

EINFLUSS LANGJÄHRIGER WETTERSITUATIONEN AUF FLUGLÄRM

U. Isermann, R. Schmid,

DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik

Abteilung Technische Strömungen, Bunsenstr. 10, 37073 Göttingen, Deutschland

Zusammenfassung

Temperatur und Wind können die Schallausbreitungsrichtung durch die Atmosphäre beträchtlich beeinflussen. In akustischen Strahlenmodellen äußert sich dies unter anderem durch Ab- oder Aufwärtsbrechung der Bahnenverläufe. Konventionelle Fluglärmberechnungsverfahren berücksichtigen die Einflüsse von Wind- und Temperaturgradienten auf die Schallausbreitungsrichtung aber nicht. Die Fragestellung war, zu welchen Differenzen es bei Immissionspegeln in der Nähe eines Flughafens mit diesen vereinfachenden Annahmen kommt.

Für den Flughafen Hahn führte die Auswertung von realen Wetterdaten des repräsentativen Jahres 2001 zu einer meteorologischen Klassifizierung in vier Windrichtungssektoren und sieben Stabilitätsklassen für den Tag bzw. fünf für die Nacht. Auf der Basis dieser Klassifizierung wurde mit dem DLR-Rechenprogramm SIMUL jeweils für ein An- und ein Abflug eines Flugzeugs vom Typ A320 der Sound Exposure Level SEL ermittelt. Da der SEL die Basisgröße für die Berechnung des energieäquivalenten Dauerschallpegels darstellt, sind die ermittelten Ergebnisse direkt auf dieses Bewertungsmaß übertragbar. Entsprechend der prozentualen Anteile des Auftretens der einzelnen Wetterkategorien wurden durch gewichtete Überlagerung Werte SEL_{met} berechnet, die für das Jahresmittel repräsentativ sind. Diese wurden mit entsprechenden Werten verglichen, die unter der Annahme einer isothermen Atmosphäre ohne Wind berechnet wurden. Insgesamt lässt sich für die untersuchte Situation folgendes Fazit aus den durchgeföhrten Berechnungen ziehen:

- Die bei konventionellen Berechnungsverfahren getroffene Annahme einer isothermen Atmosphäre 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 2 dB ab, wobei die hohen Differenzen nur lokal begrenzt 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.
- Die lokalen Standardabweichungen des SEL aufgrund des meteorologischen Jahresganges liegen im Bereich von bis zu 9 dB, wobei sie direkt unter den Flugbahnen in der Regel gegen Null gehen.

1. HINTERGRUND UND VORGEHENSWEISE

Luftfeuchtigkeit und Temperatur sowie Wind beeinflussen die Schallausbreitung z.T. beträchtlich. So können für eine typische Reiseflughöhe von 10 km die Variationen von relativer Feuchte und Temperatur – welche die Dämpfung durch die Wechselwirkung mit den Luftmolekülen im wesentlichen bestimmen – für ein durchschnittliches Jahr zu Schwankungen der Immissionspegel am Boden von bis zu 11 dB führen [1].

In Bodennähe gewinnen dagegen Temperatur- und Windgeschwindigkeitsgradienten auf die die Schallausbreitung an Bedeutung. Geht man von einem Strahlenmodell für die Schallausbreitung aus, so bewirken Schallgeschwindigkeitsgradienten - hervorgerufen durch Temperatur- und Windgeschwindigkeitsschichtung - eine Krümmung der Schallstrahlenverläufe. Dies führt schließlich entweder zur Aufwärtsbrechung und der Bildung von akustischen Schattenzonen oder aber zur Abwärtsbrechung (siehe Bild 1). Durch Abwärtsbrechung kann sich Schall in

Bodennähe über große Distanzen und sogar über Hindernisse hinweg ausbreiten. Derartige Situationen treten in der Regel bei Inversionswetterlagen auf und können vor allem in der Nacht oft zu Belästigungen in ruhigen Wohngebieten führen.

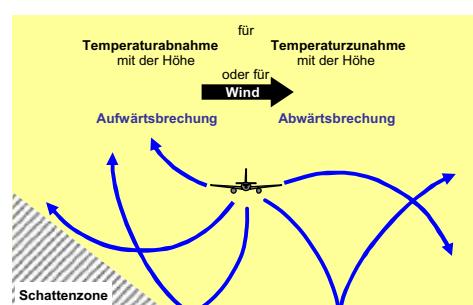


BILD 1. Einfluss von Wind- und Temperaturgradienten auf die Schallausbreitung im Strahlenmodell (schematisch).

Deshalb werden schon seit Ende der 90er Jahre am DLR-Institut für Physik der Atmosphäre (IPA) die

atmosphärischen Einflüsse der Schallausbreitung in Bodennähe untersucht. Diese sind vor allem bei Straßen- und Schienenlärm von großer Bedeutung, zeigen aber auch bei Fluglärm im Nahbereich der Rollbahn - also bei kleinen Flughöhen - Wirkung.

Auf der Grundlage eines gekoppelten meteorologischen und akustischen Euler-Modells [2,3] wurde am IPA ein vereinfachtes praxisnahe Verfahren zur Schallausbreitung entwickelt, das zur Einbindung in Fluglärm berechnungsprogrammen geeignet ist [4] und zu akzeptablen Rechenzeiten führt. Dieses vereinfachte Modell berücksichtigt sowohl die atmosphärischen Dämpfungseffekte als auch die Krümmung der Schallstrahlen in Abhängigkeit der atmosphärischen Bedingungen. Es wurde in das Fluglärm simulationsprogramm SIMUL [5] implementiert und diente als Grundlage für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen.

Die meteorologischen Bedingungen variieren sowohl tages- als auch jahreszeitlich beträchtlich. Konventionelle Fluglärm berechnungsverfahren wie die AzB [6,7] oder das Integrated Noise Model (INM) [8] berücksichtigen diese Einflüsse nicht explizit. Sie gehen in der Regel von einer isothermen Atmosphäre (also der Abwesenheit von Temperaturgradienten) aus und berücksichtigen Windeinfluss bei der Schallausbreitung nur pauschal, indem bei bodennaher Ausbreitung eine schwache Mitwindbedingung in jede Richtung angenommen wird. Ziel der Untersuchungen war herauszufinden, zu welchen Pegelabweichungen diese Annahmen gegenüber der Berücksichtigung von realen meteorologischen Bedingungen in der Nähe eines Flughafens führen. Da die in der Praxis verwendeten Rechenverfahren hauptsächlich zur Ermittlung der Schallimmissionen über längere Zeiträume dienen, wurden vor allem die auf ein Jahres- oder Halbjahresmittel bezogenen Abweichungen quantifiziert.

Als Grundlage der Untersuchung wurden Wetterdaten für den Flughafen Hahn aus dem Jahr 2001 verwendet, die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bereitgestellt wurden. Diese wurden zunächst hinsichtlich der Windrichtungsverteilung und der meteorologischen Stabilitätsklassen mit dem Ziel analysiert, den Jahrgang auf eine handhabbare Anzahl von Kombinationen von Wind- und Stabilitätsklassen zu reduzieren. Anschließend erfolgten Immissionsberechnungen eines Ab- und Anflugs einer A320 mit dem Programm SIMUL. Ermittelt wurde der Sound Exposure Level (SEL) im Bereich von 70 bis 90 dB. Das entspricht typischerweise einem 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 entwickelten Ausbreitungsmodell. Um bei der Untersuchung keine Vermischung mit anderen Effekten zu erhalten, wurden Einflüsse der Topografie und der meteorologischen Bedingungen auf die Flugleistungen - also insbesondere auf Triebwerksleistung und Steigverhalten - nicht berücksichtigt.

2. DAS IPA-SCHALLAUSBREITUNGSMODELL

Das IPA-Modell basiert auf der in der Meteorologie üblicherweise benutzten Einteilung in Stabilitätsklassen nach Klug-Manier mit sechs Klassen für eine neutrale Schichtung und je drei Klassen für eine stabile und labile Atmosphäre (siehe Tabelle 1). Die Unterteilung dieser Kategorien erfolgt auf der Grundlage der in 10 m Höhe gemessenen Windgeschwindigkeit $v_{w,10}$.

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

TAB 1. Einteilung in Stabilitätsklassen für das IPA-Modell. $v_{w,10}$ ist die Windgeschwindigkeit 10 m über Grund, die drei γ -Werte sind die Temperaturgradienten in der Prandtl- und Ekman-Schicht und in der freien Atmosphäre.

Die drei Kategorien stabil, neutral und labil 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/km angesetzt. Das Modell berücksichtigt außerdem die Drehung der Windrichtung mit der Höhe (geostrophischer Wind) und enthält einen Parameter für die Bodenrauhigkeit. Näheres zum IPA-Modell findet sich u.a. im Abschlussbericht „Leiser Flugverkehr“ [4].

Auf der Basis des IPA-Modells wird eine so genannte Meteo-Boden-Dämpfung ermittelt, die als zusätzlicher Dämpfungszuschlag Δ_{AMB} in die SIMUL-Ausbreitungsrechnung eingeht. Dieser Dämpfungszuschlag Δ_{AMB} ist mit dem hochwertigen Euler-Verfahren am IPA vorberechnet und im SIMUL-Verfahren in Form von Lookup-Tables implementiert worden. Diese Tabellen sind parametrisiert nach:

- Stabilitätsklasse,
- horizontaler Entfernung zwischen Immissionsort und Flugzeug,
- Flughöhe und
- dem Winkel zwischen Ausbreitungsrichtung und bodennaher Windrichtung.

3. ANALYSE DER WETTERSITUATION AM FLUGHAFEN HAHN

Das Jahr 2001 wird vom Deutschen Wetterdienst (DWD) als repräsentatives Jahr für den Zeitraum von 1999 bis 2003 eingeordnet. Die Hauptkriterien dieser Beurteilung sind in der Reihenfolge der Relevanz:

- Häufigkeit der Windrichtung und Abweichungen,
- Monatliche und jährliche mittlere Windgeschwindigkeit,
- Berücksichtigung von Nacht- und Schwachwindauswahl,
- Häufigkeit der Großwetterlagen nach dem „Katalog der Großwetterlagen Europas“.

Die vom DWD gelieferten AKTERM-Daten umfassen stündliche Werte für Windgeschwindigkeit und -richtung sowie für die meteorologische Stabilitätsklasse nach Klug-Manier. Zusätzlich sind die Sonnenauf- und Untergangszeiten enthalten.

Auf der Grundlage dieser Parameter wäre eine Analyse nach meteorologischen Gesichtspunkten (z.B. Einteilung der Tages- und Jahreszeiten) möglich gewesen. In Anbetracht der Zielsetzung der Untersuchung wurde sich aber an den in der Fluglärmprognose gängigen Beurteilungszeiten orientiert. Hiernach umfasst die Tagesperiode die Zeit von 6-22 Uhr, die Nachtperiode die Zeit von 22-6 Uhr. Diese Beurteilungszeiten werden in Deutschland auf die sechs verkehrsreichsten Monate (in der Regel Mai-Oktober), in der internationalen Praxis meist auf das Gesamtjahr bezogen.

Die Analysen der Windrichtungsverteilung ergibt, dass es für den Flughafen Hahn im Jahresmittel zwei dominierende Windrichtungen gibt, ein Hauptmaximum im Bereich von etwa 270° sowie ein Nebenmaximum im Bereich von etwa 150° (die Winkel sind, wie bei Fluglärmberichtigungen üblich, rechtwinklig gegen Nord angegeben). Dies entspricht erwartungsgemäß einem vorherrschenden Westwind, da sich Deutschland in einer Westwindzone befindet. Bild 2 zeigt die Windrichtungsverteilung während der Tagesperiode für unterschiedliche Stabilitätsklassen. Die Lage der Maxima ist unabhängig von der Stabilitätsklasse und von der Beurteilungszeit.

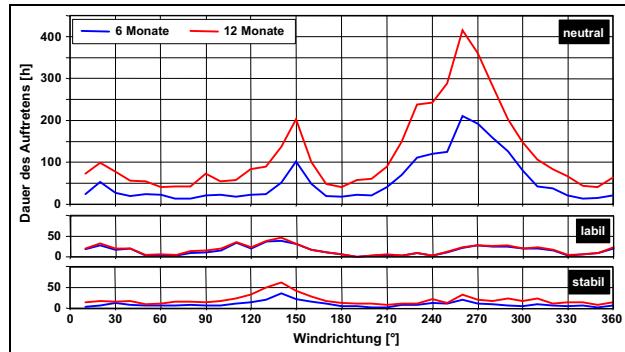


BILD 2. Windrichtungsverteilung am Flughafen Hahn im Jahr 2001 während der Tagesperiode von 6 bis 22 Uhr für drei Stabilitätsklassen.

Bild 3 zeigt die Windrichtungsverteilung für neutrale Schichtungen als Summenhäufigkeitsfunktion, also unabhängig vom absoluten Auftreten der Wettersituationen. Es ist gut erkennbar, dass die Windrichtungsverteilung auch weitestgehend unabhängig von der Beurteilungszeit ist. Dies gilt ebenso für die labilen und stabilen Wetterlagen.

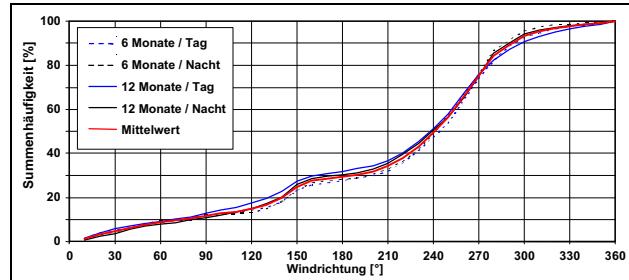


BILD 3. Summenhäufigkeit der Windrichtungsverteilung am Flughafen Hahn im Jahr 2001 für neutrale Schichtung und verschiedene Beurteilungszeiten.

Auf der Basis dieser Ergebnisse wurde die Windrichtung in vier 90°-Sektoren zerlegt, die sich an der Start- und Landebahn in Hahn (Hauptbetriebsrichtung 21 in 210° und Nebenbetriebsrichtung 03 in 30°) orientieren. Weiterhin wurden die Situationen jeweils noch nach Stabilitätsklassen unterteilt, wobei sich ergab, dass von den zwölf möglichen Stabilitätsklassen tagsüber nur sieben und nachts lediglich fünf regelmäßig vorkamen - labile Schichtungen treten nachts in der Regel nicht auf.

So zeigt die Tabelle 2 die prozentuale Verteilung der Wetterlagen für zwölf Monate auf Windrichtung und Stabilitätsklasse für den Tag und für die Nacht. Sie verdeutlicht, dass die Wetterlagen mit etwa 70% von neutralen Bedingungen dominiert werden, wovon etwa die Hälfte (34.1 %) auf die Stabilitätsklasse 7 und das Windrichtungsmaximum aus 270° fällt.

Klasse	Tag			Nacht								
	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												
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	-	-	-	-

TAB 2. Prozentuale Verteilung der Wetterlagen für 2001 am Flughafen Hahn - eingeteilt nach Windrichtungssektoren und Stabilitätsklassen für den Tag und für die Nacht.

4. EINFLÜSSE VON WIND UND TEMPERATURGRADIENTEN AUF DEN SEL

Die Startbahn am Flughafen Hahn wird in den Richtungen 21 (Hauptbetriebsrichtung in 210°) und 03 (Nebenbetriebsrichtung in 30°) betrieben. Die Windsektoren 120° ⇒ 210° und 210° ⇒ 300° aus Tabelle 2 können daher der Hauptbetriebsrichtung und die Sektoren 300° ⇒ 30° und 30° ⇒ 120° der Nebenbetriebsrichtung zugeordnet werden.

Für jede der 28 relevanten in Tabelle 2 aufgeführten Wettersituationen wurden nun mit dem Programm SIMUL für ein rechtwinkliges Immissionsgitter mit einer

Maschenweite von 250 m die Werte des SEL berechnet, die sich für eine Überlagerung aus einem An- und einem Abflug eines Airbus A320 ergeben.

Bild 4 zeigt exemplarisch die Einflüsse von Wind und Temperaturgradienten auf die ermittelten SEL-Konturen. Dargestellt sind die Konturen 70, 80 und 90 dB. Zu Grunde gelegt wurden die dominierenden Windrichtungen, bei denen die Bahn in Richtung 21 betrieben wird (siehe Bild 2). Diese Windrichtungen sind als breiter Pfeil in Bild 4 dargestellt (rot Südwestwind ca. 270°, blau Südostwind ca. 150°). Als Basis für die Berechnung dienen die Stabilitätsklassen mit den Windgeschwindigkeiten, die für die Kategorien stabil, neutral und labil nach Tabelle 2 am häufigsten auftreten. Berechnet sind jeweils separate Konturen für die beiden Windrichtungen (rot Südwestwind, blau Südostwind).

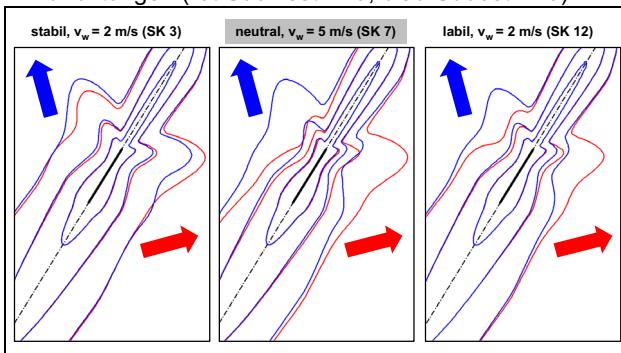


BILD 4. Einfluss von Stabilitätsklasse und Wind auf SEL-Konturen 70, 80 und 90 dB bei Bahnbetrieb in Richtung 21. Zu Grunde liegen je ein An- und ein Abflug eines A320.

Man erkennt eine deutliche, durch den Wind hervorgerufene Asymmetrie der Konturen in den Bereichen, in denen das Flugzeug in Bodennähe operiert. Der Schall wird hier jeweils in Windrichtung transportiert und gegen die Windrichtung gedämpft. Dieser Effekt – der natürlich bei Stabilitätsklasse 7 aufgrund der hohen Windgeschwindigkeiten am stärksten ausgeprägt ist – überlagert sich mit dem Effekt durch den Temperaturgradienten, der bei neutraler oder labiler Schichtung eine Aufwärtsbrechung bewirkt, wodurch es zu etwas abgeschwächten Immissionspegeln kommt, d.h. tendenziell schmalere Konturen. Hingegen bewirkt der Temperaturgradient bei stabiler Schichtung eine Abwärtsbrechung, die etwas höhere Immissionspegel bewirkt und zu einer tendenziellen Verbreiterung der Konturen führt.

Entsprechend „gespiegelte“ Abbildungen ergeben sich, wenn man Wind aus nördöstlichen Richtungen zu Grunde legt und die Startbahn in Betriebsrichtung 03 betrieben wird. Für diese Situation sind die exemplarischen Fälle in Bild 5 dargestellt.

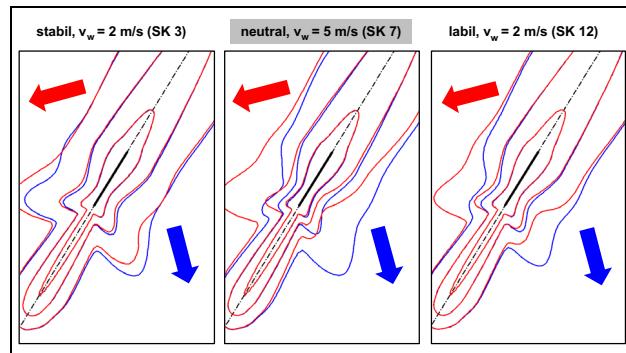


BILD 5. Einfluss von Stabilitätsklasse und Wind auf SEL-Konturen 70, 80 und 90 dB bei Bahnbetrieb in Richtung 03. Zu Grunde liegen je ein An- und ein Abflug eines A320.

Im nächsten Schritt werden die 28 ermittelten Immissionsgitter entsprechend den prozentualen Anteilen des Auftretens der Kombination von Windrichtung und Stabilitätsklasse nach Tabelle 2 energetisch zu einem resultierenden Wert SEL_{met} aufsummiert:

$$(1) \quad SEL_{met} = 10 \cdot \lg \left(\sum_i \frac{a_i}{100} \cdot 10^{SEL_i / 10} \right) \quad \text{mit} \quad \sum a_i = 100$$

Dabei ergeben sich die Koeffizienten a_i aus Tabelle 2 und die Werte SEL_i aus den vorberechneten Immissionsgittern. Der resultierende SEL_{met} repräsentiert somit ein Lärmbewertungsmaß, dem alle Wettersituation des Jahres als Basis zu Grunde liegen.

Die Konturen, die sich aus einer solchen energetisch gewichteten Überlagerung der einzelnen Immissionsgitter ergeben, sind in Bild 6 als blaue Kurven dargestellt. Um eine Aussage über die Schwankungsbreite des SEL im Jahresmittel treffen zu können, wurden mit Hilfe der arithmetischen Mittelwerte SEL_{ari} die Standardabweichungen der lokalen SEL-Verteilungen ermittelt. Diese Standardabweichungen sind – farblich kodiert – als Hintergrund dargestellt. Konturen des arithmetischen Mittelwerts (schwarze Kurven) sind zwar physikalisch nicht interpretierbar, aber dennoch in Bild 6 dargestellt.

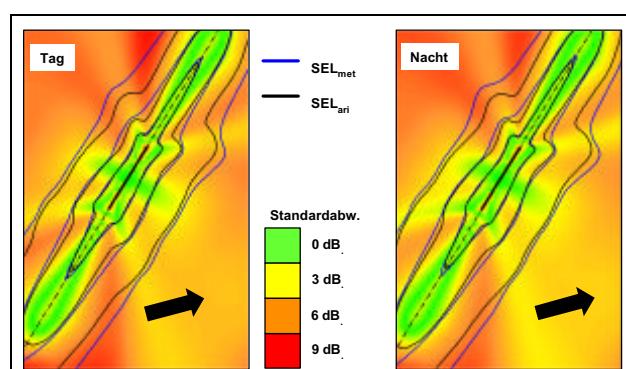


BILD 6. SEL-Konturen 70, 80 und 90 dB für die Wettersituation im Gesamtjahr 2001 (blau). Die schwarzen Kurven stellen den gewichteten arithmetischen Mittelwert des SEL dar, die farbliche Codierung die zugehörige lokale Standardabweichung.

Die Darstellungen für Tag und Nacht unterscheiden sich nur unwesentlich, ein Zeichen dafür, dass die Ausbreitungssituation sowohl tags als auch nachts im Wesentlichen durch neutrale Südwitterlagen dominiert wird.

Bild 7 zeigt das eigentliche Ergebnis der Untersuchung. Verglichen werden hier die SEL_{met}-Konturen für das Gesamtjahr (blau) mit denjenigen SEL_{iso}-Konturen, die sich bei Annahme einer isothermen Atmosphäre ohne Windeinfluss ergeben (schwarz). Für die Kurven für die isotherme Atmosphäre 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 normalerweise getroffen werden um Szenarien zu untersuchen.

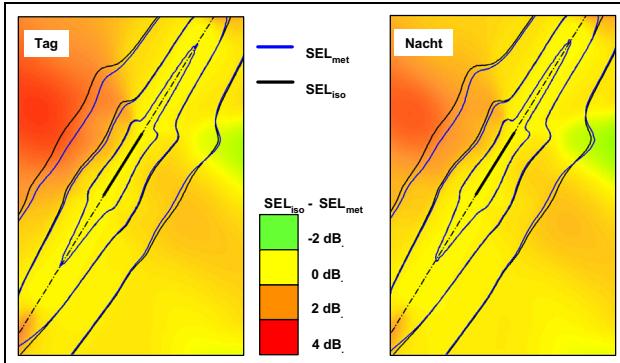


BILD 7. SEL-Konturen 70, 80 und 90 dB für die Wettersituation im Gesamtjahr 2001 (blau) und für eine isotherme Atmosphäre ohne Berücksichtigung des Windes bei der Schallausbreitung (schwarz). Die farbliche Codierung zeigt die lokale Differenz beider Werte.

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 dieses Ergebnis durch zwei gegenläufige Einflüsse: Aufgrund der dominierenden neutralen und labilen Wetterlagen (also Aufwärtsbrechung) verkleinern sich die Konturen im gesamten Untersuchungsraum gegenüber der isothermen Situation. Dieser Effekt wird vom Windeinfluss überlagert, der die Differenzen der Immissionspegel im Nordostbereich des untersuchten Gitters verringert und zum Teil überkompenziert, im Nordwestbereich dagegen noch verstärkt.

Trotz des gegenüber der Tagessituation erhöhten Anteils an stabilen (also ausbreitungsförderlichen) Wetterlagen unterscheiden sich die Darstellungen für Tag und Nacht kaum. Auch bei einer auf die sechs verkehrsreichsten Monate Mai bis Oktober durchgeführten Analyse zeigen sich vergleichbare Resultate.

Wie bereits erwähnt, wurde bei den Berechnungen der Windeinfluss auf die Flugbahn nicht mit berücksichtigt.

Dieser hätte sich bei den Abflügen durch einen größeren Steiggradienten manifestiert und damit die Konturen des SEL_{met} zusätzlich verkleinert.

5. SCHRIFTTUM

- [1] Binder, U: Untersuchung des Einflusses realer atmosphärischer Bedingungen auf die Ausbreitung von Fluglärm. Dissertation, Freien Universität Berlin, Juni 2008.
- [2] Blumrich, R.; Heimann, D.: A linearized Eulerian sound propagation model for studies of complex meteorological effects; J. Acoust. Soc. Am. 112 (2002) 446-455
- [3] Heimann, D.; Karle, R.: A linearized Euler finite-difference time-domain sound propagation model with terrain-following coordinates. – J. Acoust. Soc. Am. 119 (2006) 3813-3821
- [4] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR): „Leiser Flugverkehr - zusammenfassender Projekt-Abschlußbericht“, 5. Juni 2004. Download unter www.dlr.de.
- [5] Isermann, U.: Berechnung der Fluglärmimmission in der Umgebung von Verkehrsflughäfen mit Hilfe eines Simulationsverfahrens. MPI für Strömungsforschung, Bericht 7/1988
- [6] 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).
- [7] 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.
- [8] He, H.; Boeker, E., Dinges, E.: "Integrated Noise Model (INM) Version 7.0 User's Guide", Federal Aviation Administration, Office of Environment and Energy, FAA-AEE-07-04, Washington, April 2007.