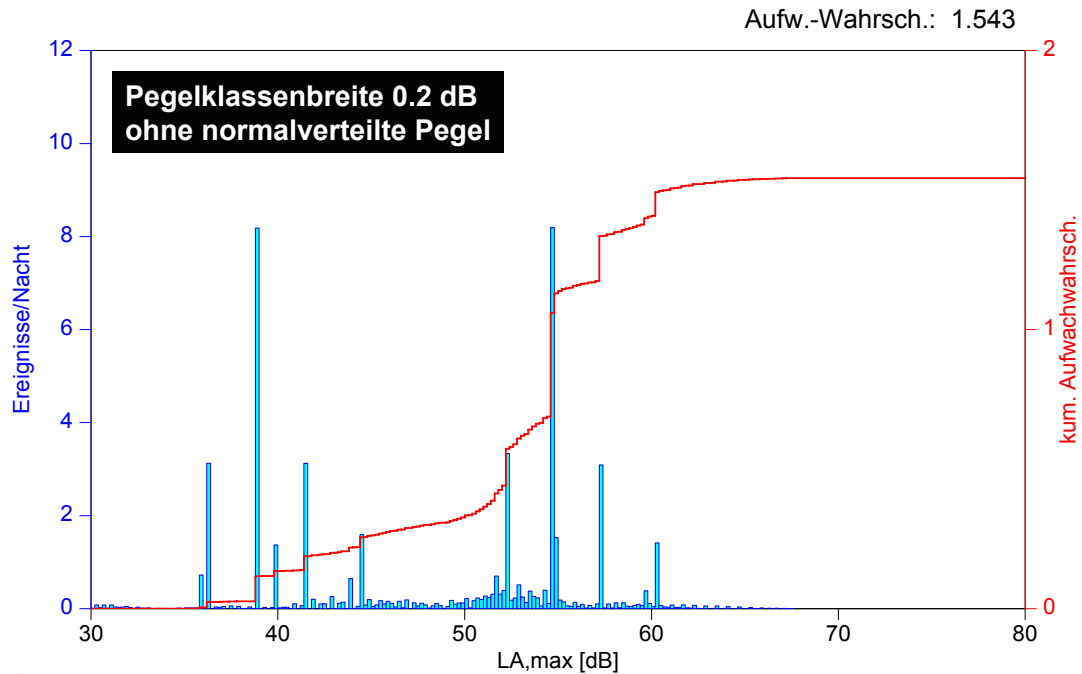
Die Abbildung zeigt eine rechnerisch ermittelte Pegelverteilung für den klassischen Fall. Die Pegelklassenbreite ist mit 1 dB angesetzt. Die rote Kurve zeigt den kumulierten Verlauf der Aufwachwahrscheinlichkeit. Sie weist starke Sprünge auf.

## DLR-Kriterium und Häufigkeitsverteilung



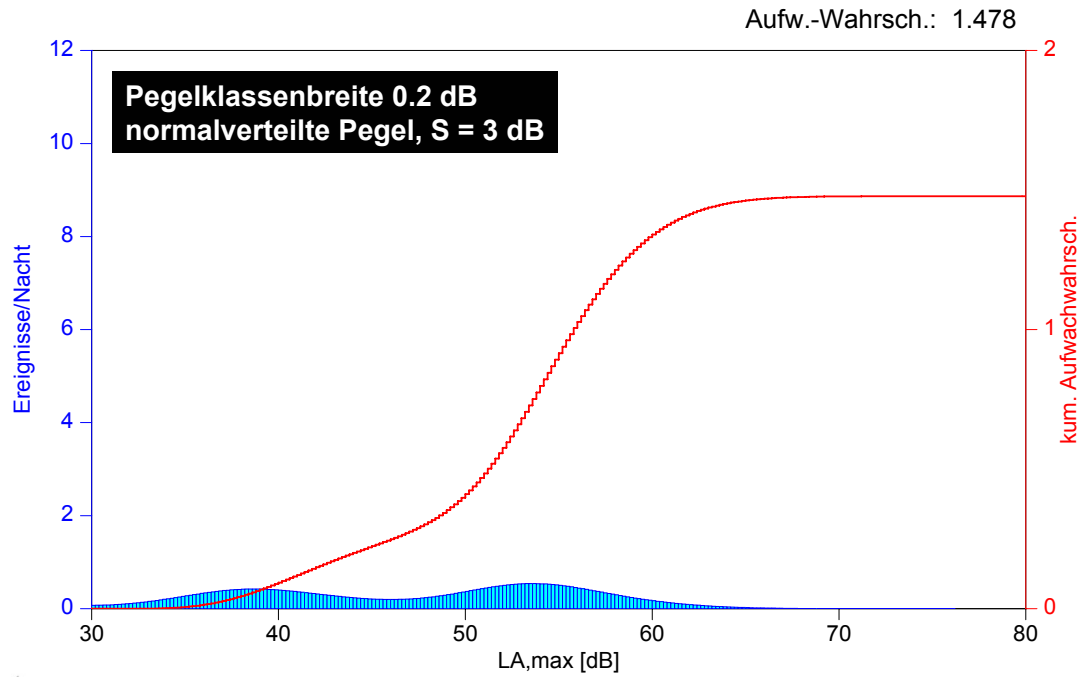
Geht man bei gleicher Klassenbreite von normalverteilten Pegeln mit einer Standardabweichung von 3 dB aus, so wird der Verlauf der kumulierten Aufwachwahrscheinlichkeit stetiger, der resultierende Wert sinkt im betrachteten Fall leicht.

## DLR-Kriterium und Häufigkeitsverteilung



Verringert man beim klassischen Ansatz lediglich die Klassenbreite – hier auf 0.2 dB – so wird der Verlauf der kumulativen Aufwachwahrscheinlichkeit nur lokal gleichmäßiger, ist aber immer noch von stärkeren Sprüngen durchsetzt.

## DLR-Kriterium und Häufigkeitsverteilung



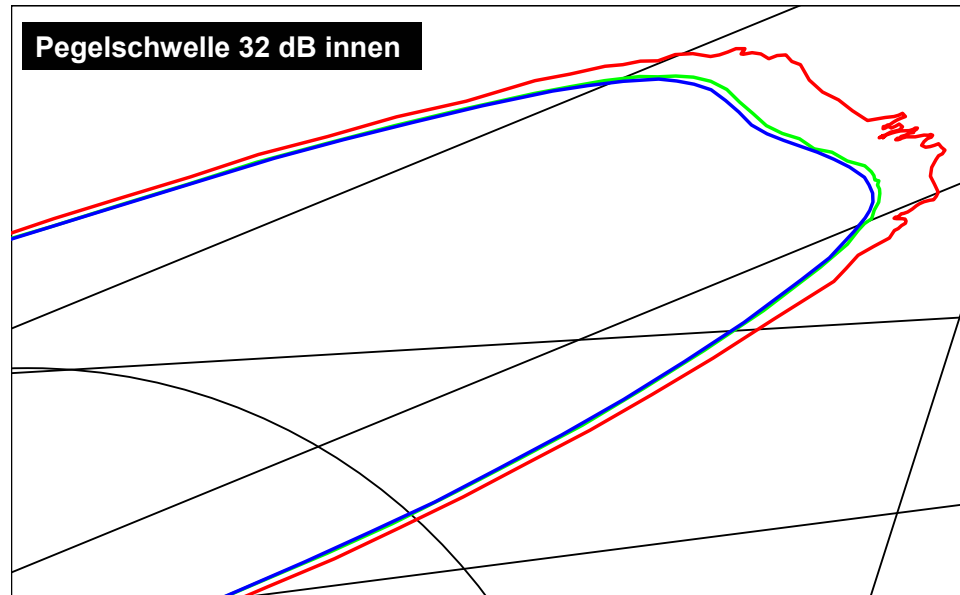
Kombiniert man nun die Klassenbreite von 0.2 dB mit einer Normalverteilung, so wird der Verlauf der kumulierten Aufwachwahrscheinlichkeit nahezu stetig.

## Umsetzung des DLR-Kriteriums: Einfluss Klassenbreite

Kontur AWR = 1

Klassenbreite

- 1 dB
- 0.2 dB
- 0.1 dB



Die vorangegangenen Darstellungen zeigten den Einfluss der Klassenbreite nur lokal. Bezogen auf Konturen konstanter Aufwachreaktionen ergibt sich hier das obige Bild: Die Klassenbreite wurde hier zwischen 1 und 0.1 dB variiert. Angenommen wurden – wie auch in den folgenden Darstellungen – normalverteilte Pegel mit einer Standardabweichung von 3 dB. Man erkennt, dass sich bei zu großer Klassenbreite Unstetigkeiten in der berechneten Kontur ausbilden. Erst unterhalb von 0.2 dB treten kaum noch Veränderungen im Kurvenverlauf auf.

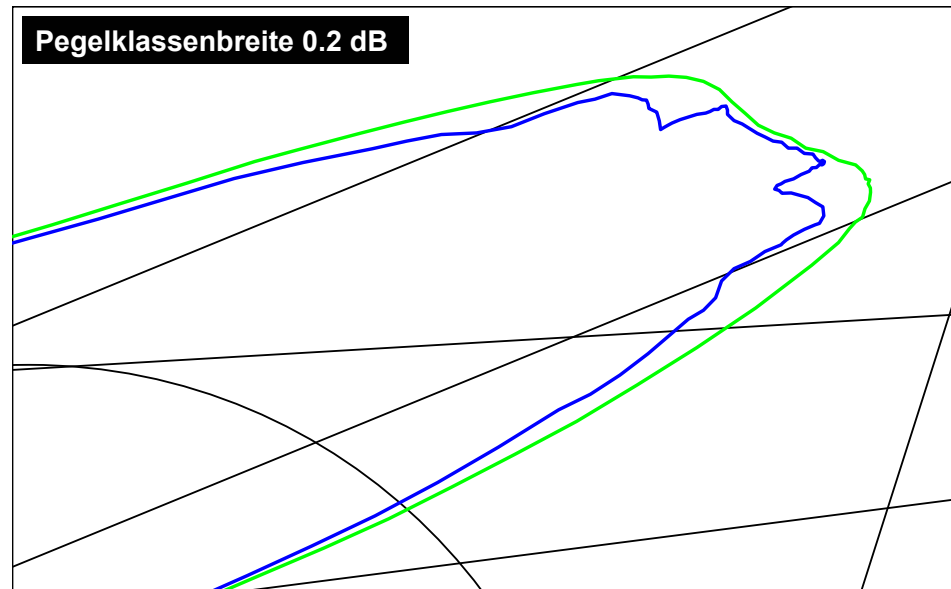
Bei dieser Berechnung wurden – entsprechend der Definition des DLR-Kriteriums – alle Maximalpegel mit Werten oberhalb von 32 dB berücksichtigt.

## Umsetzung des DLR-Kriteriums: Einfluss Schwelle

Kontur AWR = 1

Schwelle innen

- 40 dB
- 32 dB



Die AzB in der Fassung von 1984 legt fest, dass bei der Berechnung nur Geräusche mit Maximalpegeln oberhalb von 55 dB zu berücksichtigen sind. Bei einer mit 15 dB angesetzten Pegeldifferenz zwischen Innen und Außen entspricht das einer Berücksichtigung von Pegeln mit mehr als 40 dB im Innenraum.

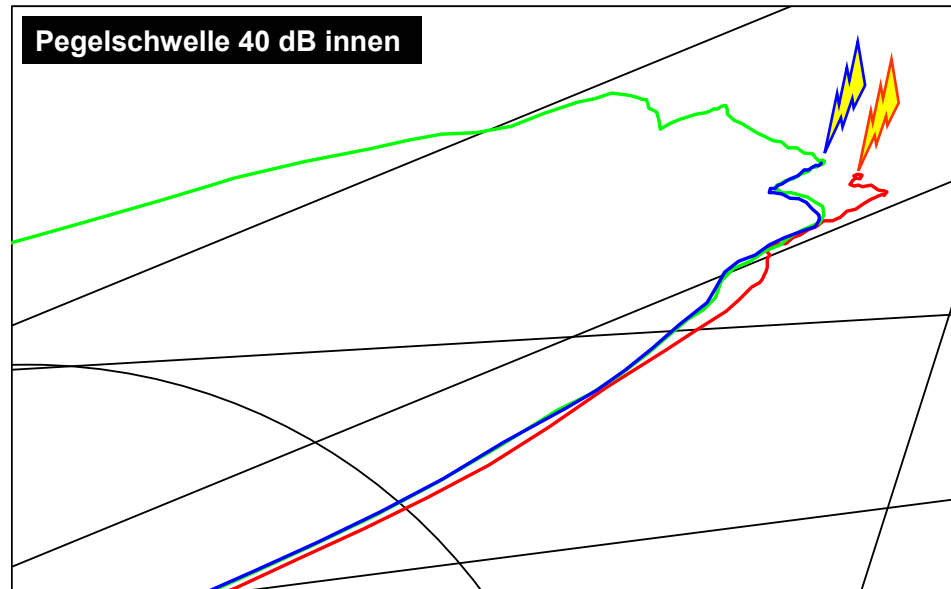
Setzt man diese Randbedingung an, so ergeben sich gegenüber einem Schwellwert von 32 dB deutliche Unterschiede, insbesondere auch Sprünge im Kurvenverlauf. Das impliziert, dass bei hohen Anteilen von niedrigen Maximalpegeln diese bei der Berechnung des DLR-Kriteriums noch signifikante Beiträge liefern können. Dies ist insbesondere im Bereich von Anflugstrecken der Fall.

## Umsetzung des DLR-Kriteriums: Problemfall

Kontur AWR = 1

Klassenbreite

- 1 dB
- 0.2 dB
- 0.1 dB



Unter ungünstigen Randbedingungen, d.h. hoch angesetzter Schwelle und hoher Klassenbreite, kann es dazu kommen, das Rechenverfahren, die eine Lärmkontur durch einen Tracing-Algorithmus ermitteln (die Kontur also quasi „abrechnen“) ins Leere laufen. Dieser Effekt tritt nicht auf, wenn Konturen aus berechneten Gittern durch Interpolation ermittelt werden. Sofern die Gitterweite aber nur klein genug angesetzt wird, werden aber auch hier Sprünge im Kurvenverlauf auftreten.

## „Number Above Threshold“ (NAT-Kriterien )

- NAT-Kriterien definieren die maximal erlaubte Überschreitungshäufigkeit eines Maximalpegel-Schwellenwerts.
- Sie werden u.a. zur Beurteilung der Wirkung nächtlichen Fluglärms herangezogen (**neues Fluglärmgesetz**).

### Das Kriterium

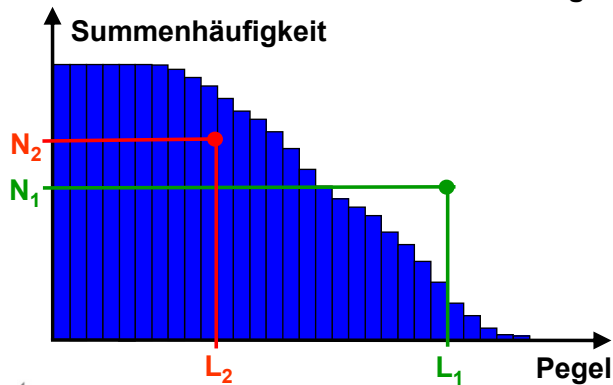
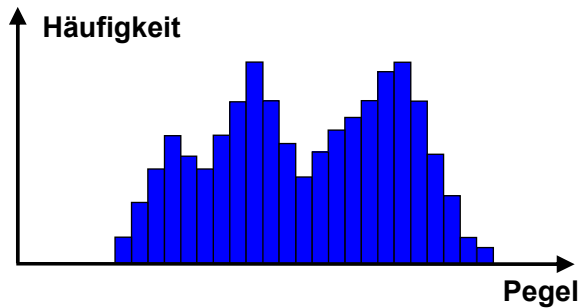
**NAT N x L dB**

ist verletzt, wenn pro Nacht ein Maximalpegel von **L dB** mehr als **N mal** überschritten wird.

NAT-Kriterien definieren die maximal erlaubte Überschreitungshäufigkeit eines bestimmten Schwellenwerts im Maximalpegel. Sie liegen der Ermittlung der Nachtschutzzone nach dem novellierten Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm zu Grunde, wurden in der planerischen Praxis aber schon seit Jahren angewandt.

Ein NAT-Kriterium  $N \times L$  dB ist verletzt, wenn pro Nacht ein Maximalpegel von  $L$  dB mehr als  $N$ -mal überschritten wird.

## NAT-Kriterien und Pegelhäufigkeitsverteilung



Ein NAT-Kriterium wird durch einen Punkt im der Summenhäufigkeitsdiagramm der Maximalpegel repräsentiert.

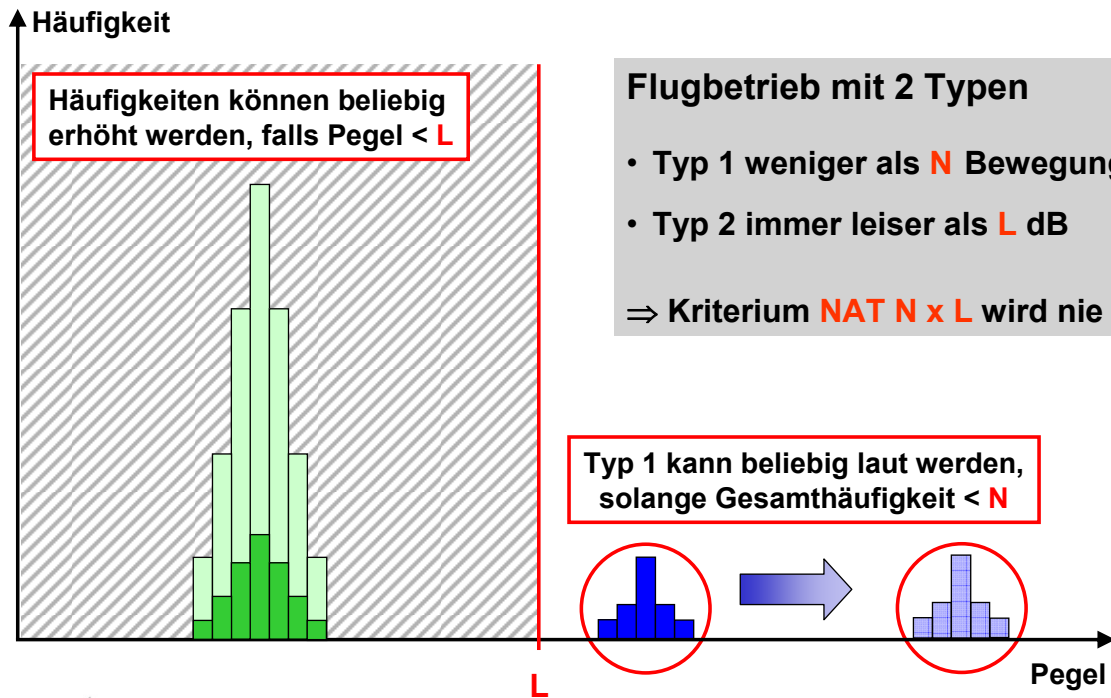
NAT  $N_1$  x  $L_1$  dB erfüllt

NAT  $N_2$  x  $L_2$  dB verletzt

Betrachtet man eine Pegelhäufigkeitsverteilung und die zugehörige Summenhäufigkeitsfunktion, so wird ein NAT-Kriterium durch einen Punkt im Summenhäufigkeitsdiagramm repräsentiert.

Liegt dieser Punkt oberhalb der Summenhäufigkeitsfunktion, so ist das Kriterium erfüllt. Liegt er darauf oder darunter, so ist es verletzt.

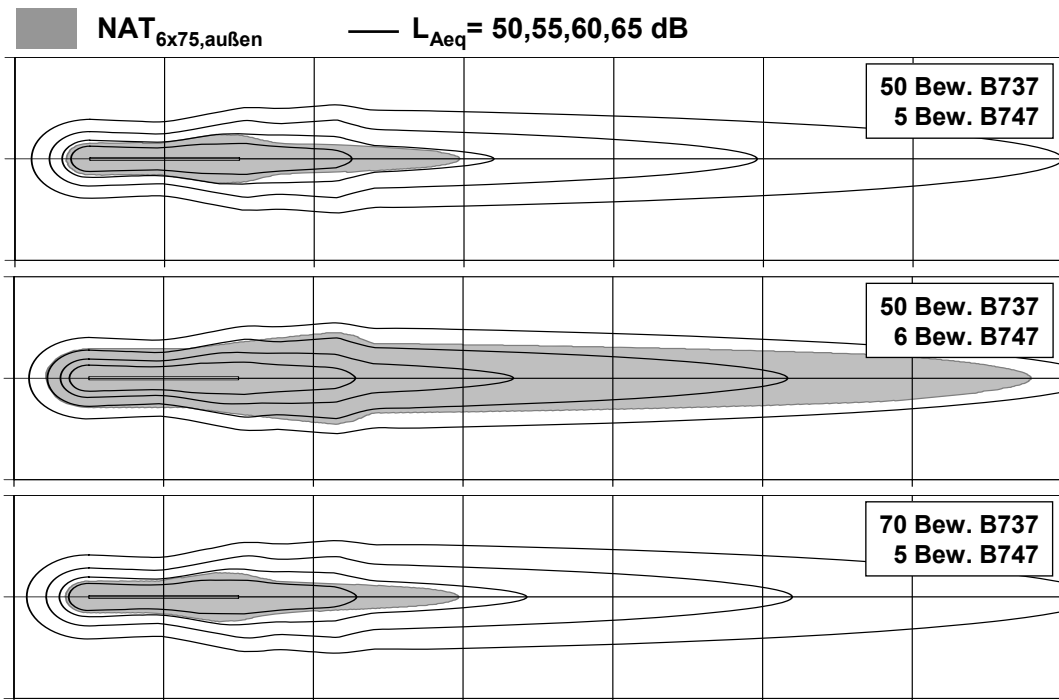
## Problematik der NAT-Kriterien als Punktkriterium



Als Punktkriterium in der Summenhäufigkeitsdarstellung hat ein NAT-Kriterium gewisse negative Eigenschaften.

Dargestellt ist hier die Situation für einen künstlichen Flugbetrieb mit zwei Typen. Typ 1 weist immer weniger als  $N$  Bewegungen auf. Typ 2 ist immer leiser als der vom Kriterium definierte Pegelwert  $L$ . In diesem Fall kann man die Pegel von Typ 1 bzw. die Häufigkeiten von Typ 2 beliebig erhöhen: Die durchschnittliche Lärmbelastung kann dadurch beliebig hochgetrieben werden, ohne dass das NAT-Kriterium je verletzt würde.

## Beispielrechnung zur NAT-Problematik



Bezogen auf Lärmkonturen kann dies folgende Auswirkungen haben: Grau dargestellt ist hier die Kontur für 6-maliges Überschreiten eines Pegelwerts von 75 dB außen (das sog. „Jansen-Kriterium“). Hinterlegt sind Konturen des äquivalenten Dauerschallpegels für die Nacht. Berechnet wurde das Ganze auf die klassische Weise, also ohne normalverteilte Pegel nach dem AzB-Verfahren.

Die Ausgangssituation (oberes Teilbild) zeigt die Konturen für 50 Bewegungen des Typs B737 und 5 Bewegungen des Typs B747. Die NAT-Kontur ist hier identisch mit dem 75 dB Maximalpegelfootprint für die B737.

Fügt man nun eine Bewegung einer B747 hinzu (mittleres Bild), so sind die 6 notwendigen Bewegungen gerade erreicht. Die NAT-Kontur entspricht dann dem Maximalpegelfootprint der B747, der natürlich wesentlich größer ausfällt als derjenige der etwa fünf mal leichteren B737. Der äquivalente Dauerschallpegel nimmt allerdings nur unwesentlich zu.

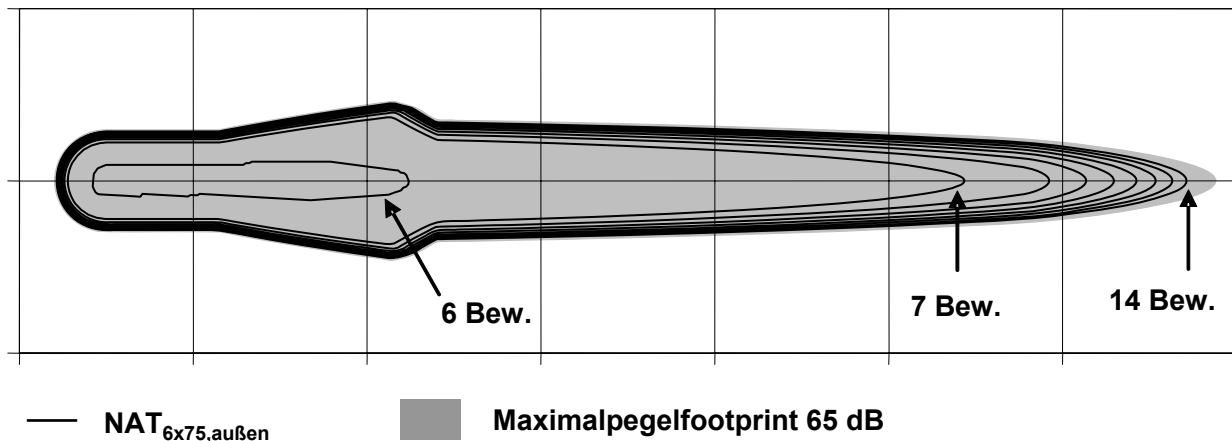
Nimmt man die zusätzliche Bewegung der B747 wieder zurück (unteres Bild), fügt aber 20 zusätzliche Bewegungen der B737 hinzu, so ändert sich der äquivalente Dauerschallpegel praktisch nicht. Die NAT-Kontur schrumpft aber wieder auf den Footprint der B737.

Diese Verhaltensweise eines NAT-Kriteriums ist natürlich im Widerspruch zur Forderung des ECAC-Dokuments 29 nach einer Stabilität gegenüber kleinen Änderungen.

**Anmerkung:** Das dargestellte Beispiel entspricht natürlich nicht exakt der Definition des verwendeten NAT-Kriteriums, da 6 Ereignisse das Kriterium gerade noch erfüllen. In der Praxis wird aber aus rechentechnischen Gründen als Kontur gerade die Kurve  $N \times X$  dB berechnet. Im Grunde müsste man bezogen auf den zu Grunde liegenden Zeitraum von 180 Nächten eine zusätzliche Bewegung einer B747 hinzufügen, was etwa 6.01 Bewegungen pro Nacht entspräche.

## Das entschärfte Beispiel

### 6 – 14 Abflüge B747, Rechnung mit normalverteilten Pegeln



Das vorangegangene Beispiel ist aber insofern unrealistisch, als es vom klassischen Ansatz ausgegangen ist. Dieses Bild zeigt, wie sich die Annahme von normalverteilten Pegeln auswirkt. Es zeigt einen Vergleich zwischen dem 60 dB Maximalpegelfootprint sowie der Kontur NAT 6x75 dB, wie sie sich für eine B747 bei sukzessiver Erhöhung der Bewegungszahl von 6 auf 14 Bewegungen pro Nacht ergibt.

Man erkennt, dass sich die NAT-Kontur mit zunehmender Bewegungszahl vergrößert und dem Maximalpegelfootprint annähert, ihn aber nicht erreicht. Kleine Änderungen wirken sich also hier nicht mehr so dramatisch aus. Weiterhin gibt es aber einen starken Sprung beim Übergang von 6 auf 7 Bewegungen.

Tendenziell bleibt das charakteristische Verhalten von NAT-Konturen also auch bei normalverteilten Pegeln erhalten. In der Praxis wird der Effekt nur in sehr seltenen Fällen beobachtet, weil er aufgrund der Vielfalt von Flugzeugmustern und Flugstrecken in der Regel verwischt wird. Unter diesem praktischen Gesichtspunkt kann man den Einsatz von NAT-Kriterien verantworten, zumal sie sich im praktischen Einsatz in den letzten Jahren bewährt haben. Nichtsdestoweniger sollte man die charakteristischen Eigenschaften dieser Kriterien berücksichtigen, wenn man NAT-Konturen interpretiert.

Anmerkung: Eine Kontur für 6 Bewegungen ergibt sich in diesem Beispiel übrigens aufgrund der Tatsache, dass die Normalverteilung rechnerisch nur mit einer gewissen Genauigkeit bestimmt werden kann. Eigentlich dürfte diese Kontur nicht zu ermitteln sein.

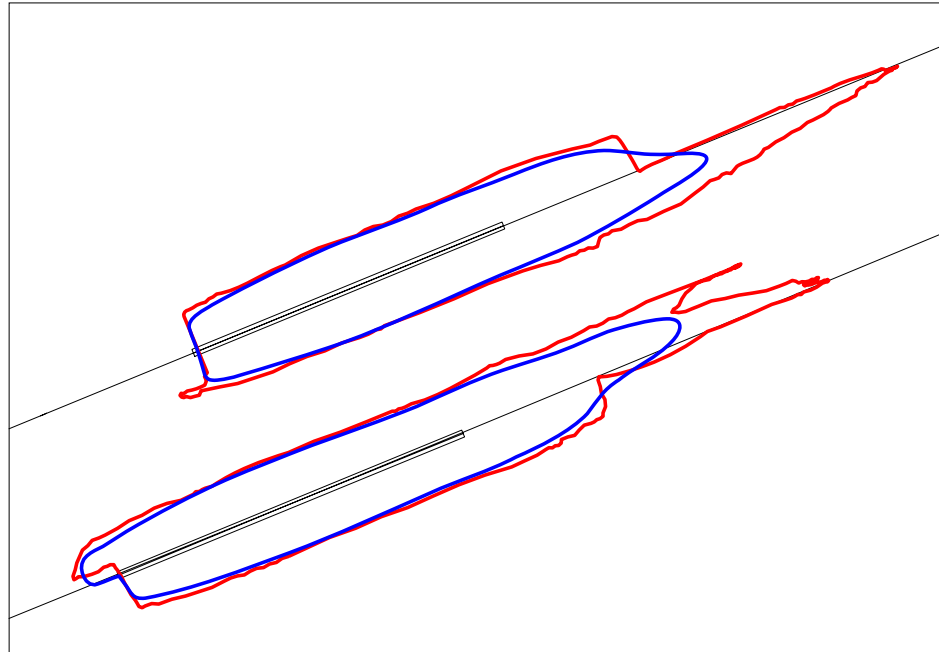
## Beispiel: Auswirkung des Ansatzes auf NAT-Konturen

Standardabw.

— 0 dB

— 3 dB

**Ansatz ist  
notwendig –  
und auch in  
neuer AzB  
implementiert.**



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Abschlussveranstaltung LFKV II, Göttingen, 17.09.2007, Folie 46

Die vorhergehende Folie zeigte eine Kombination von einem Flugzeugmuster mit einer Flugstrecke. In der Praxis tragen aber viele Muster auf vielen Strecken zur Lärmbelastung bei. Wenn man in solchen Fällen ohne das Modell der Normalverteilung arbeitet kann dies zu vollkommen unrealistischen Konturverläufen führen, wie aus obigem Beispiel ersichtlich ist.

Es ist also notwendig, bei der Berechnung von Maximalpegelkriterien (und insbesondere NAT-Kriterien) mit normalverteilten Pegeln zu arbeiten. Aus diesem Grund ist dieser Ansatz auch in den Entwurf der neuen AzB übernommen worden.

## Fazit zu Maximalpegelkriterien

- **Maximalpegelkriterien sind zur Beschreibung von nächtlichem Fluglärm gegenüber Dauerschallpegeln vorzuziehen.**
- **Beim DLR-Kriterium ist darauf zu achten,**
  - **dass die Klassenbreite der Pegelverteilung richtig gewählt wird und**
  - **dass die Pegelschwelle niedrig genug angesetzt wird.**
- **NAT-Kriterien können unerwünschte Nebeneffekte bei stark inhomogenen Verkehrsszenarien zeigen. In der Praxis treten solche Fälle aber kaum auf.**
- **Das Modell normalverteilter Pegel ist bei Maximalpegelkriterien, die auf einer Pegelhäufigkeitsverteilung aufsetzen, auf jeden Fall erforderlich.**

Bezüglich der Anwendung von Maximalpegelkriterien kann man folgendes Fazit ziehen:

- Zur Beschreibung von nächtlichem Fluglärm sind Maximalpegelkriterien den Dauerschallpegeln vorzuziehen. Anwendung beider Arten von Kriterien – wie im novellierten Fluglärmgesetz vorgeschrieben – kann zusätzliche Informationen liefern.
- Bei der Umsetzung des DLR-Kriteriums ist darauf zu achten, dass die Klassenbreite der verwendeten Pegelverteilung adäquat gewählt wird. 0.2 dB dürften in der Regel ausreichend sein.
- Außerdem sollten entsprechend der Definition alle Pegel ab 32 dB im Innenraum berücksichtigt werden, da insbesondere im Bereich von Anflugstrecken auch niedrige Pegel bei hohen Bewegungszahlen noch deutlich zum Kriterium beitragen können.
- NAT-Kriterien können prinzipiell unerwünschte Nebeneffekte (d.h. sprunghafte Änderungen) bei stark inhomogenen Verkehrsszenarien zeigen. In der Praxis treten solche Fälle aber kaum auf. Trotzdem sollte man bei der Interpretation von NAT-Kriterien sorgfältig vorgehen.
- Das Modell normalverteilter Pegel ist bei Maximalpegelkriterien, die auf einer Pegelhäufigkeitsverteilung beruhen, auf jeden Fall erforderlich.