

IFOK GmbH
Geschäftsstelle RDF
Herrn R. Eggert
Berliner Ring 89
D - 64625 Bensheim

Bericht
Nr. 422'293
Intern: 513.2105

Wir forschen und prüfen für Sie

Auftrag

Gutachten

Fluglärmmonitoring Flughafen Frankfurt Main

AP2: Akustik

Kundenreferenz:
Ihr Auftrag von:
Anzahl Seiten:
Beilagen:

Regionales Dialogforum (RDF) vertreten durch IFOK GmbH
22.3.2002
78
Beilagen 1 bis 12 und Karten 1 bis 8 sowie
Berechnungen HLUG für getrennte Ost- und Westbetriebsrichtung

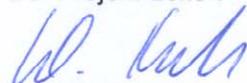
Status: Schlussbericht

Das Projekt-Team:

R. Bütikofer
K. Heutschi
W. Krebs
S. Plüss
G. Thomann

Be422293_Schlussbericht.doc

Dübendorf, 23. Juni 2003
Der Projekt-Leiter:



W. Krebs

Abteilung Akustik
Der Abteilungsleiter:



K. Eggenschwiler

Zusammenfassung

Das Regionale Dialogforum (RDF) präsentierte Ende September 2001 eine Leistungsbeschreibung für ein Gutachten mit dem Titel „Fluglärmmonitoring am Flughafen Frankfurt/Main“. Das Ziel dieses Gutachtens ist die Entwicklung eines optimierten Konzeptes für ein Fluglärmmonitoring. Der Begriff „Monitoring“ wird dabei als „fortlaufende Ermittlung, Darstellung und Kommunikation“ von Fluglärm verstanden. Dies führte zu einer Dreiteilung des Gutachtens mit den thematischen Schwerpunkten "Beitrag der Flugsicherung" (als Arbeitspaket 1), "Akustik" (Arbeitspaket 2) und "Kommunikation" (Arbeitspaket 3).

Im vorliegenden Gutachten werden Fragen zum Themenkreis Akustik analysiert. Es werden drei Themenschwerpunkte erörtert: (1) Fluglärmmessung, (2) Berechnung von Fluglärm, (3) ergänzende Untersuchungen im Zusammenhang mit Bodenlärm, Meteoefläüssen sowie der Genauigkeit der aus den Fanomos-Aufzeichnungen abgeleiteten Fluggeometrien.

Im internationalen Vergleich wird auf dem Flughafen Frankfurt/Main eine sehr aufwändige Messanlage betrieben. Die Anlage ist technisch einwandfrei und erfüllt die gesetzlichen Anforderungen. Mess-technische Probleme ergeben sich aber durch die Standorte der einzelnen Messstationen. Da diese relativ weit entfernt vom Flughafen positioniert sind, wird vielfach nur ein geringer Anteil aller vorbeiführenden Flugereignisse erfasst. In mehreren Fällen beträgt der Anteil erfasster Überflüge weniger als 20%. Fehlende Flüge werden dabei mit einem Ersatzverfahren hochgerechnet. Dieses Verfahren ist zwar grundsätzlich geeignet, trotz ungünstigen Messbedingungen einigermaßen realistische Mittelungspegel zu gewinnen. Allerdings handelt es sich hier nicht mehr um Messungen im eigentlichen Sinn, sondern um eine spezielle Art von Fluglärm-berechnung. Im Hinblick auf die neu geplante Landebahn sollten zusätzliche Messanlagen deshalb näher bei den entsprechenden Flugrouten positioniert werden, um eine zuverlässigere Messung zu gewährleisten.

Die von Fraport ausgewiesenen Mittelungspegel stimmen unter Berücksichtigung der Messunsicherheit mehrheitlich mit den von anderen Organisationen ermittelten Werten überein. Einzig in Zeppelinheim wurden grössere Abweichungen festgestellt, welche auf unterschiedliche Definitionen von Fluglärm und die zu geringe Anzahl erfasster Flugereignisse bei den Fraport-Messungen zurückzuführen sind.

Im zweiten Teil des Gutachtens werden Fragen im Zusammenhang mit Fluglärm-berechnungen untersucht. Diese Untersuchungen ergaben, dass die von verschiedenen Organisationen durchgeführten AzB-Berechnungen übereinstimmen und zu praktisch identischen Resultaten führen. Zur Abklärung von Detailfragen wurde eine unabhängige Neuberechnung der Fluglärm-belastung das Jahres 2000 mit dem an der EMPA entwickelten Simulationsprogramm FLULA2 durchgeführt. Dabei wurden erstmals für Frankfurt Fluggeometrien direkt aus Radardaten übernommen. Die Ergebnisse dieser Neuberechnung wurden mit bestehenden AzB-Berechnungen verglichen. Für mittlere Belastungen stimmen die mit den beiden Verfahren ermittelten Werte gut überein, bei niedrigeren Pegeln sind die noch zu validierenden FLULA2-Berechnungen dagegen lauter, während in flughafennahen Gebieten im Vergleich zum AzB-Verfahren eher geringere Pegel ausgewiesen werden.

Die wichtigsten Einflussgrössen, welche zu den Unterschieden bei der Berechnung der Fluglärm-belastung nach AzB und mit dem Simulationsprogramm FLULA2 führen, sind die unterschiedlichen Luftdämpfungs-koeffizienten, die unterschiedlichen Verfahren zur Ermittlung der t_{10} -Zeiten, die Nichtberücksichtigung der Gegenanflüge bei den Landeanflügen beim Berechnungsverfahren nach AzB sowie die fehlende Unterscheidung zwischen Kurvenflug und Geradeausflug bei der Berechnung nach AzB.

Für die Genauigkeit der Fluglärm-berechnungen ist zudem die Abstimmung der verwendeten Quelldaten auf den lokalen Flottenmix von zentraler Bedeutung. Es zeigte sich, dass die am Flugverkehr in Zürich/Kloten erhobenen Quelldaten von FLULA2 für einzelne in Frankfurt verkehrenden Flugzeugtypen zu einer Überschätzung der berechneten Lärmbelastung führen. Für eine realistischere Fluglärm-berechnung sollten daher die Quelldaten von FLULA2 besser auf die Flugzeugflotte von Frankfurt abgestimmt werden. Auf Grund der Untersuchungen kommen wir zum Schluss, dass eine verlässliche Berechnung der Lärmbelastung in der Umgebung des Flughafens Frankfurt/Main unter Berücksichtigung der erkannten Mängel für einen Mittelungspegel $Leq(4)$ von 55 dB und höher mit einer optimierten Quelldatenbasis grundsätzlich möglich ist. Diese Berechnung sollte dann anhand von - bemannten - Messungen validiert werden. Bevor diese Schritte nicht unternommen sind, lässt sich keine Aussage

darüber treffen, wie hoch die Belastungen im vom Flughafen entfernten Bereich tatsächlich sind. Die vorgelegten Berechnungen stellen eine erste Annäherung dar.

In diesem Gutachten wurden auch die Auswirkungen des Wetters berücksichtigt. Die meteorologischen Einflussfaktoren auf den Fluglärm sind die Beeinflussung der Abflugrouten durch Wind und Temperatur, von der Luftdichte abhängige Leistungssetzung sowie die Variation der Schallausbreitungsdämpfung vom Flugzeug zu den Immissionspunkten. Der Einfluss des Windes auf die Wahl der Abflugrouten sowie ein allenfalls von der Temperatur abhängiges Steigverhalten der Flugzeuge können durch Einbezug der effektiven Radarspuren in die rechnerische Modellierung vollständig berücksichtigt werden. Über die Auswirkungen der dichteabhängigen Triebwerksleistung auf die Lärmimmission können keine gesicherten Aussagen gemacht werden. Als wesentlicher Faktor verbleibt die wetterbedingte Variation der Ausbreitungsdämpfung. Im Jahresmittel lässt sich diese Unsicherheit auf etwa 1 dB pro Kilometer veranschlagen. Dies gilt für Immissionspunkte, die sich in grösserem Abstand vom Flughafen befinden und entsprechend die wesentliche Schallenergie von Flugzeugen aus einer Höhe von über 100 Meter erhalten.

Untersuchungen zum Themenkreis Bodenlärm zeigen, dass es auf Grund der grossen lokalen Variation des Bodenlärms kaum möglich ist, nur wenige repräsentative Bodenlärmimmissionspunkte zu definieren. Ein auf Messungen basierendes Bodenlärmmonitoring erscheint daher wenig sinnvoll. Erfolg versprechend ist die rechnerische Ermittlung der Bodenlärmimmissionen. Dazu sind aber ein geeignetes Schallausbreitungsmodell sowie detaillierte Kenntnisse der akustischen Eigenschaften der Bodenlärmquellen erforderlich.

In einem Ausblick werden Massnahmen aufgezeigt, mit denen die verbleibenden Unsicherheiten reduziert und die Einflussgrössen abgeschätzt werden können. Neben den hier angestellten messtechnischen Betrachtungen muss aber auch die Frage geklärt werden, bis zu welchem Belastungsniveau die Ermittlung der Lärmbelastung aus planerischer und politischer Sicht überhaupt sinnvoll ist. Diese politisch-rechtliche Frage kann und soll im Rahmen dieses Gutachtens jedoch nicht diskutiert werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Orientierung	6
1.1	Ausgangslage.....	6
1.2	Bearbeitung des Arbeitspakets „Akustik“ durch die EMPA	6
1.3	Umfang, Inhalt und Aufbau des Gutachtens zum Arbeitspaket „Akustik“	6
2	Einige Gedanken zum Thema Fluglärm	8
2.1	Störung durch Fluglärm und das „richtige“ (Flug)Lärmbelastungsmass	8
2.2	Fluglärm und Schutz vor Fluglärm	8
2.3	Fluglärm und dessen Abgrenzung	8
3	Fluglärmmonitoring am Flughafen Frankfurt	10
3.1	Grundlagen und Daten zum Monitoring in Frankfurt.....	10
3.2	Generelle Aspekte zu Mikrofonstandorten	16
3.3	Gebietsabgrenzungen für messtechnisch erfolgreiche Fluglärmfassungen.....	18
3.4	Messtechnische Eignung der Mikrofonstandorte	22
3.5	Hinweise zur Errichtung neuer Messstandorte bei neuer Landebahn	22
3.6	Fazit.....	23
4	Vergleich mit Monitoringsystemen anderer Flughäfen	24
4.1	Aufgabenstellung und Methodik.....	24
4.2	Auswertung des Fragebogens	25
4.3	Fazit.....	26
5	Vergleich verschiedener Lärmmessungen.....	27
5.1	Übersicht	27
5.2	Unsicherheit von Fluglärmmessungen	28
5.3	Vergleich der Messverfahren	29
5.4	Vergleich der Messergebnisse	31
5.5	Fazit.....	33
6	Fluglärmrechnungen	34
6.1	Fluglärmmodelle	34
6.2	Genauigkeit von Berechnungen.....	35
6.3	Fluglärmrechnungen mit FLULA2	42
6.4	Fazit der Fluglärmrechnungen	54
7	Meteorologische Einflüsse auf den Fluglärm.....	55
7.1	Witterungseinfluss auf das Flugzeug als Schallquelle	55

7.2	Witterungseinfluss auf die Schallausbreitung	55
7.3	Bedeutung für Fluglärmimmissionen.....	57
7.4	Totaler Wettereinfluss auf die Schallausbreitungsdämpfung im Jahresmittel	58
7.5	Fazit zu den meteorologischen Einflüssen auf den Fluglärm	59
8	Bodenlärm	60
8.1	Abgrenzung der Kategorie Bodenlärm zum Fluglärm und zu weiteren möglichen Lärmquellen auf einem Flughafen.....	60
8.2	Messung des Bodenlärms im Sinne eines Monitorings	60
8.3	Berechnung von Bodenlärmimmissionen.....	61
8.4	Beurteilung von Bodenlärm	62
8.5	Fazit zum Bodenlärm	62
9	Genauigkeit der Radardaten	63
9.1	Allgemeines	63
9.2	Vergleich der Fanomos-Daten mit GPS-Aufzeichnungen.....	63
9.3	Überflughöhen von Landeanflügen	65
9.4	Einfluss auf die berechnete Fluglärmbelastung	66
9.5	Fazit zur Genauigkeit von Radardaten.....	67
10	Ausblick und Empfehlungen	68
10.1	Vorbemerkung	68
10.2	Monitoringstationen	68
10.3	Mögliche Massnahmen zur Verringerung der Mess- und Berechnungsunsicherheit	69
10.4	Zukünftige Entwicklungen	70
11	Glossar	72
11.1	Literaturverzeichnis	72
11.2	Abkürzungen und Begriffe.....	75
11.3	Beilagenverzeichnis	77
11.4	Kartenverzeichnis.....	78
11.5	Berechnungen HLUG für getrennte Ost- und Westbetriebsrichtungen.....	78

1 Orientierung

1.1 Ausgangslage

Das Regionale Dialogforum (RDF) veröffentlichte am 25. September 2001 eine Leistungsbeschreibung für ein Gutachten mit dem Titel „Fluglärmmonitoring am Flughafen Frankfurt/Main“[51]. Das Ziel des Gutachtens ist die Entwicklung eines optimierten Konzeptes für ein Fluglärmmonitoring. Dabei wird der Begriff „Monitoring“ in einem sehr umfassenden Sinne als „fortlaufende Ermittlung, Darstellung und Kommunikation“ von Fluglärm verstanden. Daneben soll es auch als Instrument zur Überprüfung der Wirksamkeit von Massnahmen im Bereich der Lärminderung eingesetzt und genutzt werden können. Dieser ganzheitliche und interdisziplinäre Systemansatz führte zu einer Dreiteilung des Gutachtens mit folgenden thematischen Schwerpunkten (nachfolgend als Arbeitspakete AP benannt):

- AP1: Beitrag der Flugsicherung
- AP2: Akustik
- AP3: Kommunikation

1.2 Bearbeitung des Arbeitspakets „Akustik“ durch die EMPA

Ende November 2001 erhielt die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA den Zuschlag fürs Arbeitspaket 2 „Akustik“. Die beiden anderen Arbeitspakete wurden vergeben ans niederländischen National Aerospace Laboratory NLR (AP1 „Flugsicherung“) und an eine Arbeitsgemeinschaft bestehend aus dem Büro für Geoinformatik, Umweltplanung, neue Medien (GPM) und der Softwarefirma VSOFTEC (AP3 „Kommunikation“). Als Qualitätssicherer wurde in den Themenbereichen „Flugsicherung“ und „Akustik“ (AP1 und AP2) Müller BBM eingesetzt. Im Arbeitspaket 3 übernahm Grossbongardt die Qualitätssicherung.

1.3 Umfang, Inhalt und Aufbau des Gutachtens zum Arbeitspaket „Akustik“

1.3.1 Umfang des Gutachtens

Im Arbeitspaket „Akustik“ geht es um die physikalischen Aspekte im Zusammenhang mit der Erfassung bzw. Ermittlung der Fluglärmbelastung, also um *Fragen, die das Messen und Berechnen des Fluglärms betreffen*. Fragen der Lärmwirkung sowie rechtliche Fragen im Zusammenhang beispielsweise mit der Festlegung von Lärmgrenzwerten sind nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Ebenfalls ausgeklammert sind Aspekte, welche die Kommunikation von Mess- oder Berechnungsergebnissen (Bestandteil von AP3) oder die technischen Möglichkeiten und Voraussetzungen zur Verknüpfung von Flugplan-, Radar- und Messdaten betreffen (AP1).

Als Grundlage und Hilfsmittel zur Beantwortung der verschiedenen Fragenkomplexe im Themenbereich "Akustik" dient die Berechnung einer Vielzahl von Einzelflugsituationen. Dazu wird das von der EMPA entwickelte Simulationsverfahren FLULA2 eingesetzt. Voraussetzung für eine entsprechende Berechnung sind Radaraufzeichnungen und Flugplandaten in elektronischer Form. Sie wurden von der deutschen Flugsicherung DFS und der Flughafen Frankfurt AG Fraport zur Verfügung gestellt.

1.3.2 Inhalt und Aufbau des vorliegenden Berichts

Im ersten Teil des Gutachtens (Kapitel 3 bis 5) wird der Problembereich der Fluglärmmessung behandelt. Kapitel 3 beschreibt die bestehende Monitoringanlage. Es wird die Messmethode sowie die Lage und örtlichen Verteilung der Messstationen bewertet und beurteilt. Dabei wird die Verteilung der Monitoringpunkte auch unter dem Aspekt möglicher neuer Betriebsrichtungen gewürdigt. Kapitel 4 vergleicht das in Frankfurt betriebene Monitoringsystem mit Lösungen an anderen nationalen und

internationalen Flughäfen (Benchmark). In Kapitel 5 werden Messungen der FRAPORT, HLUG und deBAKOM einander gegenübergestellt und analysiert.

Der zweite Teil des Gutachtens (Kapitel 6 ff) beschäftigt sich mit Fragen rund um die Berechnung des Fluglärms. Es wird die Funktionsweise, Aussagekraft, Genauigkeit sowie die Validierungsmöglichkeiten von Fluglärmmodellen diskutiert. Die Resultate eines konventionellen Fluglärmrechnungsprogramms (AzB) werden mit denjenigen eines Simulationsverfahrens (FLULA2) verglichen und analysiert. Die Berechnungsergebnisse werden zudem in Beziehung zu Messungen gesetzt. Die Unterschiede von Messungen und Berechnungen werden aufgezeigt und die Ursachen dieser Unterschiede diskutiert und (wo möglich) identifiziert.

Im dritten Teil des Gutachtens werden einige grundsätzliche Überlegungen zu den Wettereinflüssen und zum Bodenlärm gemacht (Kapitel 7 und 8). Zusätzlich wird der Einfluss der Genauigkeit von Radardaten auf die Fluglärmbelastung diskutiert (Kapitel 9). Das Schlusskapitel 10 gibt einen Ausblick. Für die drei Themenkreise „Messung“, „Rechnung/Simulation“ und „Verschiedenes“ werden Empfehlungen abgegeben sowie der Forschungsbedarf grob skizziert. Um die Aussagen des Schlusskapitels besser nachvollziehen zu können, enthalten die Hauptkapitel jeweils ein kurzes Resumé (Fazit). Wichtige Kernaussagen innerhalb des Textes sind kursiv gedruckt oder gerahmt.

Zu Beginn des Gutachtens – im nachfolgenden Kapitel 2 – werden einige grundsätzliche Bemerkungen zum Thema „Fluglärm“ gemacht.

2 Einige Gedanken zum Thema Fluglärm

2.1 Störung durch Fluglärm und das „richtige“ (Flug)Lärmbelastungsmass

Die lärmgeplagte Bevölkerung empfindet eine – individuell sehr unterschiedliche - *Störung*. Objektiv erfassbar ist aber nur die *Belastung*. Weit über hundert Lärmbelastungsmasse wurden auf der Welt schon erprobt. Fast alle sind wieder vergessen. Durchgesetzt hat sich der Mittelungspegel Leq wegen seiner einfachen Mess- und Berechenbarkeit (als „energieäquivalenter Dauerschallpegel $Leq(3)$ “ oder als „äquivalenter Dauerschallpegel $Leq(4)$ “). Er kombiniert die Schallpegel, die Dauer und die Häufigkeit von Lärmereignissen zu einer einzigen Zahl und wird von internationalen Arbeitsgruppen als Basismass zur Beurteilung von (Flug)Lärmbelastungen empfohlen. Der Mittelungspegel bildet die Grundlage für verschiedene Lärmschutzgesetzgebungen, so auch in der Schweiz und in Deutschland. (Die Definitionen der für das vorliegende Gutachten massgebenden Lärmmasse können der Beilage 1 entnommen werden.) Trotzdem bleibt auch der Mittelungspegel Leq , wie alle anderen Lärmbelastungsmasse (beispielsweise die Schwellenwertkriterien NAT), ein unbefriedigendes Hilfsmittel zur Bestimmung der Störung, da er nur eine durchschnittliche Reaktion voraussagt, nie aber jene einzelner Individuen. Dies ist allerdings nicht sein Fehler, sondern die Folge unrealistischer Erwartungen. Mit dem Leq kann zwar eine Belastung ausgewiesen werden, aber der *Lärm (als Mass für die Störung) lässt sich mit ihm nicht messen!*

Heute ist der Mittelungspegel Leq weltweit in der Gesetzgebung verankert. Neben den unbestreitbaren Vorteilen hat auch der Leq einige Schwächen. Die Lärmwirkungsforschung befasst sich mit diesen Zusammenhängen, aber das *alle* befriedigende, ideale Mass ist noch nicht einmal klar erkennbar, geschweige denn bereit zur gesetzlichen Umsetzung.

2.2 Fluglärm und Schutz vor Fluglärm

Der Nachweis einer Lärmbelastung ist nur sinnvoll im Hinblick auf Schutzziele, die im politischen Entscheidungsprozess ausgearbeitet worden sind. Ein Ziel kann beispielsweise die Festlegung von Grenzwerten sein, um den grösseren Teil der Bevölkerung vor übermässigen Einwirkungen zu schützen. Durch soziopsychologische Studien, d.h. durch Befragungen der Bevölkerung und der gleichzeitigen Festlegung der (Flug)Lärmbelastung am Befragungsort lassen sich Beziehungen zwischen einem Fluglärmmasse und dem Grad der Störung bestimmen. Darauf aufbauend kann der Gesetzgeber Schutzziele und Grenzwerte festlegen. Es gibt verschiedene Masse, um den Fluglärm zu beschreiben, die alle ihre Berechtigung haben. Dabei gilt jedoch immer folgender Grundsatz: *Das Fluglärmmasse, die Berechnungsvorschrift und die Grenzwerte bilden eine Einheit*. Würde man nun beispielsweise vom $Leq(4)$ auf den $Leq(3)$ oder den L_{den} als gesetzliches Lärmmasse wechseln, so müssten auch die Grenzwerte neu für $Leq(3)$ oder den L_{den} formuliert werden. Die Beantwortung der Frage, was als Fluglärm zu betrachten ist, beispielsweise wenn es um die Behandlung des Bodenlärms oder um die Behandlung von Belastungen in weit entfernten Gebieten geht, muss in erster Linie durch einen politischen Meinungsbildungsprozess erfolgen, wo eine Übereinkunft bezüglich festgelegter Schutzziele gefunden werden muss. Die entsprechenden Grundlagen dazu kommen aus dem Bereich der Lärmwirkungsforschung. Die Akustik liefert dazu nur einen geringen Beitrag.

2.3 Fluglärm und dessen Abgrenzung

2.3.1 Grundsatz

Programme zur Berechnung von Fluglärm betrachten nur die Flugbewegungen auf der Piste und in der Luft. Fluglärm beginnt somit beim Startpunkt auf der Piste und endet bei einem weit entfernten räumlichen Punkt in der Luft, der keinen Beitrag mehr zur massgeblichen Lärmbelastung leistet. (Was massgeblich ist, sagt in der Regel der Gesetzgeber (vgl. vorheriges Kapitel).) Die ECAC (European Civil Aviation

Conference) grenzt in der Anleitung zur Berechnung von Fluglärm den Begriff „Fluglärm“ folgendermassen ab [20]:

There are a number of noise-generating activities on operational airports which are excluded from the calculation procedures given here. These include taxiing, engine testing and use of auxiliary power-units. In practice, the effects of these activities are unlikely to affect the noise contours in regions beyond the airport boundary.

Die Berechnungen in der Schweiz sowie das Berechnungsprogramm INM der amerikanischen Luftfahrtbehörde FAA betrachten als Fluglärm ebenfalls nur die Bewegungen der Flugzeuge auf der Piste und in der Luft. Auch die DIN 45'643 "Messung und Beurteilung von Fluggeräuschen" [6] formuliert klare Kriterien, um den an- und abschwellenden Pegelverlauf eines Vorbeiflugs als Fluglärmereignis zu identifizieren und um andere Lärmquellen (inklusive Bodenlärm) auszuschliessen.

Demgegenüber definiert das RDF den Fluglärm umfassender. In der Leistungsbeschreibung (Seite 2, Fussnote 1) wird zum Fluglärm nach obiger Definition noch derjenige Lärm hinzugezählt, welcher am Boden durch stehende oder rollende Flugzeuge verursacht wird (sog. Bodenlärm).

2.3.2 Bodenlärm

Schallimmissionen aus dem Betrieb der Flugzeuge auf dem Flughafenvorfeld und den Rollwegen, sowie die Immissionen von Testläufen können als Bodenlärm bezeichnet werden. Da es sich hier um örtlich begrenzte und um bodennahe Schallquellen handelt, ist die Schallausbreitung stark abhängig von lokalen Gegebenheiten wie Abschirmungen durch Gebäude und die Topographie, sowie stark veränderlichen Ausbreitungsbedingungen je nach Wetterlage. Diese kleinräumigen Strukturen sind in den grossflächigen Fluglärmrechnungsprogrammen nicht in diesem Detaillierungsgrad enthalten. Bodenlärm muss deshalb mit den selben Instrumenten erfasst werden wie beispielsweise Industrielärm oder Strassenlärm. Aspekte des Bodenlärms werden im Kapitel 8 diskutiert.

2.3.3 Fluglärm in grossen Distanzen

Es ist unbestritten, dass auch weit entfernt vom Flughafen in ruhiger Umgebung ein Vorbeiflug als störendes Ereignis wahrgenommen werden kann. Die auf Karten ausgewiesenen, berechneten Lärmkurven besagen ja nicht, dass es ausserhalb dieser Kurven keinen Lärm mehr gibt. Es stellt sich aber die Frage, welche Möglichkeiten und Einschränkungen die Lärmmessungen oder Lärmrechnungen haben. (Die möglichen Ziele eines Monitorings werden im Kapitel 3.1 diskutiert.) Die Lärmbelastung kann in weit entfernten Gebieten mittels einer Messung aus rein praktischen und messtechnischen Gründen nicht widerspruchsfrei erfasst werden, weil die Pegel sich zu wenig vom Fremdgeräusch abheben. Allenfalls können die Belastungen noch berechnet werden, wobei aber bei Distanzen von mehr als drei Kilometern zwischen Flugzeug und Einwirkungsort mit Unsicherheiten von bereits zwei bis drei Dezibel zu rechnen ist (vgl. Kapitel 6.2 und Kapitel 7). Aber selbst wenn es gelänge, die Belastung durch Berechnung verlässlich nachzuweisen, so stellt sich immer noch die entscheidende Frage, wie solche Situationen weit unterhalb gültiger Grenzwerte politisch gehandhabt werden sollen. *Deshalb muss die Frage des Fluglärms in grossen Distanzen in erster Linie politisch und nicht akustisch beantwortet werden.*

3 Fluglärmmonitoring am Flughafen Frankfurt

3.1 Grundlagen und Daten zum Monitoring in Frankfurt

Der Begriff Monitoring umfasst sehr vielfältige Aspekte. In diesem Kapitel werden einzelne Teilgebiete jeweils zuerst allgemein dargestellt und danach die gewählte Umsetzung in Frankfurt diskutiert. Das Thema wird rückwärts aufgerollt von den gewünschten Resultaten und Zielen zu den dafür notwendigen Verarbeitungsschritten bis schliesslich zur Messausrüstung an der Messstelle.

3.1.1 Mögliche Ziele des Monitorings

Das Projektteam Anti-Lärm-Pakt des RDF hat den Begriff Monitoring als "*die fortlaufende Ermittlung, Darstellung und Kommunikation einer bestimmten Situation oder Begebenheit*" definiert. Wenn ein Flughafen ein Netz von Lärmmessstellen betreibt, so können damit verschiedene Ziele verfolgt werden:

- Schutz der Bevölkerung vor (einzelnen) überlauten Ereignissen.
- Nachweis der mittleren Belastung über Monate.
- Nachweis der Lärmentwicklung über Jahre.
- Evaluierung der Wirksamkeit von Lärminderungsmassnahmen
- Akustische Kontrolle über die Einhaltung von Flugwegen.
- Festlegen von lärmabhängigen Lande-Entgelten.
- Erfüllen eines gesetzlichen Auftrags.
- Überprüfen (und u.U. Verifizieren und Validieren) von Lärmberechnungen.
- Beantworten von Lärmbeschwerden

Je nach Zielsetzung und Randbedingungen wird die optimale Monitoringanlage sehr unterschiedlich konzipiert sein.

Die folgenden Beispiele illustrieren gegensätzliche Anforderungen:

- In Frankfurt werden akustische Tore für die Flugwegüberwachung verwendet. Die Tore bestehen aus Mikrofonpaaren, die in einigen Kilometern von der Piste entfernt symmetrisch zum Flugweg angeordnet sind. Solche Tore sind nur noch solange sinnvoll, wie es nicht möglich ist, die Flugwege direkt aus den Informationen des Flugsicherungs-Radars zu erhalten.
- Wenn das Ziel des Monitorings die Festlegung von Lärm-Entgelten ist, so werden Mikrofone in der näheren Umgebung des Flughafens in Gebieten mit wenig Umgebungslärm positioniert sein, wo die akustische Messung dank der hohen Pegel einwandfrei funktioniert.
- Wenn das Ziel der Nachweis der Lärmbelastung in bewohnten Gebieten ist, so müssen sich die Messorte trotz der messtechnisch schlechten Randbedingungen (hohes Grundgeräusch, tiefe Pegel der Flugzeuge) in den Wohngebieten befinden.

Das primäre Ziel des Monitorings in Frankfurt ist die Erfüllung des gesetzlichen Auftrags.

Wenn in den folgenden Kapiteln die Monitoringanlage beurteilt wird, so stehen somit in erster Linie die Anforderungen zur Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben im Vordergrund. Diese Anforderungen werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

3.1.2 Gesetzliche Anforderungen und verwendete Normen in Frankfurt

a) Luftverkehrsgesetz (LuftVG):

Nach § 19a ist der Unternehmer eines Verkehrsflughafens verpflichtet, „(...) auf dem Flughafen und in dessen Umgebung Anlagen zur fortlaufenden registrierenden Messung der durch die an- und abfliegenden Luftfahrzeuge entstehenden Geräusche einzurichten und zu betreiben. Die Messergebnisse und Auswertungsergebnisse sind der Genehmigungsbehörde und der Kommission nach § 32b (Fluglärmkommission) sowie auf Verlangen der Genehmigungsbehörde anderen Behörden mitzuteilen“.

Paragraf 32 (Nummer 15) legt fest, dass vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen und vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Rechtsverordnungen erlassen werden zum "(...) Schutz der Bevölkerung vor Fluglärm, (...) beim Starten und Landen und beim Überfliegen besiedelter Gebiete einschliesslich der Anlagen zur Messung des Fluglärms und zur Auswertung der Messergebnisse.

b) Richtlinien des Bundesministers für Verkehr über Einrichtung und Betrieb von Fluglärm-Messanlagen für Verkehrsflughäfen (6. Juli 1972)

In Absatz 2 wird festgelegt: "Die Genehmigungsbehörde bestimmt aufgrund der allgemeinen Fluglärmsituation, für welche An- und Abflugbereiche eines Flughafens ortsfeste Fluglärmmessstellen vorzusehen sind. Die Struktur der Wohnbesiedelung, die Lage der An- und Abflugwege sowie Art und Umfang des Flugbetriebs können in einem An- und Abflugbereich mehrere Messstellen notwendig machen. Die Standorte der einzelnen Messstellen sollen den besonders beeinträchtigten Wohngebieten zugeordnet sein und einen möglichst geringen sonstigen Umweltgeräuschpegel haben. Bei der Standortbestimmung ist der Flughafenbetreiber zu hören."

Es folgen Festlegungen zur Messung (L_{ASmax} , Erhebung der Daten zur "überschlägigen Ermittlung des äquivalenten Dauerschallpegels"), zur Übermittlung der Messwerte an eine zentrale Stelle und zur "Zuordnung der Überflug-Schallereignisse zum Verursacher (Flugzeughalter und Muster)".

In Absatz 6 wird festgelegt: "Die Genehmigungsbehörde hat die Einrichtung und den Betrieb von Fluglärm-Messanlagen auf ihre Ordnungsmässigkeit zu überwachen. (...). Die verwendeten Mess- und Registriergeräte der Anlagen sollen den bestehenden Normen auf diesem Gebiet Rechnung tragen."

- c) Aus juristischen Gründen (Datenschutz) war es in Deutschland bisher nicht möglich, die Radaraufzeichnungen der Flugsicherung für die Überprüfung der Flugwege zu verwenden.
- d) Die Erfassung der einzelnen Lärmereignisse erfolgt nach **DIN 45'643** (1984) [6]
- e) Die Aufbereitung der Lärmereignisse erfolgt nach DIN 45'643 und **DIN 45'645** [7].

Aus diesen Vorgaben ergeben sich Lösungen, die von den Methoden in anderen Ländern abweichen. Hierzu gehört das Lärmmass $Leq(4)$, bei dem eine Verdoppelung der Bewegungszahlen eine Erhöhung um 4 dB bewirkt (im Gegensatz zum sonst üblichen $Leq(3)$ mit 3 dB pro Verdoppelung). Zu diesen Randbedingungen äussert sich das Gutachten nicht. Diese Vorgaben müssen auf nationaler Ebene diskutiert werden, weil Schutzzonengrenzen, Richt- oder Grenzwerte auf gegebenen Lärmmassen aufbauen. Zu beachten sind aber die Bestrebungen innerhalb der EU zur Vereinheitlichung der Lärmmasse als Vorbedingung der länderübergreifenden Vergleichbarkeit von Lärmbelastungen. Die EU fordert als Lärmmass den L_{den} , welches auf dem $Leq(3)$ basiert (siehe Beilage 1 und [22]).

Die Methode zur Berechnung des Mittelungspegels $Leq(4)$ mit Hilfe des Maximalpegels L_{ASmax} und der Dauer t_{10} hatte historisch ihre Berechtigung. Heutzutage liefern die integrierenden Schallpegelmesser direkt den L_{AE} bzw. SEL [9]. (DIN 45 643 lässt beide Verfahren zu).

3.1.3 Monitoring-Aktivitäten in Frankfurt

Das Monitoring im Sinne von "*fortlaufender Ermittlung, Darstellung und Kommunikation einer bestimmten Situation*" umfasst verschiedene Aspekte wie beispielsweise die Überprüfung von Massnahmen zur Lärminderung, die Einhaltung der Flugwege, die Erhebung von lärmabhängigen Lande-Entgelten sowie periodische Reports für die Öffentlichkeit. Alle Tätigkeiten basieren auf den Lärmereignissen, wie sie im nächsten Abschnitt beschrieben sind.

In der Beilage 2 ist die Lage der 25 Monitoringstationen angegeben. Die Monitoringpaare 11/12, 31/32, 51/52 und 71/72 werden als Tore bezeichnet. Neben der Lärmmessung einzelner Flugereignisse werden diese Monitoringpaare auch dazu verwendet, um die lärmabhängigen Lande-Entgelte im mehrjährigen Mittel zu bestimmen. Dabei wird der LAZ je nach Startroute bei einem der genannten Mikrofonpaare gemessen. Da die Messschwelle bei 70 dB (Tag) bzw. bei 65 dB (Nacht) liegt, werden alle Flugzeuge, die beim Messort einen Maximalpegel L_{ASmax} von weniger als 65 dB erzeugen, der untersten Lärmklasse zugeordnet. [27, 28]

Wird bei einem Start der typenspezifische Schallpegel bei einem Tor um 5 dB überschritten, erstattet Fraport eine Meldung an den Fluglärmschutzbeauftragten des Landes Hessen zur Abklärung, ob die Abweichung durch den Flugbetrieb begründet war oder ob die Fluggesellschaft gerügt werden muss [27]. Im Gutachten AP1 "Beitrag der Flugsicherung" wird das Verfahren erläutert.

3.1.4 Lärmereignisse

Ein Lärmereignis wird durch einen Datensatz beschrieben, der neben dem Schallpegel an einer bestimmten Messstation zusätzlich die Angaben Zeit, Flugweg (Runway, Route), Flugzeugidentifizierung (Typ, Immatrikulation) und weitere Angaben enthalten kann (Fluggesellschaft, Destination, Kursnummer, Abfluggewicht, etc.). Über Datum/Zeit können auch die entsprechenden Meteorbedingungen einem Lärmereignis zugeordnet werden. Im Kapitel "Messmethode" (3.1.8) wird die Erkennung von Fluglärm beschrieben. Wenn die Messstation ein Ereignis meldet, das nach den lokalen Kriterien bei der Messstation als Flugzeug eingestuft wird, so muss auf dem Flughafen kontrolliert werden, ob sich zu dieser Zeit ein Flugzeug in der Nähe des Mikrofons befand und, wenn ja, um was für ein Flugzeug es sich handelte. Bei vielen Flughäfen erfolgt die Identifizierung als Flugereignis auf Grund der Radardaten ("radar-gating"), in Frankfurt nach der unten beschriebenen Methode. Bei positiver Identifizierung werden die Messwerte durch die Verknüpfung mit den Daten des Flugbetriebs so ergänzt, dass das Flugereignis eindeutig identifiziert ist.

Da in Frankfurt bisher Radardaten juristisch nicht zugänglich waren, musste sich Fraport mit dem folgenden, personalintensiven System behelfen: Hilfsmikrofone nahe der Piste melden den Start bzw. die Landung. Im Schichtbetrieb beobachtet dauernd eine Person die Flugzeuge auf den Pisten und notiert den Typ, die Startrichtung und die Zeit vom Schallereignis beim Hilfsmikrofon. Auf Grund der Fluggeschwindigkeit und der Route wird berechnet, wann das Flugzeug in der Nähe des Mikrofons sein sollte. Das gemeldete Lärmereignis von der Messstation muss zeitlich übereinstimmen, um als zugeordnetes Fluglärmereignis klassiert zu werden. Diese Methode wird "time gating" genannt. Ab Frühling 2003 soll in Frankfurt eine neue Anlage der Firma Brüel & Kjaer in Betrieb genommen werden, die - unter Wahrung des Datenschutzes - mit einer intern verwendeten Koppelung zum Radar arbeiten wird.

Die Datenaufbereitung erfolgt in Frankfurt in zwei Stufen: Auf dem „Real-Time-Rechner“ werden die Ereignisse auf Plausibilität überprüft, Fehler korrigiert und Ergänzungen vom militärischen Betrieb hinzugefügt. Tageweise werden dann die kontrollierten Daten auf dem Rechner ADABUS abgespeichert. Mit diesem System stehen konsolidierte Daten erst am Folgetag zu Verfügung. Falls die Möglichkeit von "on-line"-Lärberechnungen für eine Lärm-Auskunftsstelle geprüft würde, müsste dieser Punkt beachtet werden.

3.1.5 Was ist Fluglärm?

Was für das Ohr eines Beobachters klar ist, ist messtechnisch wesentlich komplexer. Probleme ergeben sich bei leisen Flugzeuggeräuschen in einer durch andere Lärmquellen vorbelasteten Umgebung, z.B. in einem Ortszentrum. Wenn beispielsweise der Pegel eines Flugereignisses durch den Strassenlärm übertönt wird, ist es dann immer noch Fluglärm? Es braucht Spielregeln, wie eine Messung zu erfolgen hat.

Beispielsweise benützt der Flughafen von **Vancouver** (Kanada) folgende direkte Klassierung:

- a) Alle Pegel über einem Schwellenwert zählen als Fluglärm, vorausgesetzt es gibt via Radar eine Korrelation mit einer Flugbewegung (correlated noise).
- b) Alle andern lauten Ereignisse ohne Korrelation werden als "uncorrelated noise" ausgewiesen.
- c) Der Rest, d.h. alle Geräusche unterhalb des Schwellenwerts sind Umgebungsgeräusch, auch wenn sie von entfernten Flugzeugen stammen.

In **Frankfurt** wird der laute Fluglärm nach DIN 45'643 (1984) [6] erfasst (siehe Kap. 3.1.8 Messmethode). Ein sehr wichtiger Parameter ist dabei die Festlegung des Wertes, welcher der Maximalpegel L_{ASmax} mindestens erreichen muss. Er liegt bei den meisten Stationen bei 70 dB für den Tag (8:00 bis 20:00) und bei 65 dB in der Nacht (20:00 bis 8:00). Bei Fraport sind Untersuchungen im Gange, diese Schwellen je nach der Art des Umgebungslärms bei einer Messstation individuell abzustufen.

3.1.6 Ungemessene Ereignisse

Bei leisen Flugereignissen, d.h. wenn der Maximalpegel L_{ASmax} kleiner als die oben beschriebene Schwelle ist, so meldet die Messstation gar nichts. Um den Fluglärm aber auch für diese leisen Vorbeiflüge richtig zu berücksichtigen, wird ein aufwändiges Nachbearbeitungsverfahren eingesetzt. Auf Grund von Untersuchungen des DLR [16] wurde aus früheren Messungen mit Hilfe statistischer Methoden für jeden Messort der für die wichtigsten Flugzeugtypen zu erwartende Pegel extrapoliert. Wenn nun vom Flugbetrieb her bekannt ist, dass ein Flugzeug an einer Messstelle vorbeiflog, die Messstelle aber nicht angesprochen hat, so wird dieser so genannte „**Standardpegel**“ dem Ereignis zugeordnet und in den Statistiken weiterverwendet. Unter Berücksichtigung von Ereignissen mit den Standardpegeln ergibt sich eine ausgewiesene Lärmbelastung, die sicher höher ist, als wenn die leisen Ereignisse einfach weggelassen würden. Bei ungünstig gelegenen Messstationen kann der Anteil von ungemessenen Ereignissen sehr gross werden (vgl. Kapitel 3.4 und Beilage 4). Speziell zu beachten ist, dass keine Ergänzung mit Standardpegeln erfolgt, wenn erkannt wird, dass die Schallausbreitung in Bodennähe durch eine starke Temperaturinversion beeinflusst wird (warme Luftschicht liegt über kalter Luft).

3.1.7 Installierte Messsysteme

Hier geht es um die Messstationen rund um den Flughafen, welche die Lärmereignisse messen. Moderne Systeme liefern oft eine kontinuierliche Messung der 1-Sekunden $Leq(3)$ -Werte. (In Oslo Gardemoen wird zusätzlich das jeweils über 1 Sekunde gemittelte Spektrum übermittelt, weil in Norwegen der Immissionspegel im Innern des Hauses spezifiziert ist, und der muss frequenzabhängig berechnet werden in Bezug auf die Dämmung der Gebäudehülle und die Ausbreitungsdämpfung). Nach DIN 45'643 sind aber nur die Grössen L_{ASmax} , t_{10} und LAZ gefragt (vgl. Beilage 1). Deshalb besteht eine Messstation in Frankfurt aus der modernen, wetterfesten Mikrofoneinheit G.R.A.S 41 M (installiert Ende 2000), dem Messverstärker Brüel&Kjaer 2636 und einem lokalen Rechner, der die drei Messgrössen bestimmt und an die Zentrale übermittelt. (Die geplante neue Anlage wird den Zeitverlauf im 1/2-Sekundentakt und Audioaufzeichnungen im MP3-Format für die nachträgliche Verifizierung speichern).

Mit Ausnahme der Messorte 3, 7 und 9 auf Dächern mit Masthöhen von 1.2 bis 2 Metern, entsprechen die andern Messorte den internationalen Empfehlungen für die Aufstellung des Mikrofons auf einem Mast in etwa 6 Metern Höhe über weichem Untergrund. Die DIN 45 643 lässt die Aufstellung auf Dächern zu, insbesondere wenn dadurch eine gewisse Abschirmung vom Strassenlärm erreicht werden kann. Neuere Untersuchungen der EMPA haben gezeigt, dass je nach Schalleinfallswinkel, d.h. je nach der Lage der Flugbahn in Bezug auf die Dachlandschaft, die Reflexionsverhältnisse an Dachflächen Pegelunterschiede von ein bis zwei dB erzeugen können.

Die Messketten werden zwei mal am Tage auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft (elektrostatische Kalibrationskontrolle, Toleranzbereich ± 1 dB) und zwei mal pro Jahr von einer externen Firma mit einem akustischen Kalibrator und einem Rauschgenerator kalibriert.

3.1.8 Messmethode

Um ein Fluglärmereignis zu erkennen, wird in Frankfurt die Methode nach DIN 45'643, Teil 2 (1984) [6] verwendet. Es werden die folgenden Parameter verwendet:

- Die Mindestzeitdauer t_m eines Ereignisses muss länger als 5 Sekunden sein.
- Die Horchzeit entspricht 5 Sekunden; d.h. wenn das Ereignis abklingt und der Pegel unter die Ausschaltsschwelle sinkt, aber innerhalb 5 Sekunden nochmals über die Schwelle ansteigt, so wird dies als Fortsetzung des selben Ereignisses betrachtet.
- Der Maximalpegel L_{ASmax} muss am Tag mindestens 70 dB (A, Slow) erreichen, bzw. 65 dB nachts.
- Der Startpegel liegt 7 dB unter dem Minimum für den Maximalpegel L_{ASmax} , d.h. bei 63 dB tags bzw. 58 dB in der Nacht.
- Der Stopp-Pegel liegt bei 60 dB (tags) und 55 dB (nachts).

Beim Messpunkt 5 liegt die Schwelle um 2 dB höher als bei den andern Stationen. DIN 45 643 (Teil 2, Abschnitt 2.2) besagt, dass für jeden Messpunkt die Schwelle individuell und empirisch zu bestimmen ist.

Für die Ereignisse, deren Maximalpegel zwischen 7 und 10 dB über der Einschaltsschwelle liegen, wird die t_{10} -Zeit gemäss DIN 45'643 (Teil 2, Abschnitt 2.6) nach der Ergänzung durch die Dreiecksregel berechnet. (Dabei wird der Pegelverlauf durch ein Dreieck angenähert und die Zeitspanne wird proportional verlängert im Verhältnis von der Spanne des erfassten Pegels zu 10 dB).

Für die Festlegung der Messschwellen wird die Nacht von 20:00 bis 8:00 Uhr definiert. (Dies ist nicht zu verwechseln mit der Nacht-Gewichtung in der AzB von 22 bis 06 Uhr).

Der Dynamikbereich der Messungen beträgt 60 dB und reicht von 50 bis 110 dB.

3.1.9 Verifizierung und Validierung der Einrichtungen

Die **Verifizierung** (Prüfung der Erfüllung spezifizierter Anforderungen) und die **Validierung** der Anlagen (Prüfung der Tauglichkeit für die vorgesehene Anwendung) erfolgten durch den TÜV und sind im Gutachten L 4694 "Begutachtung der Fluglärmmessstationen am Frankfurter Flughafen" vom 10.4.2002 [58] festgehalten. In diesem Gutachten werden die Anforderungen an die Fluglärmüberwachungsanlagen nach DIN 45 643 und an deren normgerechten Betrieb untersucht. Weiter enthält es eine Systemprüfung im Sinne von ISO 14001 und DIN EN/ISO 17025. Das Gutachten kommt zu folgenden Schlüssen:

Teil A, Messtechnische Untersuchung:

"Die meisten der von Fraport betriebenen Fluglärmüberwachungsstationen am Frankfurter Flughafen sind für ihre spezifische Aufgabe geeignet. Einschränkungen ergeben sich lediglich bezüglich der Stationen Nr. 03, 09 und Nr. 31"

Teil B: Systemprüfung:

"Aufgrund der durchgeführten technischen und systematischen Prüfungen kann festgestellt werden, dass die Fluglärmüberwachung den Anforderungen entspricht".

Die Einschränkungen beziehen sich bei der Station 03 darauf, dass landende Flugzeuge beim Betrieb 25 nicht wahrnehmbar sind und auch Starts 07 relativ geringe Pegel erzeugen. Bei den Stationen 09 und 31 ergeben sich Probleme durch die relativ hohen Fremdgeräusche vom Strassenverkehrslärm.

Wir unterstützen das Gutachten des TÜV. Fraport macht die durch die gegebenen Randbedingungen sehr umständliche Arbeit gut, und dank den Standardwerten ergeben sich Aussagen, die den Anforderungen entsprechen. Die Anlagen sind technisch in Ordnung. Die Übereinstimmung der Messungen von Fraport mit Messungen von HLUG und deBAKOM (Kap. 5) und der Vergleich von AzB-Berechnungen mit Messungen von Monitorstationen (Kap. 6.4.4) erhärten den Befund des TÜV.

Unsere Vorbehalte betreffen den Umstand, dass der heutige Flugbetrieb mit eher leisen Flugzeugen an fast allen Monitoringstationen eigentlich gar nicht mehr gemessen werden kann. Diese Problematik wird in den folgenden Kapiteln dargelegt.

3.2 Generelle Aspekte zu Mikrofonstandorten

3.2.1 Messtechnische Randbedingungen

Auf Grund der messtechnischen Anforderungen sollten Messstationen sinnvollerweise nur dort aufgestellt werden, wo auch die leisen Flugzeugtypen noch so laute Pegel erzeugen, dass der Maximalpegel L_{ASmax} mindestens 13 dB lauter ist als das Umgebungsgeräusch (3 dB Sicherheitsabstand der Messschwelle zum Umgebungsgeräusch und 10 dB für eine korrekte Pegelmessung). Das heisst, die Messorte müssten in einer ruhigen Umgebung und eher in der Nähe des Flughafens aufgestellt werden (siehe Kapitel 3.3). Aus politischen Gründen stellen sich aber oft gegenteilige Anforderungen, indem Standorte in Ortschaften gewünscht werden.

3.2.2 Wächter-Funktion

Wenn bei einem Messort in einer Ortschaft die Pegel der meisten Vorbeiflügen so leise sind, dass für die Statistiken fast nur noch mit den berechneten Standardpegel gearbeitet werden kann, so entspricht dies eigentlich keiner Messung mehr, sondern einer speziellen Version von Fluglärmrechnung. Die Messeinrichtung erfüllt hier nur noch eine Wächter-Funktion, indem sie einzig bei den aussergewöhnlich lauten Ereignissen anspricht. Es ist eine politische Entscheidung, ob sich der Aufwand für den Betrieb einer solchen Station lohnt.

3.2.3 Aufwändige Messeinrichtungen

Der Fluglärm könnte auch in einer messtechnisch schlechten Umgebung (leise Fluglärmpegel und hohes Umgebungsgeräusch) mit entsprechend aufwändiger Messtechnik bis zu einem gewissen Grad noch gemessen werden. Denkbar sind eine dreidimensionale Intensitätsmessung oder Mikrofonarrays, die unterscheiden können, aus welcher Richtung der Schall kommt, oder ein System mit Spektralanalysen und nachgeschalteten neuronalen Netzwerken, das Klangmuster unterscheiden kann. Beide Systeme werden in Forschungsarbeiten eingesetzt. Für eine Monitoringstation ist aber das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen eines solchen Systems unverhältnismässig hoch.

Die dreidimensionale Intensitätsmessung verwendet drei beieinander liegende Mikrofone mit je 10 bis 60 mm Abstand, je nach interessierendem Frequenzbereich. Auf Grund der Phasenunterschiede zwischen den einzelnen Mikrofonen kann mit einem Frequenzanalysator und einem aufwändigen Berechnungsverfahren auf die Einfallsrichtung der Schallintensität in den verschiedenen Frequenzbereichen geschlossen werden. Eine Variante davon ist das System von Roosnek [52] mit 4 Mikrofonen in je etwa 1 m Abstand.

Mikrofonarrays bestehen je nach Anforderung aus 4 bis 32 Mikrofonen, die in einer Reihe montiert sind. Die Länge des Arrays hängt ab von der tiefsten zu messenden Frequenz und beträgt typisch 1 bis 4 m. Durch die Überlagerung der Signale von allen Mikrofonen ergibt sich die besondere Empfindlichkeit in einer bevorzugten Ebene. Durch selektive Zeitverzögerungen pro Mikrofonkanal kann diese Ebene etwas gedreht werden. Die Arraymesstechnik hat sich für die Ortung von Quellen, z.B. bei Immissionsmessungen von ausgedehnten Industrieanlagen oder bei vorbeifahrenden Zügen, seit einigen Jahren etabliert.

Die Erkennung von zeitlichen und frequenzmässigen Schallmustern mit neuronalen Netzwerken oder mit besonderen Algorithmen verwendet (mindestens) ein Mikrofon und extrahiert die Daten durch intensive Signalverarbeitung. Die Arbeitsweise dieser Systeme ist etwas ähnlich wie die Geräuscherkennung beim Menschen, wenn er zwischen einem Strassenfahrzeug und einem Flugzeug auf Grund seiner Erfahrung unterscheidet. Die Firma deBAKOM verwendet solche Anlagen [12]. In einem Forschungsprojekt hat die Firma Norsonic (N) mit neuronalen Netzwerken bei einem Kleinflugplatz automatisch die Propellerflugzeuge von Jetflugzeugen unterschieden.

3.2.4 Akustische Tore

Wenn es möglich würde, auch in Deutschland die Radarinformationen für die Flugwegüberwachung einzusetzen, würde die Notwendigkeit der akustischen Tore entfallen. Heute können die Tore ihre Aufgabe nicht mehr zufriedenstellend erfüllen, weil die meisten Flugzeuge zu leise sind und folglich gar nicht erfasst werden.

3.2.5 Absenkung der Pegelschwelle

Beim heutigen Betrieb wird ein Fluglärmereignis tags erst erkannt, wenn der Maximalpegel L_{ASmax} mindestens 70 dB laut ist. Wie im Kapitel 5.3.3 bei den Vergleichsmessungen von HLUK und deBAKOM gezeigt wird, ist es möglich, mehr Ereignisse zu erfassen, wenn die Schwelle herabgesetzt wird. Wie in Kap. 3.1.8 dargestellt, beginnt der Messbereich jeweils 7 dB unter der Schwelle für den Maximalpegel L_{ASmax} , d.h. bei 63 dB tags bzw. 58 dB nachts. Typische Grundgeräuschpegel in bewohnten Gebieten liegen zwischen 50 und 55 dB. Wie tief der Schwellenwert sinnvollerweise festgelegt werden kann, damit nicht unzulässig viele Fremdereignisse als Fluglärm klassiert werden, hängt von den lokalen Verhältnissen ab. Fraport ist daran, dieses Thema zu untersuchen.

3.2.6 Monitor-Standorte für Lärm-Entgelte

Wie in 3.1.3 beschrieben, werden die lärmabhängigen Entgelte auf Grund der Messungen bei den Toren erhoben, wobei dort der tiefste messbare Maximalpegel L_{ASmax} 70 dB tagsüber bzw. 65 dB nachts beträgt. Da die Flugzeuge leiser werden, stösst man hier an Grenzen. Eine Belohnung mit tieferen Entgelten für die Flugzeuge, die an diesen Standorten wesentlich geringere Pegel erzeugen, ist mit diesen Monitor-Standorten nicht durchführbar. Dafür braucht es Messorte, die wesentlich näher bei der Piste sind, um auch die leisen Flugzeuge messtechnisch gut erfassen zu können. Dabei ist aber die Leistungsreduktion nach der ersten Startphase zu beachten. Entweder müssten die Messorte unmittelbar am Pistenende sein, um die Startleistung zu erfassen, oder die Messorte müssten so weit entfernt von der Piste sein, dass die Flugzeuge die Leistungsreduktion auf "climb power" bereits ausgeführt haben. (Diese Leistungsreduktion erfolgt beim Startverfahren nach "ICAO A" in 450 Meter über Pistenhöhe oder nach anderen Verfahren bereits früher). Es sind auch die internationalen Bestrebungen zu beachten, Lärm-Entgelte auf Grund von Zertifizierungsdaten, anstatt auf Grund von aktuellen Messwerten zu etablieren.

3.3 Gebietsabgrenzungen für messtechnisch erfolgreiche Fluglärmfassungen

Im vorhergehenden Kapitel wurden Randbedingungen für erfolgreiche Messungen genannt. In diesem Kapitel werden die schematischen Abgrenzungen der Gebiete hergeleitet, in welchen die messtechnische Erfassung der Fluglärmpegel einwandfrei möglich ist. Dabei handelt es sich um eine Abschätzung unter bestimmten Annahmen mit dem Ziel, die Möglichkeiten und Grenzen von Monitoringstandorten aufzuzeigen.

3.3.1 Beschreibung der getroffenen Annahmen

"Referenz"-Flugzeugtyp

Die Flugzeuge sind leiser geworden. In der Beilage 3 ist angegeben, wie viel Schallenergie die verschiedenen Flugzeugtypen in Frankfurt zur Gesamtbelastung beitragen (Schallenergie des Flugzeugtyps in 300 Metern Abstand, gewichtet mit der Anzahl Bewegungen in Frankfurt im Jahr 2000). Für unsere Abschätzung wollen wir annehmen, dass alle startenden Flugzeuge, die Beiträgen von über 2% zur Gesamtbelastung liefern, messtechnisch erfasst werden sollen. Das leiseste Flugzeug in dieser Gruppe ist der Airbus A 319 mit einem Pegel von rund 84 dB L_{ASmax} in 300 m Abstand. Der Airbus A 319 wird als Grenzfall gewählt für ein Flugzeug, das noch erfasst werden soll. Die Betrachtungen gelten jedoch für alle Flugzeugtypen die gleich laut oder lauter sind. (Tabelle 1 in Beilage 4). Umgekehrt wird damit angenommen, dass die leisere Flugzeugtypen, wie z.B. der RJ 100 (Jumbolino) oder viele Turboprops auch an den optimalen Standorten nur teilweise erfasst werden.

Für die Landungen ergeben sich ähnliche Verhältnisse, so dass auch hier der A 319 als Referenz gewählt wird, mit einem Pegel von etwa 78 dB L_{ASmax} in 300 Metern Abstand. (Vergleichbare Typen sind auch B 737-500 und A 320).

Notwendiger Pegel L_{ASmax} beim Monitoringstandort

Für eine gesicherte Messung muss der Maximalpegel L_{ASmax} mindestens 13 dB lauter als das Umgebungsgeräusch sein (3 dB Abstand zum Umgebungsgeräusch und 10 dB Auswertebereich). Nach unserer Erfahrung liegt in urbanen Gebieten das Umgebungsgeräusch bei 50 bis 55 dB, so dass sich hier eine Schwelle von 63 bis 68 dB ergibt. Es werden deshalb zwei Abschätzungen für die Schwelle von 70 dB und 65 dB durchgeführt. Diese Pegel entsprechen den heute verwendeten Schwellen an den meisten Monitoringstationen für die Tages- bzw. Nachtperiode.

Maximale Distanzen

Für Distanzen von einigen hundert Metern verkleinert sich der Maximalpegel bei einer Verdoppelung der Distanz um etwa 7 bis 9 dB (6 dB wegen der geometrischen Dämpfung pro Distanzverdoppelung und zusätzlich 1 bis 3 dB für die distanzabhängige Luftabsorption). Es stellt sich also die Frage, wie weit entfernt vom Monitorstandort das Flugzeug vorbeifliegen darf, um immer noch den Pegel von $L_{ASmax} = 70$ (bzw. 65) dB zu erzeugen. Nach Abschätzungen mit FLULA2 und mit INM 6.0c ergeben sich für den A 319 beim Start die maximalen Distanzen von etwa 800m (für $L_{ASmax}=70$ dB) und 1300m (für $L_{ASmax}=65$ dB) und bei der Landung maximale Distanzen von 400m bzw. 700m.

Damit der Pegel L_{ASmax} mindestens 70 dB erreicht, darf der kürzeste Abstand vom Flugzeug zur Monitorstation beim Start nicht grösser als 800 m und bei der Landung nicht grösser als 400 m sein. Für 65 dB ergeben sich 1'300 m (Start) und 700 m (Landung).

Begrenzung des Einfallswinkels

Als weitere Einschränkung muss beachtet werden, dass bei der Schallausbreitung in Bodennähe zusätzliche Dämpfungseffekte auftreten, die stark von lokalen Gegebenheiten beeinflusst werden (Hindernisse, Bodenbeschaffenheit, gekrümmte Schallausbreitungswege durch Witterungseinflüsse). Um diese Effekte weitgehend auszuschliessen, wird die folgende Randbedingung aufgestellt: Der Schalleinfallswinkel beim Monitoringpunkt, gemessen zwischen der Verbindungslinie zum nächsten Punkt auf der Flugbahn und der horizontalen Ebene, soll grösser als 30 Grad sein.

Der "Bodeneffekt" oder "lateral attenuation" wird in verschiedenen Fluglärmprogrammen unterschiedlich berücksichtigt: im INM (bis Version 6.0c) [19] und in DOC.29 (1997) [20] wurde mit der SAE 1751 (1981) [53] eine Zusatzdämpfung für Winkel unter 60 Grad berücksichtigt; im aktuellen Vorschlag für eine revidierte SAE 1751 gibt es eine Zusatzdämpfung vermutlich nur noch für Winkel unter 30 Grad; in FLULA2 [57] und AzB [2] gibt es eine Zusatzdämpfung nur für Winkel unter 15 Grad.

Flugprofile

Das Startprofil setzt sich aus diversen Elementen mit unterschiedlichen Flugparametern zusammen, und das Steigvermögen hängt vom Abfluggewicht ab. Für unsere Abschätzungen genügt die vereinfachte Annahme, das Flugzeug steige kontinuierlich auf 2.5 km Höhe bei einer Flugstrecke von 22 km. Dieses vereinfachte Profil kann z.B. nach INM 6.0c für den A 319 (und ähnliche Typen) bei leichtem Abfluggewicht angenähert werden, wobei auch diese Annahme als orientierende Schranke für die Abschätzung des Gebietes zu verstehen ist. Bei weniger steileren Flugprofilen wird es entsprechend lauter an einem Monitorstandort, d.h. die Messbedingungen verbessern sich über die Grundanforderung hinaus. Tiefere Flugprofile ergeben sich bei hohem Abfluggewicht, bei weniger leistungsstarken Flugzeugtypen und beim Kurvenflug.

Das Landeprofil nach ILS (Instrument Landing System) hat eine Neigung von 3 Grad und der Aufsetzpunkt auf die Piste kann etwa 300 m vom Pistenanfang entfernt angenommen werden.

3.3.2 Gebiet für Starts

Aus den Abschätzungen ergibt sich: Damit für den Airbus A 319 und für alle lautereren Typen gemäss Beilage 3, Tabelle 1, der Pegel L_{ASmax} beim Monitor mindestens 70 dB erreicht, darf der kürzeste Abstand zur Flugbahn nicht grösser als 800 m sein. Zusätzlich soll der Schalleinfallswinkel mindestens 30 Grad betragen. In der Figur 3-1 wird als Referenzpunkt (0 km) der Abhebeort des Flugzeugs von der Piste gewählt. Mit dem angenommenen Steigprofil erreicht das Flugzeug nach rund 7 km eine Flughöhe von 800 m. Das mögliche Gebiet für Monitorstandorte wird von einer Ellipse mit den Achsen: 0.8 km und 7.0 km begrenzt. Wegen der Bedingung für den Schalleinfall ≥ 30 Grad wird das mögliche Gebiet aber im pistennahen Bereich (bis etwa 3.5 km) zusätzlich durch die auseinander laufenden Geraden begrenzt.

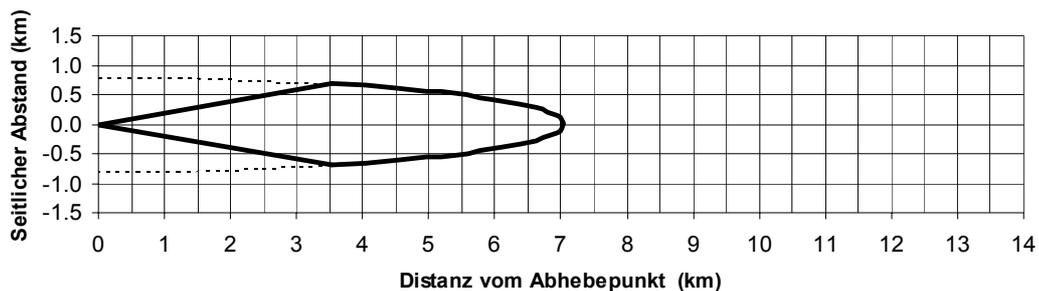


Fig. 3-1: **Starts: Gebiet für optimale Monitorstandorte für $L_{ASmax} \geq 70$ dB**

Das Flugzeug fliegt nach rechts und der Abhebeort auf der Piste ist bei km 0. Das Gebiet wird von 0 bis 3.5 km begrenzt durch die Forderung, dass der Schalleinfall $\geq 30^\circ$ sein soll, und von 3.5 bis 7 km durch die kürzeste Distanz zum Flugzeug von ≤ 0.8 km.

Die selben Abschätzungen für $L_{ASmax} = 65$ dB ergeben ein entsprechend grösseres Gebiet gemäss Fig. 3-2

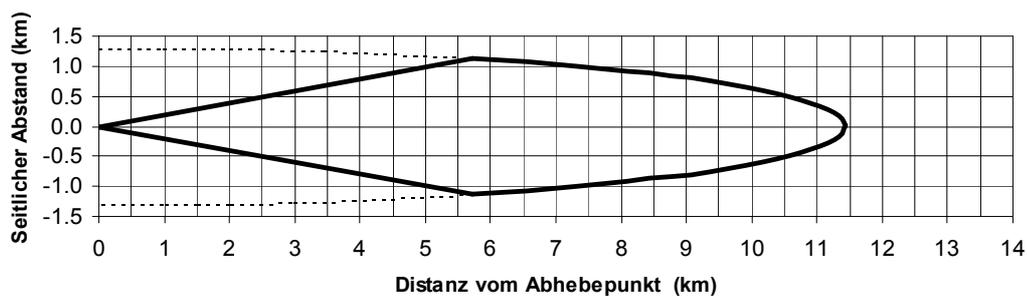


Fig. 3-2: **Starts: Gebiet für optimale Monitorstandorte für $L_{ASmax} \geq 65$ dB**

Das Flugzeug fliegt nach rechts und der Abhebeort auf der Piste ist bei km 0. Das Gebiet wird von 0 bis 5.7 km begrenzt durch die Forderung, dass der Schalleinfall $\geq 30^\circ$ sein soll, und von 5.7 bis 11.5 km durch die kürzeste Distanz zum Flugzeug von ≤ 1.3 km.

Das in Fig. 3-1 oder Fig. 3-2 schematisch dargestellte Gebiet muss beim Kurvenflug entlang der Flugachse angepasst werden. Bei einer starken Streuung der Flugwege müssten die Gebiete nach Fig. 3-1/3-2 je die typische, seitlich abweichende Spur links und rechts der Hauptspur aufgezeichnet werden. Das verbleibende, optimale Gebiet ist dann dort, wo sich die beiden Gebiete überschneiden.

3.3.3 Gebiet für Landungen

Aus den Abschätzungen ergibt sich: Damit für den Airbus A 319 und für alle lauterer Typen gemäss Beilage 3, Tabelle 1 der Pegel L_{ASmax} beim Monitor mindestens 70 dB erreicht, darf der kürzeste Abstand zur Flugbahn nicht grösser als 400 m sein. (Da die Flugzeuge im Landeanflug leiser als beim Start sind, ist die maximale Distanz entsprechend kürzer.) Zusätzlich soll der Schalleinfallswinkel mindestens 30 Grad betragen. In den Figuren 3-3 und 3-4 wird als Referenzpunkt (0 km) der Aufsetzpunkt auf die Piste gewählt. Mit dem ILS-Gleitwinkel von 3 Grad hat das Flugzeug in rund 7.6 km eine Flughöhe von 400 m. Das mögliche Gebiet für Monitorstandorte wird von einer Ellipse mit den Achsen: 0.4 km und 7.6 km begrenzt. Wegen der Bedingung für den Schalleinfall $\geq 30^\circ$ wird das mögliche Gebiet aber im pistennahen Bereich (bis etwa 3.8 km) zusätzlich durch die auseinander laufenden Geraden begrenzt.

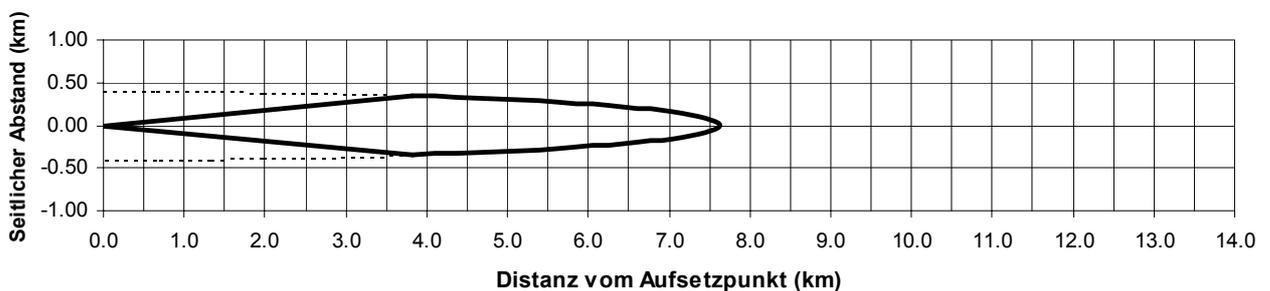


Fig. 3-3: **Landungen: Gebiet für optimale Monitorstandorte für $L_{ASmax} \geq 70$ dB**

Der Anflug erfolgt von rechts und der Aufsetzpunkt auf der Piste ist bei km 0. Das Gebiet wird von 0 bis 3.8 km begrenzt durch die Forderung, dass der Schalleinfall $\geq 30^\circ$ sein soll, und von 3.8 bis 7.6 km durch die kürzeste Distanz zum Flugzeug von ≤ 400 m.

Die selben Abschätzungen für $L_{ASmax} = 65$ dB ergeben ein entsprechend grösseres Gebiet gemäss Fig. 3-4

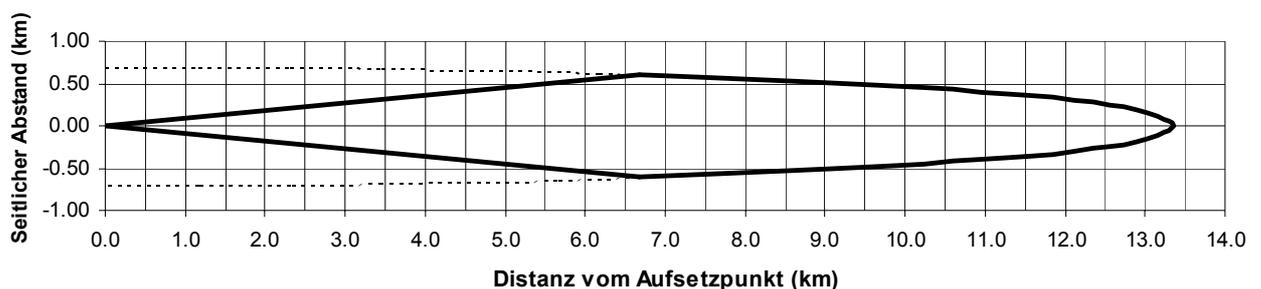


Fig. 3-4: **Landungen: Gebiet für optimale Monitorstandorte für $L_{ASmax} \geq 65$ dB**

Der Anflug erfolgt von rechts und der Aufsetzpunkt auf der Piste ist bei km 0. Das Gebiet wird von 0 bis 6.7 km begrenzt durch die Forderung, dass der Schalleinfall $\geq 30^\circ$ sein soll, und von 6.7 bis 13.4 km durch die kürzeste Distanz zum Flugzeug von ≤ 700 m.

3.4 Messtechnische Eignung der Mikrofonstandorte

Wie im Kapitel 3.1.9 dargestellt, kommt der TÜV [58] zur Schlussfolgerung, dass *unter Einbezug der Ergänzung durch Standardwerte* bei ungemessenen Ereignissen alle Stationen für ihre spezifische Aufgabe geeignet sind, ausser den Stationen 03, 09 und 31, wo ungünstige Fremdgeräuschsituationen anzutreffen sind.

Die gute Übereinstimmung zwischen den mit Hilfe der Standardwerte ergänzten Werte für die Messorte und den AzB-Berechnungen unterstützt obige Aussage. Wenn aber Messorte so ungünstig positioniert sind, dass sie fast nichts messen, so liefert die Ergänzung mit den Standardwerten im Grunde genommen für den Monitorstandort einen berechneten Wert anstelle eines Messwertes. Es geht in der nachfolgenden Diskussion also nicht um die ausgewiesenen Resultate (die sind gut), sondern um die methodische Frage der messtechnischen Erfassung von Vorbeiflügen.

Im Unterschied zur Untersuchung des TÜV wird hier diskutiert, wie gut geeignet ein Standort ist, um tatsächlich *Messungen zu ermöglichen*, d.h. ohne Rückgriff auf die Standardwerte. Die Einschätzung basiert auf dem Verhältnis der Anzahl gemessener Ereignisse mit Pegeln L_{ASmax} über 70 dB (die Ansprechschwelle während des Tages) bzw. 65 dB (Ansprechschwelle Nacht) zu der Anzahl der gesamthaft ausgewiesenen Ereignissen während des Tages bzw. der Nacht.

Eine Übersicht über die Eignung der einzelnen Standorte ist in Beilage 4 wiedergegeben. Die Ergebnisse lassen sich folgendermassen zusammenfassen:

Da moderne Flugzeuge wesentlich leiser geworden sind, erfassen mit der Schwelle $L_{ASmax} = 70$ dB nur noch 4 der 25 Stationen jeweils mehr als 50% der vorbeifliegenden Flugzeuge (Nummer 5, 6, 12, 71). Die messtechnisch etwas besseren Verhältnisse "nachts", wo die Schwelle von 65 dB verwendet wird, zeigen noch einen kleinen Spielraum auf durch Absenkung der Schwelle auch am Tag. Trotzdem sind viele Stationen messtechnisch sehr problematisch.

Die Messpunkte 5 und 6 liegen für Landungen 07 im Gebiet, das in Fig. 3-3 definiert wird, und sie weisen auch Messquoten von 85% und mehr aus. Die Messpunkte 12 und 71 liegen bereits etwas ausserhalb des Gebietes, das nach Fig. 3-1 optimal für Starts wäre. Entsprechend messen sie auch nur noch die lautereren Ereignisse mit etwas über 50% Messquote.

3.5 Hinweise zur Errichtung neuer Messstandorte bei neuer Landebahn

Im Hinblick auf die geplante neue Landebahn stellt sich die Frage nach zusätzlichen Messorten. Aus messtechnischer Sicht müssen sie im Gebiet liegen, das in Fig. 3-3 für Landungen definiert ist, d.h. maximal bis 7.6 km von der Piste entfernt und nur unwesentlich abweichend von der Anflugachse. Das mögliche Gebiet mag etwas grösser werden, wenn auch noch Maximalpegel unter 70 dB akzeptiert werden, oder wenn nur die lautesten Flugzeuge gemessen werden sollen und die leiseren durch die Standardpegel berücksichtigt werden.

3.6 Fazit

Die in Frankfurt verwendete Struktur des Monitoring ergibt sich aus den übergeordneten Gesetzen. Grosse Probleme ergeben sich aus den Vorgaben, den Fluglärm auch in messtechnisch sehr ungünstigen Gebieten zu „messen“. Fraport leistet hier einen sehr grossen Aufwand, um auch bei den Standorten mit messtechnisch extrem ungünstigen Bedingungen trotzdem noch ein verlässliches Resultat ausweisen zu können. Man muss sich aber bewusst sein, dass es sich in diesen Fällen nur noch zu einem sehr kleinen Teil um Messungen handelt, und dass das Ergebnis praktisch durch die Ersatzberechnungen dominiert wird. An diesen Orten haben die Mikrofone fast nur noch eine scheinbare Funktion und die Lärmbelastung könnte einfacher durch eine detaillierte Fluglärmrechnung bestimmt werden. Durch das Absenken der Messschwellen kann der Anteil der erfassten Flugzeuge je nach Standort vielleicht noch etwas optimiert werden, aber dafür handelt man sich den Nachteil ein, dass die Fluglärmfassung empfindlicher wird gegen Falschmessungen durch Störgeräusche.

4 Vergleich mit Monitoringsystemen anderer Flughäfen

4.1 Aufgabenstellung und Methodik

Das in Frankfurt betriebene Monitoringsystem soll mit Systemlösungen an anderen nationalen und internationalen Flughäfen verglichen werden. Zu diesem Zweck wurde ein Fragebogen entwickelt, welcher aus sechs Teilen besteht (Tabelle 4-1 zeigt eine Übersicht). Der erste Teil enthält allgemeine Fragen zum Grund, Ziel und Zweck der Messung. Die Teile zwei bis fünf beschäftigen sich mit der Messausrüstung, dem Umfang und Inhalt der Messung sowie der Datenerfassung und –verarbeitung. Ein wichtiger Punkt ist dabei die technische Realisierung zur Identifikation eines Fluglärmereignisses.

Tabelle 4-1 Inhalt des Fragebogens „Survey of Aircraft Monitoring Systems“

Teil 1: Allgemeines	Grund für das Betreiben einer Monitoringanlage (Ziel und Zweck der Messungen); Kontrolle und Verantwortlichkeiten; Personeller und materieller Aufwand
Teil 2: Ausrüstung	Anlagentyp; Mikrofonhöhe; Mikrofonumgebung; Unterhalt / Kalibrationsintervalle; Anzahl fixe und mobile Stationen; Distanzen zum Flughafenbezugspunkt; Gründe für die Wahl der Monitoringstandorte
Teil 3: Messung	Messstandards; gemessene und aufgezeichnete akustische Grössen; ausgewiesene Lärmmasse; Behandlung des Grundgeräusches und der Umgebungsgeräusche; Schwellenwerte (Kriterien)
Teil 4: Datenverarbeitung	Erfassung und Identifikation eines Flugereignisses; Berücksichtigung der Umgebungsgeräusche bei der Ermittlung des Fluglärms; Darstellung der Messergebnisse
Teil 5: Zusätzliche Informationen	Bodenlärm; Schubumkehr
Teil 6: Vertraulichkeit	Verwendung und Weitergabe der Daten; Kontaktadressen

Elf Flughäfen in acht verschiedenen Ländern¹ wurden angeschrieben. Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, dass Erfassungssysteme verschiedener Anbieter sowie Flughäfen unterschiedlichen „Alters“ und unterschiedlicher Grösse berücksichtigt sind. Nachfolgende Tabelle 4-2 zeigt eine Übersicht. Aus Gründen der Vertraulichkeit sind die Flughäfen alphabetisch nummeriert. Flughafen C ist Frankfurt.

Tabelle 4-2 Kennzahlen der angefragten Flughäfen; beim Flughafen C handelt es sich um Frankfurt (Quelle: Flughafen Zürich, Unique)

Flughafen	Flugbewegungen 2001, in Tausend	Anzahl Passagiere 2001, in Mio	Anzahl Pisten *
A	416.6	39.3	5
B	248.0	8.2	3
C	440.2	48.3	3
D	163.2	7.5	1
E	457.6	60.4	3
F	310.3	23.5	2
G	187.0	14.0	2
H	515.1	47.9	4
I	312.8	15.5	3
J	173.7	11.8	2
K	309.0	21.0	3

* Es wird nicht nach An- und Abflugrichtung unterschieden

¹ Deutschland, England Frankreich, Holland, Kanada, Norwegen, Österreich, Schweiz

4.2 Auswertung des Fragebogens

4.2.1 Vorbemerkung

Neun Fragebögen wurden retourniert. Die Flughäfen E und H antworteten nicht. Die eingegangenen Antworten weisen unterschiedliche Detaillierungsgrade auf. Die Flughäfen C, D, G und K machen ausführliche Angaben. Die Antworten der restlichen Flughäfen weisen bei den technischen Fragen im Zusammenhang mit der Messung und der Datenverarbeitung teilweise erhebliche Lücken auf. Beilage 5 fasst die Ergebnisse der Umfrage zusammen.

4.2.2 Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Vergleich

Für das Betreiben eines Fluglärmmonitorings geben die Befragten folgende Gründe an (nur die wichtigsten Beweggründe sind aufgeführt in der Reihenfolge ihrer häufigsten Nennungen):

Auf Wunsch der Anwohner und Gemeinden	→ B, C, D, I, J, K
Vom Gesetz gefordert	→ A, C, G, F
Feststellen von Abweichungen gegenüber den festgelegten An- und Abflugverfahren	→ C, D, I, J
Messungen als Grundlage für ein Lärmgebührenmodell	→ C, D, K
Zur Validierung von Lärmrechnungen / zur Überprüfung von berechneten Lärmzonen	→ D, J
Zur Darstellung der Entwicklung der Lärmbelastung über viele Jahre.	→ C, K

In allen Fällen ist der Flughafenhalter für den Unterhalt und Betrieb der Anlage verantwortlich. Im Vergleich zu Frankfurt (C) ist der Personalaufwand auf den anderen Flughäfen eher gering; die meisten Flughäfen müssen mit 1 bis 3 Personen auskommen. Auf den neun untersuchten Flughäfen kommen verschiedene Systeme zum Einsatz (G.R.A.S/Lochard, Brüel&Kjaer, Norsonic/Topsonic). Mit Ausnahme von C werden die Messungen mit Hilfe von Radaraufzeichnungen identifiziert und einem Einzelereignis zugeordnet. Dies erklärt auch den hohen personellen Aufwand in Frankfurt, wo im Schichtbetrieb die Flugereignisse teilweise manuell identifiziert werden (vgl. Kapitel 3). Die Messstandorte befinden sich ausnahmslos in bewohnten Gebieten auf Hausdächern oder im freien Feld über Grasboden. Die Mikrofonhöhen liegen zwischen 6 und 10 Metern. Die Messsysteme werden in der Regel zweimal täglich durch elektrostatische Anregung der Mikrofonmembrane auf korrektes Funktionieren überprüft, und ein- bis zweimal jährlich mit einem akustischen Kalibrator kalibriert. Die Eichung erfolgt einmal jährlich bei einer akkreditierten Stelle.

Die untere Tabelle auf Beilage 5 führt die von den verschiedenen Systemen erfassten Masse auf. Welche Lärmmasse gespeichert und welche ausgewiesen werden, hängt meist von den gesetzlichen Anforderungen in den jeweiligen Ländern ab (länderspezifische Lösungen). Bodenlärm und Rückstosslärm werden auf keinem der befragten Flughäfen messtechnisch erfasst. Beim Flughafen B wird hingegen an zwei speziellen Stationen nahe der Piste die Schubumkehr bei der Landung gemessen. Sämtliche Messresultate werden ausnahmslos in Form von Reports oder Bulletins veröffentlicht (monatlich oder vierteljährlich und jährlich). In den meisten Fällen sind sie elektronisch übers Internet abrufbar.

Die Anzahl der Messstellen variiert von Flughafen zu Flughafen und bewegt sich zwischen 9 (K) und 25 (C). Dabei kann die Annahme „je grösser der Flughafen, desto mehr Messstellen“ nicht bestätigt werden. Die Standorte sind je nach Besiedlungsstruktur in der Regel zwischen etwa 3 bis 16 Kilometer vom Flughafenbezugspunkt entfernt. Sämtliche befragten Flughäfen geben jedoch an, dass gerade die weit entfernten Standorte erhebliche Probleme bei der Erfassung der Einzelflugereignisse aufweisen. Als massiv störende Einflüsse bei der Erfassung werden hohe Umgebungsgeräuschpegel (bei relativ niedrigen Emissionspegeln) sowie eine nicht eindeutige Identifikation des Flugereignisses wegen zu grosser Entfernung oder wegen gleichzeitiger Überflüge genannt.

Die Identifikation der Flugereignisse erfolgt mit Hilfe der Radaraufzeichnungen, ausser in Frankfurt, wo diese Methode bisher aus Gründen des Datenschutzes noch nicht verwendet werden konnte (vgl. Kapitel 3).

Flughafen A überlegt zur Zeit den Einsatz von Mikrofon-Arrays und neuronalen Netzwerken zur Ortung und Identifikation der Flugereignisse. Die entsprechenden Techniken bestehen teilweise schon oder sind in Entwicklung. Der Beweis der Praxistauglichkeit zur Erfassung von Fluglärmereignissen steht jedoch noch aus.

4.3 Fazit

International kann die in Frankfurt (C) verwendete Systemlösung ohne weiteres bestehen. Frankfurt betreibt ein sehr aufwändiges Monitoring auf hohem Niveau. Das Messnetz hat eine im internationalen Vergleich äquivalente Ausdehnung mit den entsprechenden Problemen bei der messtechnischen Erfassung von Vorbeiflügen in weit entfernten, urbanen Gebieten. In Frankfurt werden mit Abstand am meisten Messstationen betrieben. Der von der Grösse her vergleichbare Flughafen A hat ein Messnetz, welches mit rund 20 Prozent weniger Stationen auskommt. Dies ist wohl mit ein Grund für den hohen Personalaufwand in Frankfurt. Wie bereits erwähnt, liegt der Hauptgrund jedoch bei der teilweise manuellen Identifikation der Flugereignisse an den einzelnen Messstellen wegen der fehlenden Verknüpfung mit Radardaten. Hier ist auch der grösste Unterschied im internationalen Vergleich auszumachen. Während sämtliche ausländischen Flughäfen mit Systemlösungen aufwarten, die bei der Identifikation der Lärmereignisse auf das Radar der Flugwegüberwachung zurückgreifen können, muss in Frankfurt aus rechtlichen Gründen ein System betrieben werden, welches bei der Flugzeugidentifikation bei weitem nicht dem Stand der Technik entspricht. Es ist hier jedoch anzumerken, dass im Zusammenhang mit der Erneuerung der Hardware, die noch dieses Jahr in Angriff genommen werden soll, eine Radarkoppelung geplant ist.

5 Vergleich verschiedener Lärmmessungen

5.1 Übersicht

Neben den Messungen der Fraport AG werden in der Umgebung des Flughafens Frankfurt/Main auch Fluglärmmessungen von anderen öffentlichen und private Stellen durchgeführt. Dabei gibt es z.T. Unterschiede bei den von den verschiedenen Organisationen ausgewiesenen Lärmbelastungen. Im Folgenden wird untersucht, in welchem Ausmass sich die Messungen unterscheiden und welche Ursachen allfällige Abweichungen haben. Für den Vergleich liegen die Messresultate von drei verschiedenen Organisationen vor:

Fraport:	25 Messstationen
deBAKOM:	7 Messstationen
HLUG:	3 Messstationen

Messungen verschiedener Organisationen für vergleichbare Immissionsorte liegen für die Orte Neu-Isenburg, Zeppelinheim, Raunheim und Klein-Gerau vor. Eine Übersicht über die Lage der verglichenen Messstellen ist in nachfolgender Abbildung gegeben. Zur Orientierung ist auch die 60 dB Kurve eingetragen (Leq(4) Ist-2000, Berechnung HLUG).

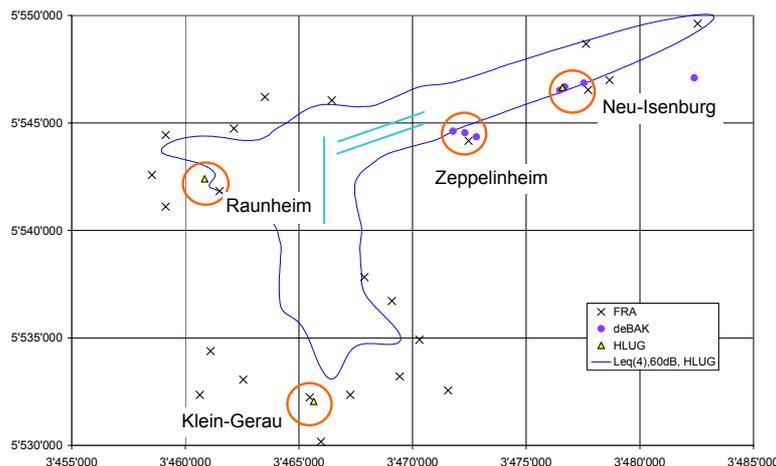


Abbildung 5-1 Geographische Lage der von Fraport, deBAKOM und HLUG betriebenen Messstationen. Mit den Kreisen werden die Orte markiert, an denen Messungen von verschiedenen Organisationen vorliegen. (Eine detailliertere Darstellung der Lage der Messstationen ist in der Beilage 2 wiedergegeben.)

In den nachfolgenden Ausführungen werden die von den verschiedenen Organisationen durchgeführten Messungen im Detail untersucht und die ausgewiesenen Messergebnisse einander gegenübergestellt. Hierzu stehen für jede Messstation die Werte der äquivalenten Dauerschallpegel Leq(4) für das Betriebsjahr 2000 sowie verschiedene Kenngrößen einzelner Lärmereignisse zur Verfügung. Der direkte Vergleich einzelner Lärmereignisse an den verschiedenen Messstellen gestaltete sich schwierig, da nur bei den Fraport-Messungen eine eindeutige Zuordnung der ausgewiesenen Messdaten zu einzelnen Flugbewegungen gegeben ist. Bei den Messdaten von HLUG und Fraport konnte die Zuordnung nur mit Hilfe der Ereigniszeit vorgenommen werden. Da der direkte Vergleich einzelner Lärmereignisse nur mit einer von Hand durchgeführten, aufwändigen Zuordnung realisiert werden konnte, wurde diese Untersuchung exemplarisch für eine kurze Zeitperiode für die verschiedenen Messstellen in Neu-Isenburg ausgeführt.

5.2 Unsicherheit von Fluglärmmessungen

5.2.1 Definition der Messgrösse

Gemäss DIN 45'643-1 sind zwei unterschiedliche Verfahren zur Ermittlung des Einzelereignispegels zulässig. So lässt sich der Einzelereignispegels L_{AZ} mit Hilfe von L_{ASmax} und der t_{10} -Zeit oder mit einem Integrationsverfahren ermitteln. Die Ergebnisse dieser beiden Verfahren können dabei unterschiedlich ausfallen. Weiter ergeben sich Unsicherheiten durch den Einfluss von Fremdgeräuschen. Die Norm DIN 45'643-3 schreibt lediglich vor, dass Fremdgeräusche zu berücksichtigen sind, wie diese identifiziert und allenfalls kompensiert werden, bleibt dagegen offen. Einen weiteren Einflussfaktor stellen die durch die Messung nicht erfassten Vorbeiflüge dar. Nach DIN 45'643-2 ist der äquivalente Dauerschallpegel $Leq(4)$ als hinreichend genau zu betrachten, wenn das Verhältnis der gemessenen zur Gesamtzahl der an der Messstelle stattgefundenen Vorbeiflüge grösser als 50 Prozent ist. Andernfalls "... ist der ermittelte Dauerschallpegel besonders zu werten." Die Norm macht jedoch keine Aussagen, wie diese Wertung zu erfolgen hat.

5.2.2 Unsicherheit der Messketten

Fluglärmmessanlagen müssen den Anforderungen nach DIN EN 60'651 [8] für Schallpegelmesser der Klasse 1 genügen. In dieser Norm sind die Anforderungen bezüglich Linearität, Richtwirkung und Frequenzbewertung der Messanlagen definiert. Für eine typische Fluglärmmessung muss dabei mit einer (Standard-) Unsicherheit von 1 dB gerechnet werden.

5.2.3 Lokale Einflüsse

Bodenbeschaffenheit, reflektierende Flächen, Schalleinfallswinkel usw. beeinflussen die Messung und können lokale, kleinräumige Abweichungen bezüglich dem massgebenden, für ein repräsentatives Gebiet geltenden Schallpegel verursachen.

5.2.4 Abschätzung der Messunsicherheit

Unter Berücksichtigung der erwähnten Einflussfaktoren und aus Erfahrung kann die Unsicherheit der Messung mit rund 2 dB im Sinne einer Standardunsicherheit abgeschätzt werden.

Diese Abschätzung deckt sich in etwa mit der im Gutachten des TÜV [58] vorgenommenen Veranschlagung. Eine entsprechende Aussage hierzu findet sich in Kapitel 4: "... In der Praxis ist bei akustischen Feldmessungen mit Gesamtungenauigkeiten zwischen 2 und 2.5 dB(A) zu rechnen." Zu einer etwas geringeren Unsicherheit kommt dagegen deBAKOM in ihrem Gutachten zu den Schallimmissionsmessungen in Neu-Isenburg [13]. Unter 3.8.7 wird gefolgert "...dass in Summation aller möglichen Abweichungen die Messresultate eine mögliche Abweichung um ± 0.75 dB haben."

Bei den zitierten Aussagen geht jedoch nicht klar hervor, um welche Art Unsicherheit es sich dabei handelt. Da die Abschätzung der Messunsicherheit ein äusserst komplexes und selber mit grossen Unsicherheiten behaftetes Unterfangen ist, soll an dieser Stelle nicht weiter auf diese unterschiedlichen Beurteilungen eingegangen werden.

5.3 Vergleich der Messverfahren

Die von den drei Organisationen durchgeführten Messungen basieren alle auf den Vorschriften der Norm DIN 45'643. Dennoch unterscheiden sich die Messungen in verschiedener Hinsicht. Die wichtigsten Unterschiede betreffen die Messdauer, die Identifikation von Fluggeräuschen sowie die an den einzelnen Messstellen eingestellten Messschwellen.

5.3.1 Messdauer

Die Messstationen von Fraport und HLUG werden abgesehen von wenigen technisch bedingten Unterbrüchen während des ganzen Jahres betrieben. Im Gegensatz dazu waren die Messanlagen von deBAKOM an den verschiedenen Standorten nur während je 6 Wochen in Betrieb. Die örtliche Lärmbelastung in Frankfurt hängt stark von der momentanen Betriebsrichtung ab. Deshalb kann eine zeitlich begrenzte Messung, die eine Betriebsrichtungsverteilung berücksichtigt, welche nicht der Verteilung im Jahresmittel entspricht, zu einem von einer ganzjährigen Messung abweichenden Ergebnis führen. Die Auswertungen von deBAKOM zeigen jedoch, dass die Betriebsrichtungsverteilung während den Messperioden gut mit der langfristigen Verteilung übereinstimmen. Zudem weichen auch die Bewegungszahlen im Messzeitraum nicht mehr als 5% von den gemäss Fluglärmgesetz massgebenden verkehrsreichsten Monaten ab. Die daraus resultierende Unsicherheit kann somit mit weniger als 0.5 dB abgeschätzt werden.

5.3.2 Identifikation von Fluglärmereignissen

Bei den Fraport-Messungen werden die gemessenen Schallpegel mit Hilfe von genauen Zeitinformationen über den aktuellen Flugverkehr einzelnen Flugbewegungen direkt zugeordnet. Da die von deBAKOM und HLUG durchgeführten Messungen nicht mit den Flugplandaten gekoppelt sind, kann *keine* direkte Zuordnung zu einzelnen Flugbewegungen hergestellt werden. Bei den Messungen von HLUG erfolgt die Identifikation von Fluglärm bzw. die Unterscheidung zwischen Fluglärm und anderen Lärmeinwirkungen allein durch die Charakteristik der gemessenen Pegel-Zeit-Verläufe. Auf Grund einer vorgegebenen Mindesteinwirkzeit und des Überschreitens einer Triggerschwelle wird entschieden, ob die Charakteristik eines Fluglärmereignisses vorliegt [38].

Bei den Messungen durch deBAKOM erfolgt die Fluglärmerkennung mit einer automatischen Mustererkennung zur Unterscheidung und Identifikation verschiedener Geräuschquellen. Diese Mustererkennung basiert auf dem spektralen Pegel-Zeit-Verlauf von Fluglärmereignissen [12]. Die mit dieser Mustererkennung vorsortierten Ereignisse werden mit Hilfe der zusätzlich aufgezeichneten Pegelschriebe ergänzend manuell identifiziert [13].

Unabhängig von der ersten Auswertung erfolgt bei den Messungen durch deBAKOM eine zusätzliche Ermittlung des Fluglärms mit Hilfe einer spektralen Auswertung der Messdaten. Aus den kontinuierlich erfolgten Aufzeichnungen werden die sogenannten Perzentilspektren gebildet. (Unter dem Perzentilspektrum S_x wird das Frequenzspektrum derjenigen Messdaten verstanden, in denen der Pegel kleiner einem Pegel L_x war, wobei L_x der Pegel ist, der während x Prozent der Zeit überschritten ist [13].) Der Fluglärm wird durch Differenzbildung verschiedener Perzentilspektren ermittelt. Die mit dieser, nicht der DIN 45'643 entsprechenden Methode ermittelten Lärmbelastungen stimmen gut mit den aus den Pegel-Zeit-Verläufen ermittelten Werten überein. Die Abweichungen betragen in der Regel weniger als 1 dB.

5.3.3 Ereignisschwelle

Damit ein Schallereignis als Fluglärm identifiziert wird, müssen verschiedene Bedingungen erfüllt sein. Insbesondere muss der gemessene Maximalpegel einen vorbestimmten Mindestwert, die sogenannte Ereignisschwelle überschreiten. Dabei werden von den verschiedenen Organisationen unterschiedliche Schwellen angewandt. Bei den Fraport-Messungen werden nur Schallereignisse registriert, deren Maximalpegel 70 dB (tags) bzw. 65 dB (nachts) erreicht oder überschreitet (vgl. 3.1.8). Bei Messstellen mit

besonders ungünstigen Umgebungsbedingungen sind die Ereignisschwellen noch höher. Bei den Messungen von deBAKOM und HLUG werden dagegen wesentlich tiefere Ereignisschwellen verwendet.

deBAKOM: 55 - 60 dB
 HLUG: 60 - 63 dB²

Für die Messungen in der Region Neu-Isenburg wurden die in der Zeit vom 11.12. bis 15.12.2000 registrierten Messwerte im Detail untersucht. Während dieser Zeit herrschte Westbetrieb und gemäss der Bewegungsstatistik erfolgten 3170 Anflüge auf die Pisten 25L und 25R. Davon wurden von den verglichenen Messstationen folgende Fluglärmereignisse ausgewiesen:

Fraport	MP09	179	(6%)
deBAKOM	MP7	2058	(65%)
HLUG	Ni	1530	(48%)

Wegen den niedrigeren Ereignisschwellen und weil die Messorte von HLUG und deBAKOM weniger weit von den Anflugrouten auf die Pisten 25L und 25R entfernt sind, ist der Anteil der erfassten Lärmereignisse bei diesen Messungen wesentlich höher als bei der vergleichbaren Messstelle MP09 der Fraport. Während die Messstellen von deBAKOM und HLUG ca. die Hälfte der Landeanflüge akustisch erfassen, beträgt dieser Anteil bei den Messungen der Fraport lediglich 6%. Aus den Erläuterungen in Kapitel 3 ist zu entnehmen, dass MP09 in Neu-Isenburg eine Messstelle mit besonders geringem Anteil erfasster Überflüge ist. Der Vergleich dieser Messstelle mit den Messungen von deBAKOM und HLUG erfolgte auf Grund der geographischen Nähe.

Tabelle 5-1 zeigt eine Abschätzung der an den verschiedenen Messstellen in Neu-Isenburg zu erwartenden Maximalpegel auf Grund der Entfernung zu den Anflugrouten 25L und 25R auf der Basis der Quellendaten des Simulationsprogramms FLULA2. Die Tabelle zeigt, dass die Messschwelle der Fraport-Messstelle MP09 in Neu-Isenburg während des Tages über den erwarteten Maximalpegeln der meisten Flugzeuge liegt. Selbst die relativ lauten Grossraumflugzeuge MD11 und B7474 erreichen am Standort MP09 der Fraport den für die Erfassung erforderlichen Mindestpegel von 70 dB (tags) nicht. Auch die während der Nacht auf 65 dB abgesenkte Schwelle wird nur von den auf der näher vorbeiführenden Anflugroute 25L erreicht.

Die Schwellen der HLUG- und deBAKOM Messungen liegen dagegen deutlich unter den an den jeweiligen Stellen erwarteten Maximalpegel. Dementsprechend höher ist bei diesen Messstellen der Anteil der erfassten Flüge. Wegen den tiefen Ereignisschwellen und der fehlenden Korrelation zu einzelnen Flugbewegungen besteht bei diesen Messungen allerdings die Gefahr, dass vermehrt Fremdgeräusche dem Fluglärm zugerechnet werden.

Tabelle 5-1 Abschätzung der an verschiedenen Standorten erwarteten Maximalpegel für Landeanflüge auf die Pisten 25L und 25R nach Quellendaten FLULA2

Messpunkte		Mittlere Entfernung von Flugbahn [m]		Erwartete Maximalpegel L _{ASmax} [dB]							
		25L	25R	A320		B73S		MD11		B7474	
				25L	25R	25L	25R	25L	25R	25L	25R
Fraport	09	1052	1548	64.1	59.3	64.6	59.5	67.3	62.3	67.2	62.3
deBAKOM	2	662	1146	69.5	63.1	70.0	63.5	72.8	66.2	72.6	66.1
	4	610	1083	70.4	63.8	70.9	64.2	73.7	66.9	73.5	66.8
	7	737	1212	68.3	62.4	68.8	62.8	71.5	65.5	71.4	65.4
HLUG	Ni	608	1082	70.4	63.8	70.9	64.2	73.7	66.9	73.5	66.8

Die messtechnisch nicht erfassten Flugereignisse werden bei Fraport durch typenspezifische Standardpegel ersetzt. Dadurch soll gewährleistet werden, dass auch an den Messstellen, welche nur einen geringen Anteil aller vorbeifliegenden Flugzeuge erfassen, trotzdem ein realistischer Mittelungspegel ausgewiesen werden kann (vgl. Kap. 3.1.6).

² Unterschiedliche Schwellen an den verschiedenen Messstationen. Nur Schallereignisse, welche diesen Wert überschreiten werden messtechnisch erfasst. Bei der Auswertung der Daten zur Ermittlung der Mittelungspegel wird jedoch generell eine Ereignisschwelle von 65 dB angewandt. [38]

5.4 Vergleich der Messergebnisse

5.4.1 Vergleich der Einzelmesswerte

In der Beilage 6 sind die während der Woche vom 14. bis 21. Oktober 2000 in Neu-Isenburg an den einzelnen Messstellen ausgewiesenen Maximalpegel dargestellt. Deutlich erkennbar sind die eingestellten Ereignisschwellen an den einzelnen Messstationen sowie die während der Nacht abgesenkte Schwelle an MP09 der Fraport.

Vom 14. bis 15. Oktober 2000 herrschte Ostbetrieb mit Starts auf den Pisten 07L und 07R. Nur während dieser Periode wird am MP09 auch während des Tages eine nennenswerte Anzahl Überflüge registriert. An den darauf folgenden Tagen mit Westbetrieb werden an dieser Messstelle tagsüber praktisch keine Lärmereignisse mehr erfasst.

In Abbildung 2 von Beilage 6 ist eine detaillierte Darstellung der während zwei Stunden erfassten Lärmereignisse wiedergegeben. Einzelne Pegelmuster wiederholen sich darauf häufig und es kann angenommen werden, dass sich diese Messungen jeweils auf dasselbe Lärmereignis beziehen. Auf die fast gleichzeitig erfolgte Messung an der Messstelle Fraport MP09 deBAKOM MP2 und HLUg MP Ni folgt mit einer Verzögerung von ca. 2 Minuten eine Messung an der Messstelle deBAKOM MP 04. Da die ausgewiesene Ereigniszeit bei deBAKOM und HLUg nur auf der Grundlage der Systemzeit der betreffenden Messanlagen ermittelt wird, welche nicht ausdrücklich mit der genauen Zeit synchronisiert wurde, ist ein zeitlicher Versatz der einzelnen Messereignisse um wenige Minuten möglich.

Ein Vergleich der auf diese Weise manuell zugeordneten Messergebnisse zeigt, dass die an den deBAKOM Messstellen MP2 und MP4 gemessenen Maximalpegel im Durchschnitt um 4 dB bzw. um 7 dB höher ausfallen als die an der Messstelle MP09 der Fraport ausgewiesenen Pegel, die Maximalpegel an der Messstelle der HLUg liegen um 5 dB über denen der Fraport.

Auf Grund der unterschiedlichen Lage der Messstellen und damit der unterschiedlichen Distanzen zu den einzelnen Flugbahnen werden für die Standorte der Messstellen der deBAKOM und der HLUg im Vergleich zu MP09 der Fraport um bis zu 6 dB erhöhte Pegel erwartet (vgl. Tabelle 5-1). Der Vergleich der gemessenen Pegel zeigt, dass selbst an den nur wenige Meter auseinander liegenden Standorten der Messstellen von deBAKOM und HLUg unterschiedliche Maximalpegel gemessen werden. Diese Differenzen sind nicht bloss auf die unterschiedliche Entfernung zur betreffenden Abflugroute zurückzuführen, sondern müssen durch lokale Effekte (Reflexionen, Bodeneffekt usw.) verursacht sein.

Weil die Zuordnung der einzelnen Lärmereignisse nur durch einen aufwändigen, visuellen Vergleich der als Funktion der Zeit dargestellten Pegel mit Hilfe der (unsicheren) Ereigniszeit hergestellt werden konnte, wurde keine weitergehende Auswertung der Einzelmesswerte vorgenommen.

5.4.2 Vergleich der Mittelungspegel

Da die Standorte der von den verschiedenen Stellen betriebenen Messstationen nicht identisch sind, ist ein direkter Vergleich der ausgewiesenen Mittelungspegel nicht sinnvoll. Für den Vergleich werden die Mittelungspegel deshalb mit Hilfe der an den einzelnen Messstellen berechneten Pegel bezüglich der unterschiedlichen Standorte umgerechnet. Diese Umrechnung basiert auf der an der EMPA durchgeführten Lärmsimulation mit FLULA2 (vgl. Kapitel 6.4). Dazu wird die Differenz der berechneten Lärmbelastung an den verschiedenen Standorten ermittelt. Mit Hilfe dieser Differenzen können die an einzelnen Messstellen ausgewiesenen Lärmbelastungen auf den Standort der zu vergleichenden Messstelle umgerechnet werden. Diese Umrechnung wird an dem in Abbildung 5-2 dargestellten Beispiel illustriert. Für das Jahr 2000 wurde von Fraport an der Messstelle 09 (Neu-Isenburg Rathaus) ein Mittelungspegel $L_{eq}(4)$ von 56 dB ausgewiesen. An der nur wenige hundert Meter entfernten Messstelle Nr. 7 der deBAKOM wurden dagegen 59.4 dB gemessen. Die Differenz der auf Grund der Berechnung an den beiden Standorten erwarteten Lärmbelastung beträgt 2.7 dB. Mit dieser Differenz ergibt sich der auf den Standort der Fraport umgerechnete Pegel von 56.7 dB.

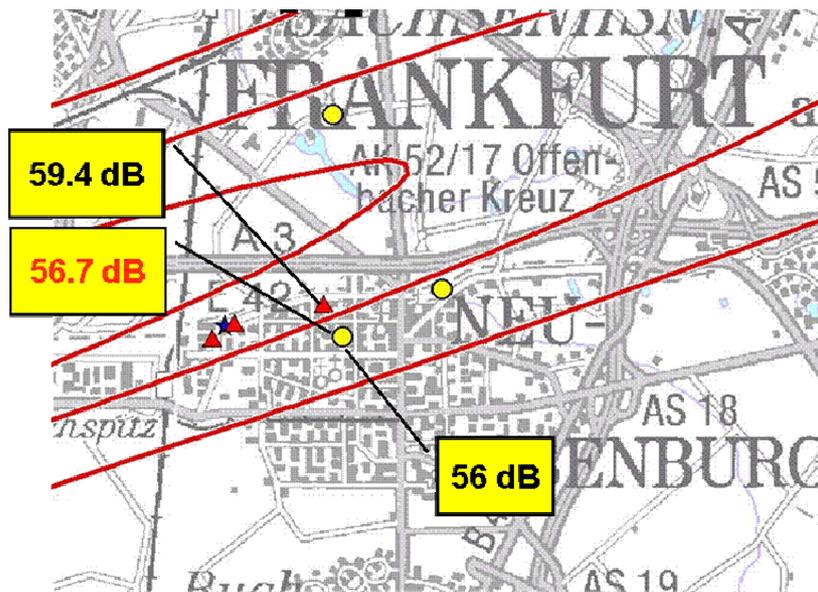


Abbildung 5-2 Illustration der Umrechnung der ausgewiesenen Lärmbelastung auf den Standort der Fraport-Messstelle. Der Abstand der eingezeichneten Lärmkonturen beträgt 5 dB.

In Tabelle 5-2 sind sowohl die an den einzelnen Messstellen ausgewiesenen mittleren Dauerschallpegel $Leq(4)$ als auch die mit Hilfe der Lärmberechnung auf den Standort der betreffenden Fraport-Messung umgerechneten Pegel angegeben. Obwohl die verglichenen Messorte relativ nahe beieinander liegen, sind die zwischen den verschiedenen Standorten zu erwartenden Differenzen der Mittelungspegel beträchtlich. Sie betragen bis zu 4.8 dB. Werden diese auf Grund der Standorte erwarteten Differenzen berücksichtigt, dann reduzieren sich die Abweichungen zwischen den von den verschiedenen Organisationen ausgewiesenen Pegel mit Ausnahme der Messungen in Zeppelinheim (siehe unten) auf weniger als 2 dB.

Tabelle 5-2 Von verschiedenen Stellen ermittelte Dauerschallpegel für das Jahr 2000. Angegeben sind die an den Messstellen ausgewiesenen Dauerschallpegel $Leq(4)_{FLG}$ nach DIN 45'643 (L_0 und L), die auf den Standort der Fraportmessung umgerechneten Werte (L^*) und deren Abweichung zu den Fraportmessungen (dL).

Ort	Fraport		deBAKOM					HLUG				
	MP	L_0	MP	L	Δ	L^*	dL	MP	L	Δ	L^*	dL
Zeppelinheim	03	49	1	56.3	2.5	53.8	4.8					
			5	58.6	4.8	53.8	4.8					
			6	54.2	0.1	54.1	5.1					
Raunheim	06	59						Ra	55.5	-2.7	58.2	-0.8
Neu-Isenburg	09	56	2	59.5	3.4	56.1	0.1					
			4	61.8	3.9	57.9	1.9					
			7	59.4	2.7	56.7	0.7					
Klein-Gerau	52	56	Keine Messung					Kg	57.5	0.4	57.1	1.1

Legende zu Tabelle 5-2

- MP Messpunkt
- L_0 Am Messpunkt der Fraport ausgewiesener Mittelungspegel
- L Am Messpunkt der zu vergleichenden Messstation ausgewiesener Mittelungspegel
- Δ Erwartete Pegeldifferenz zwischen Messpunkt und Referenzort
- L^* = $L - \Delta$; mit Δ auf den Referenzort umgerechneter Mittelungspegel
- dL = $L^* - L_0$; Differenz zwischen korrigiertem Messwert und Referenzwert

Die verbleibenden Differenzen von + 0.1 bis + 1.9 dB bei den Messungen von deBAKOM und Fraport in Neu-Isenburg weisen auf eine geringfügige systematische Abweichung hin, die von deBAKOM ausgewiesenen Pegel sind generell lauter. Die Differenz wird jedoch unter Berücksichtigung der erwarteten Messunsicherheit von 2 dB als nicht signifikant angesehen (vgl. Kapitel 5.2.4). Sowohl positive wie auch negative Abweichungen von derselben Grössenordnung werden zwischen den Messungen von HLUg und Fraport beobachtet.

Der grösste Teil der beobachteten Differenzen zwischen den Messungen von deBAKOM und HLUg zu den Messungen von Fraport ist auf die unterschiedlichen Standorte der Messstationen zurückzuführen.

Grössere Abweichungen werden dagegen für die verschiedenen Messungen in Zeppelinheim gefunden. Auch die bezüglich Standort korrigierten Messungen von deBAKOM liegen ca. 5 dB über den von Fraport ausgewiesenen Werten. Wie in Kapitel 3 diskutiert, werden vom Messpunkt 03 in Zeppelinheim nur eine äusserst geringe Anzahl Flugereignisse akustisch erfasst. Auf der anderen Seite enthalten die deBAKOM-Messungen neben reinem Fluglärm auch Bodenlärm.

Die Unterschiede zwischen den in Zeppelinheim an den deBAKOM Messstellen ausgewiesenen Mittelungspegeln und den von Fraport ausgewiesenen Pegeln sind somit auf die nur unvollständige Erfassung des Fluglärms an der Messstelle MP03 von Fraport und auf die zusätzliche Berücksichtigung von Bodenlärm bei den deBAKOM-Messungen zurückzuführen.

5.5 Fazit

Die von deBAKOM, HLUg und Fraport für das Betriebsjahr 2000 ausgewiesenen Mittelungspegel stimmen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Standorte innerhalb der zu erwartenden Messunsicherheit von 2 dB mehrheitlich überein. Einzig die Messergebnisse in Zeppelinheim weisen signifikante Unterschiede auf, welche auf die nur unvollständige Erfassung des Fluglärms an der Messstelle MP3 von Fraport und auf die zusätzliche Berücksichtigung von Bodenlärm bei den deBAKOM-Messungen zurückzuführen sind.

6 Fluglärmrechnungen

6.1 Fluglärmmodelle

6.1.1 Berechnen statt messen

Die Fluglärmbelastung in der Umgebung von Flugverkehrsanlagen wird in allen uns bekannten Ländern rechnerisch ermittelt. Der Grund dieser Konvention liegt in der erheblichen Flächenwirkung des Fluglärms. Meist sind mehrere Hundert Quadratkilometer betroffen. Eine flächendeckende Erfassung des Fluglärms durch Messungen ist wegen des hohen personellen und materiellen Aufwands aus rein praktischen und ökonomischen Überlegungen unrealistisch. Messungen eignen sich aber unter Umständen zur Validierung von Berechnungsverfahren oder zur Beschreibung der Schallabstrahlung von Flugzeugen, wie sie in Berechnungsmodellen verwendet werden.

Aus historischen Gründen verwenden einzelne Länder ihre oft gesetzlich verankerten Fluglärmmasse und das dazu „passende“ Berechnungsverfahren (vgl. Kapitel 2). Die internationale Harmonisierung tendiert heute auf Fluglärmmasse, die auf dem A-bewerteten L_{eq3} basieren. Nicht zuletzt im Hinblick auf die Harmonisierung in der EU ist die Arbeitsgruppe der Europäischen, zivilen Luftfahrtorganisation (ECAC) daran, die Richtlinie DOC.29 zur Berechnung von Fluglärm zu revidieren. Gleichzeitig ist auch die Gruppe SAE-A21 daran, die für das Programm "INM" (Integrated Noise Model) verwendeten Dokumente SAE 1845 [54] und SAE 1751 [53] zur Berechnung von Fluglärm zu überarbeiten.

6.1.2 Die verschiedenen Berechnungsverfahren für Fluglärm

Ein Fluglärmrechnungsverfahren setzt sich aus einer Berechnungsvorschrift sowie einer Datenbasis zusammen. Die Berechnungsvorschrift berücksichtigt die Modellierung des Flugzeugs als Schallquelle sowie die physikalischen Gesetzmässigkeiten bei der Schallausbreitung. In der Datenbasis sind flugtechnische und akustische Daten abgelegt. Art und Umfang der Datenbasis werden durch die Berechnungsvorschriften bestimmt und definiert.

Die Entwicklung der Berechnungsverfahren spiegelt die in den vergangenen 30 Jahren zunehmend verfügbare Rechenleistung. Die einfachen Verfahren basieren auf einer Reihe von Vereinfachungen, welche je nach Lage der Empfangspunkte einen erheblichen Einfluss auf die Genauigkeit der berechneten Immissionspegel haben. Man kann vier Generationen von Modellen unterscheiden:

CPA - Modelle (CPA = Closest Point of Approach)

Diese einfachsten Modelle berechnen die Belastung an einem Empfangsort aus dem L_{ASmax} -Pegel vom Punkt mit der kürzesten Entfernung zum Empfänger (CPA). Als Verfeinerung können noch Korrekturen, beispielsweise für den Kurvenflug, hinzugefügt werden. Die Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen an zivilen und militärischen Flugplätzen AzB nach dem deutschen Fluglärmgesetz [2] gehört in diese Kategorie.

Integrierte Modelle für den SEL

Hier stehen die Lärmdaten zu Verfügung von geraden Überflügen in normierten Distanzen und für definierte Triebwerksleistungen (NPD = Noise - Power - Distance Tabellen). Normalerweise wird der über den ganzen Vorbeiflug integrierte SEL-Wert angegeben. (Deshalb die Bezeichnung "integriert"). Mit diversen Korrekturen wird die Lärmbelastung beim Empfänger angepasst (Kurvenflug, seitliche Dämpfung, Geschwindigkeit)

Segmentierte Modelle

Diese stellen eine Verfeinerung der Integrierten Modelle dar, indem die Flugbahn in diverse Segmente unterteilt wird. Damit kann die Reduktion der Triebwerksleistung nach der ersten Startphase und der Kurvenflug besser modelliert werden. Sie verwenden die selben NPD- Werte wie die Integrierten Modelle. Das "Integrated Noise Model" INM der amerikanischen Luftfahrtbehörde FAA [19] ist der prominenteste Vertreter dieser Art, aber auch ANCON2 (England), DANSIM (Dänemark), NORTIM (Norwegen) und Noisemap (US-Air Force), sowie der Entwurf für die revidierte DOC.29R basieren auf Segmentierung.

Simulationsverfahren

Simulationsverfahren verwenden eine Beschreibung, wie das Flugzeug den Schall in verschiedene Richtungen abstrahlt (Pegel, Spektrum). Für die Berechnung wird diese Quelle nacheinander an diskrete Orte entlang der Flugbahn positioniert und die Schallausbreitung zum Empfangspunkt berechnet. Die Aneinanderreihung dieser Einzelberechnungen erzeugt beim Empfänger einen Pegel-Zeitverlauf analog zur wirklichen Situation. (Daher der Name Simulation). Da der Pegel-Zeitverlauf erzeugt wird, können mit dem Simulationsverfahren alle Beurteilungsmasse berechnet werden, die auch mit einer Messung im Felde bestimmt werden können. Die Simulationsverfahren benötigen eine detailliertere Quellenbeschreibung als die über den ganzen Vorbeiflug integrierten NPD-Daten. Für die Anwendung von FLULA hat die EMPA diese Daten in Zürich gemessen und setzt das Simulationsverfahren in der Schweiz für Berechnungen ein [49, 57]. Weitere Simulationsmodelle sind z.B. das Rotorcraft Noise Model RNM (entwickelt von der NASA, zu dem aber die Quelldaten fehlen), und das CANAM (Dep. of Defence, Kanada), das sowohl als integriertes Modell die grossflächige Lärmbelastung berechnet als auch im Simulationsmodus Detailabklärungen erlaubt.

Die Grenze zwischen segmentierten Modellen und Simulationsmodellen ist fließend, wenn die Segmentlänge klein wird. Die Programme NMSIM (Wyle, USA) und Sonderversionen von DANSIM und NORTIM wurden im NATO/CCMS - Projekt "Einfluss der Topographie - Narvik Messungen" [47] für Simulationen "umgebaut" und verwendet.

6.2 Genauigkeit von Berechnungen

6.2.1 Grundbegriffe

Unabhängig davon, wie sorgfältig Berechnungen oder Messungen durchgeführt werden, sie sind mit unvermeidlichen Unsicherheiten behaftet. Mit geeigneten (und oft aufwändigen) Massnahmen versucht man diese Unsicherheiten möglichst klein zu halten, einen zuverlässigen Schätzwert für ihre Grösse angeben zu können und klar erkannte Einflüsse zu kompensieren.

Das Gebiet der Abschätzung von Unsicherheiten hat viele Aspekte. Zur Verständigung folgen hier drei Definitionen nach dem Internationalen Wörterbuch der Metrologie [11]:

(Mess-) Genauigkeit

Ausmass der Übereinstimmung zwischen dem Messergebnis und einem wahren Wert der Messgrösse. "Genauigkeit" ist ein qualitativer Begriff.

(Mess-) Unsicherheit

Dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgrösse zugeordnet werden könnte.

Einflussgrösse

Grösse, die nicht Messgrösse ist, jedoch das Messergebnis beeinflusst.

Die resultierende Unsicherheit eines Resultats setzt sich zusammen aus verschiedenen Einflussgrößen. Bei der Messung können dies sein: Messunsicherheiten des Schallpegelmessers (Kalibration, Frequenzgang des Mikrofons, etc.), oder (von der Normsituation abweichende) Reflexionen beim Messort. Bei der Berechnung können dies sein: Unsicherheiten in der Beschreibung der Flugbahnen (und damit des Abstandes der Quelle vom Empfänger) oder Unsicherheiten in der Annahme über die vom Piloten gewählte Triebwerksleistung, etc.

Für unsere Betrachtungen setzen wir voraus, dass all diese Unsicherheiten unkorreliert sind und durch Standardabweichungen s_i in dB beschrieben werden können. In dem Falle gilt nach Probst/Donner [50] die quadratische Addition für die resultierende Unsicherheit s_{tot} :

$$s_{\text{tot}} = \sqrt{\sum s_i^2}$$

Absolute und relative Unsicherheiten

Der resultierende Pegel einer Berechnung setzt sich zusammen aus dem Quellenwert, der Dämpfungen durch Distanz und Luftabsorption und dem Einfluss von Bodeneffekten. Für die Schallbelastung muss zusätzlich die Anzahl Flüge pro Zeiteinheit bekannt sein. Für den Vergleich mit Messungen oder für die Berechnung der Schallbelastung wird der absolute Pegel betrachtet und folglich müssen die Unsicherheiten von allen Einflussgrößen berücksichtigt werden. Wir bezeichnen dies als absolute Unsicherheit. Beispiele von Unsicherheiten, die in der Gesamtberechnung zusätzlich zum Tragen kommen, sind die Modellierung eines Flugzeugtyps mit einem unzutreffenden Triebwerkstyp oder die ungenaue Modellierung der Steigprofile. Bei einer Messung können sich zusätzliche Ungenauigkeiten ergeben durch lokale Reflexionsverhältnisse der einfallenden Schallwelle, z.B. harter Untergrund statt Gras oder kleine Schalleinfallswinkel.

Zur Beantwortung der Frage nach Veränderungen einer Schallbelastung auf Grund geänderter Vorgaben wie Verkehrszusammensetzung, Verkehrsaufkommen, Streckenführung etc. werden zwei verschiedene Berechnungen miteinander verglichen, d.h. es geht um die Pegeldifferenzen. Hier sind nur die Unsicherheiten massgebend, welche die Änderungen in den Berechnungen betreffen. Wir bezeichnen dies mit relativer Unsicherheit. Die Einflüsse des Berechnungsverfahrens wirken sich hier in der Regel nur unwesentlich aus. Massgeblichen Einfluss hat demgegenüber die Qualität der Datenbasis. Da beispielsweise bei vergleichenden Untersuchungen oft Änderungen des Typenmixes zu berücksichtigen sind, müssen die akustischen Eigenschaften der unterschiedlichen Flugzeugmuster relativ zueinander gut dargestellt sein.

6.2.2 Faktoren, welche die Genauigkeit von Fluglärmrechnungen beeinflussen

Es sind grundsätzlich drei Themenkreise zu unterscheiden:

- Einflüsse des verwendeten akustischen Modells
- Der reale Flughafenbetrieb muss abgebildet werden auf die Eingabedaten für die Berechnung. Je nach der Art, wie diese Umsetzung erfolgt, ergeben sich verschiedene Einflüsse.
- Beim Vergleich von Messungen mit Berechnungen sind auch die Ungenauigkeiten der Messung zu berücksichtigen.

Einflüsse des akustischen Modells

Einflüsse des Modells betreffen Fragen der akustischen Modellierung (CPA-Modell, Segmentierung, Simulation), Annahmen über Luftdämpfungen und typische Temperaturen und der Beschreibung der Quellenstärken. Bei der AzB kommt als zusätzlicher Faktor die Modellierung der Ereignisdauer t_{10} dazu. Diese Effekte können im Prinzip durch eine entsprechende Verfeinerung des Modells und des Berechnungsvorgangs reduziert werden.

Variationen in Berechnungsverfahren

Im Rahmen der Revision des "Circular 205" der ICAO [39], das Grundzüge zu Berechnungsmodellen für Fluglärm spezifiziert, hat die Arbeitsgruppe ICAO/CAEP/WG2/Model1 vor einigen Jahren Vergleichsberechnungen mit diversen nationalen Programmen durchgeführt [40]. Es zeigten sich sowohl Differenzen in der Grössenordnung von Dezibeln auf Grund der verschiedenen Modellarchitekturen und der dazugehörigen akustischen Datenbasen, wie auch auf Grund individueller, divergierender geometrischer Umsetzungen der Berechnungsaufgabe (z.B. unterschiedliche Annahmen für die Steigprofile). Diese Erkenntnisse fliessen in die aktuelle Revision der europäischen Anleitung ECAC DOC.29 [20] ein.

Variationen in den Quelldaten

Die Beschreibung der Schallabstrahlung von Flugzeugen bei unterschiedlichen Betriebszuständen (Start, Steigflug, Landung, ...) ist komplex. Zusätzlich werden für die Berechnung oft verschiedene Flugzeuge zu Gruppen zusammengefasst und für die Lärmsituation weniger wichtige Flugzeugtypen werden oft einem in der Rechnung verwendeten Typ zugeordnet (Substitution). Schliesslich kann das selbe Flugzeug mit unterschiedlich lauten Triebwerken ausgerüstet sein. Bei der AzB stellt sich beispielsweise das Problem, dass für gesetzlich reglementierte Berechnungen nicht die neusten verfügbaren Daten verwendet werden dürfen. In der von der FAA (Federal Aviation Administration, USA) unterhaltenen Datenbank zum Programm INM wurden erst im vergangenen Jahr die Daten für Airbus Flugzeuge auf den aktuellen Stand gebracht (INM, Version 6.0c), während z.B. die akustischen Daten für die MD83 im INM immer noch sehr optimistisch leise sind. Die Datenbank von FLULA basiert auf flugplatznahen Messungen, die im Vergleich mit anderen Quelldaten eher die Tendenz zu lauterem Pegeln haben.

Obwohl es nur eine Wirklichkeit gibt, sieht man aus den Beispielen, dass die Abbildung dieser Wirklichkeit in die berechnete Lärmbelastung mit diversen Unsicherheiten behaftet ist.

Einflüsse der Flughafen-Modellierung

Die Abbildung des Flughafenbetriebs in die Eingabedaten für die Berechnungen ergibt Einflüsse auf die Berechnung, die auf Grund unzureichender Eingabedaten entstehen. Hierzu gehören unzutreffende Annahmen beim Flottenmix und der Anzahl Flugbewegungen, Abweichungen bei den angenommenen Flugrouten und Flugbahnen von den realen, aber grundsätzlich unbekanntem Flugbahnen, Unterschiede bei der individuellen Leistungssetzung und Konfiguration der verschiedenen Flugzeuge usw. Diese Einflussgrössen liegen ausserhalb des eigentlichen Berechnungsvorgangs und können dementsprechend reduziert werden, je sorgfältiger und genauer die der Berechnung zu Grunde liegenden Eingabedaten erhoben werden. Oft scheitert dieses Unterfangen jedoch an der Verfügbarkeit entsprechender Daten.

Variation in der Flugbahnmodellierung / "track dispersion"

Für die Berechnungen mit FLULA wurde die Methode der Einzelflugsimulation verwendet, wo auf Grund von statistisch ausgewählten Radar-Flugbahnen viele individuelle Belastungen berechnet wurden, die dann zur resultierenden Lärmbelastung aufsummiert werden. Die übliche Methode, die auch in der AzB verwendet wird, definiert zuerst einige (idealisierte) Flugbahnen und verwendet dann diese für die Berechnungen. Als die Methode der "Einzelflugsimulation" vor 6 Jahren an der EMPA eingeführt wurde, ergab der Vergleich der Lärmbelastungen mit beiden Methoden im Mittel Abweichungen von etwa 0.8 dB, wobei wegen der sehr breiten Streuung der Flugwege im Kurvenbereich die Abweichungen dort bis zu 2 dB betragen. Die Ergebnisse wurden 1999 in "Track dispersion..." [3] vorgestellt.

Abstände / Topographie

Die Unsicherheit der Berechnung hängt nicht davon ab, wie weit das Flugzeug vom Flughafen entfernt ist, sondern wie gross die Distanz zwischen Flugzeug und Empfangsort ist und wie genau diese Distanz ermittelt werden kann. Zur genauen Ermittlung der effektiven Distanz zwischen Quelle und Empfänger spielt es in hügeligem Gelände eine wesentliche Rolle, ob in den Berechnungen die Topografie berücksichtigt wird oder nicht. Der Einbezug der Topografie ist unter Verwendung von digitalen Geländemodellen ohne weiteres möglich und wird beispielsweise im Simulationsprogramm FLULA2

standardmässig berücksichtigt. Damit wird sichergestellt, dass die effektive Distanz zwischen Schallquelle und Empfänger in die Lärmberechnung einfließt. Unberücksichtigt bleiben dagegen Einflüsse als Folge von Abschirmungen oder Reflexionen.

Der Immissionspegel nimmt mit zunehmender Entfernung zwischen Schallquelle und Immissionspunkt ab. Als Näherung kann folgender Zusammenhang angenommen werden:

$$L_{\max} = L_0 - 20 \lg (r/r_0)$$
$$L_{AE} = L_{AE0} - 10 \lg (r/r_0)$$

mit:

L_{\max} : Maximalpegel in der Entfernung r
 L_{AE} : Ereignispegel in der Entfernung r
 L_0 : Maximalpegel in der Entfernung r_0
 L_{AE0} : Ereignispegel in der Entfernung r_0

Um den Einfluss der Topografie auf die resultierende Lärmbelastung abzuschätzen, muss die Geländeerhöhung mit der Flughöhe in Bezug gesetzt werden. Direkt unter der Flugbahn reduziert sich die Entfernung zwischen Flugzeug und Immissionsort um den Betrag der Geländehöhe. Innerhalb der 55 dB Kurve (Leq(4)_FLG, vgl. Kap. 6.4) ist das Gelände in der Umgebung des Flughafens Frankfurt/Main relativ flach, innerhalb diesem Gebiet gibt es keine Geländeerhöhungen von mehr als 50 Meter. Entsprechend gering sind die Auswirkungen auf die resultierende Lärmbelastung. Bei einer Flughöhe von 500 Metern, welche auch von schweren Flugzeuge nach wenigen Kilometern erreicht wird, kann die Auswirkung auf den Mittelungspegel nach obiger Näherung auf weniger als 0.5 dB abgeschätzt werden.

Grössere Geländeerhöhungen befinden sich dagegen nordwestlich vom Flughafen. Unterhalb der Abflug-routen 25L10 und 25R10 betragen diese bis knapp 600 m ü.M. (z.B. Hohe Kanzel: 592 m). Die Flugdistanz ab Startpunkt beträgt an dieser Stelle ca. 30 km. Schwere Flugzeuge erreichen nach dieser Distanz eine Höhe von 1500 bis 2000 Meter über Piste (B7474 auf Route 25R10). Für eine minimale Flughöhe von 1600 m ü. M. (1500 m über Piste, Pistenniveau 100 m ü. M.) kann der Einfluss der Topografie gemäss der obigen Näherungsformel mit

$$dL = 20 \lg \left(\frac{1500}{1600 - 600} \right) = 3.5 \text{ dB} \quad \text{für den Maximalpegel } L_{\max}$$

und mit

$$dL = 10 \lg \left(\frac{1500}{1600 - 600} \right) = 1.8 \text{ dB} \quad \text{für den Ereignispegel } L_{AE}$$

abgeschätzt werden.

6.2.3 Vergleich von Berechnungen mit Messungen

Um den Einwohnern rund um den Flughafen das Vertrauen in Berechnungen (statt Messungen) vermitteln zu können, muss nachgewiesen werden, dass die Fluglärm-berechnung die Realität im Rahmen von gewissen Unsicherheiten richtig wiedergibt. Dies kann durch den stichprobenhaften Vergleich der grossflächigen Berechnungen mit den Ergebnissen von Messungen an diskreten Messorten nachgewiesen werden. Dabei sind die diskutierten Themenkreise Berechnungsmodell, Flughafen-Modellierung und Messunsicherheiten zu beachten.

Validierung

Die Eignung des Modells für die Berechnung wird bei der Validierung untersucht. Hier geht es um den Nachweis, dass für klar definierte Einzelsituationen das Programm fähig ist, die Messwerte an einem kontrollierten Mikrofonstandort zu reproduzieren. Bei diesem Vergleich müssen sowohl die Unsicherheiten der Messung und die Unsicherheiten der Berechnung berücksichtigt werden.

Jahresbelastungen

Beim Vergleich einer Gesamtbelastung eines Flughafens zwischen Messung und Berechnung ist zusätzlich noch die Flughafen-Modellierung (Gruppenbildung von Flugzeugtypen, mittlere Profile/track dispersion, mittlere Triebwerksleistung, etc.) sowie der Einfluss von Wind und Temperatur auf die Messungen zu beachten. Wenn möglich sollten kontrollierte Messungen (d.h. mit Überwachung durch eine am Messort anwesende Person) benutzt werden. Automatische Messungen an Monitoringstationen sind für die Validierung von Berechnungen nur schlecht geeignet, vor allem, wenn sie sich in urbanem Gebiet befinden. Falls dennoch automatische Messungen zur Validierung von Berechnungen benutzt werden, sollten die Anlagen in offenem Gelände stehen und unbeeinflusst von Fremdgeräuschen und Hindernissen sein.

6.2.4 Grössenordnung der Genauigkeit von Fluglärmrechnungen

Die resultierende Genauigkeit hängt von sehr vielen Faktoren ab, deren Beiträge oft nicht einzeln identifiziert werden können. Deshalb ist es schwierig, generelle Angaben zur Genauigkeit zu machen. Die nachfolgenden Angaben beruhen auf Erfahrungswerten. Einzelne Punkte werden noch in den nachfolgenden Kapiteln beim Vergleich Berechnung / Messung und bei der Diskussion über den Einfluss des Wetters vertieft.

In der Untersuchung "Bewertung und Berechnung von Fluglärm" [42] vergleicht Isermann/Schmid gemessene und mit dem AzB-Verfahren berechnete Werte für die Messstellen des Flughafens Frankfurt und kommt zum Schluss, dass die globale Unsicherheit 1 bis 2 dB betrage. Dabei handelt es sich um eine für das gesamte Umfeld eines Flughafens gemittelte Unsicherheit. Lokal kann die absolute Unsicherheit durchaus Werte über 4 dB annehmen.

Nach Abwägung der Einflüsse kommen wir im Kapitel 6.5 zu folgender Aussage:

"Unter der Voraussetzung, dass die Quelldaten hinreichend auf den lokalen Flottenmix abgestimmt sind, kann für Frankfurt die verbleibende Unsicherheit (im Sinne einer Standardunsicherheit) auf dem Niveau von 60 dB (Mittelungspegel L_{eq4}) mit 1.5 dB, von 55 dB mit 2 dB und auf dem Niveau von 50 dB mit rund 3 dB abgeschätzt werden."

Sensitivität der Lärmkarten

Die auf den Karten dargestellten Lärmbelastungskurven reagieren sehr empfindlich auf kleine Veränderungen der Belastung. Wenn sich z.B. im Gebiet der L_{eq} Belastungskurven von 55 bis 60 dB die Belastung um nur ein dB verändert, so hat dies auf der Lärmkarte eine gut sichtbare Verschiebung der Kurve zur Folge und die von der Kurve eingeschlossene Fläche verändert sich um etwa 20 %.

6.3 Fluglärmrechnungen nach AzB

6.3.1 Vergleich der Berechnungen von HLUg und DLR

Im Rahmen verschiedener Gutachten wurden von DLR und HLUg Lärmbelastungen für aktuelle und zukünftige Betriebsvarianten des Flughafens Frankfurt ermittelt. Diese Berechnungen wurden nach den Vorschriften der AzB ausgeführt. Hier gilt es zu beachten, dass nach der gültigen Fassung der AzB eine veraltete, nicht mehr dem aktuellen Stand der heutigen Flugzeugflotten entsprechende Flugzeuggruppeneinteilung verwendet wird (AzB/84). Derartige Berechnungen wurden von DLR bloss der Vollständigkeit halber ausgeführt mit dem Hinweis, dass die Ergebnisse für eine objektive Beurteilung der Lärmimmissionen nicht verwendet werden dürfen [17]. Daneben wurden Berechnungen mit einer aktualisierten, aber noch nicht offiziell in Kraft gesetzten Flugzeuggruppeneinteilung AzB/99 durchgeführt.

Die nachfolgende Diskussion bezieht sich nur auf die mit den neuen, die reale Lärmimmission besser reproduzierenden Quelldaten für die Flugzeuggruppeneinteilung AzB/99.

Neben Prognosen für zukünftige Betriebsvarianten liegen mehrere Berechnungen für das Betriebsjahr 2000 vor. Diese Berechnungen unterscheiden sich bezüglich der verwendeten Lärmmasse (Leq(3), Leq(4), NATx), der verwendeten Quelldaten (AzB/84, AzB/99), der Tageszeit (Tag, Nacht, Tag&Nacht gewichtet nach AzB) und den massgebenden Bewegungszahlen (Prognosen, effektive Bewegungszahlen, effektive, bzw. standardisierte Betriebsrichtungen und Routenverteilungen). Obwohl sich alle diese Berechnungen auf den selben Betriebszustand und somit auf die selbe Lärmbelastung beziehen, fallen die ausgewiesenen Lärmkurven je nach Lärmmasse, Berechnungsverfahren und Betriebsdaten entsprechend unterschiedlich aus. Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die vorliegenden Berechnungen.

Tabelle 6-1 Übersicht über verschiedene Fluglärmrechnungen nach AzB für das Betriebsjahr 2000

Ersteller	Betriebszustand	Bew. 6 Mte	Ref.	Tageszeit	Betriebsrichtungsverteilung					
					Ist- bzw. standardisierte Betriebsrichtungsverteilung			100% Ost- und 100% Westbetrieb		
					Leq(3)	Leq(4)	NATx	Leq(3)	Leq(4)	NATx
HLUG ⁽¹⁾	Ist 2000 realverteilt	240217	[36]	T N T/N	x* x* x*	x* x* x*				
DLR ⁽²⁾	Prognose 2000	242490	[17]	T N T/N	x x		x	x		x
DLR ⁽²⁾	Ist 2000 stand. Betriebsrichtung	240217	[24]	T N T/N	x x		x	x		x
DLR ⁽¹⁾	Ist 2000 realverteilt	240217	[18]	T N T/N	x* x*			x*		x*

Legende zu Tabelle 6-1:

- ⁽¹⁾ Berechnungen nur nach AzB/99
- ⁽²⁾ Berechnungen nach AzB/84 und nach AzB/99
- * Berechnungen liegen digital vor

Die Berechnungen von HLUg wurden sowohl mit dem Halbierungsparameter q=4 nach AzB wie auch als energieäquivalente Dauerschallpegel mit q=3 in Anlehnung an die AzB ausgeführt. Die Berechnungen von DLR wurden ausschliesslich mit dem Halbierungsparameter q=3 durchgeführt. In den verschiedenen Gutachten werden also Berechnungen zu unterschiedlichen Lärmmassen für verschiedene Betriebszustände und Tageszeiten ausgewiesen. Zudem werden in den Berichten auch Niveaueurven zu verschiedenen Belastungswerten dargestellt. Ein direkter Vergleich der ausgewiesenen Lärmkurven ist daher oft nicht möglich bzw. nicht sinnvoll. Die in Tabelle 6-1 mit * bezeichneten Daten wurden dem Gutachter in elektronischer Form zur Verfügung gestellt und konnten daher direkt verglichen werden. Die

restlichen Daten liegen in Papierform vor und wurden durch einen visuellen Vergleich begutachtet. Eine Darstellung der verglichenen, auf digitalen Daten basierenden Lärmbelastungen ist auf einer Übersichtskarten in der Beilage zu diesem Bericht zu finden.

Karte 1 : Vergleich berechneter Fluglärmbelastungen von HLUG und DLR für identischen Betriebszustand: Ist 2000, Leq(3), Nacht

Da teilweise unterschiedliche Lärmmasse ausgewiesen werden, unterscheiden sich die in den entsprechenden Gutachten dargestellten Niveaukurven natürlich sehr stark. Insbesondere gibt es markante Unterschiede bei den nach der gesetzlich gültigen, aber überholten Flugzeuggruppeneinteilung AzB/84 und der aktualisierten Flugzeuggruppeneinteilung AzB/99 berechneten Belastungskurven. Ebenso gibt es Unterschiede bei den Berechnungen mit den Halbierungsparametern $q=3$ und $q=4$. Auf diese Unterschiede wird denn auch in den entsprechenden Berichten ausdrücklich hingewiesen.

Abweichungen zwischen den Berechnungen von HLUG und DLR für identische Betriebszustände konnten nicht festgestellt werden. Abgesehen von minimalen Abweichungen sind die von HLUG und DLR ermittelten Lärmkurven für identische Betriebszustände deckungsgleich. Die Unterschiede zwischen den ausgewiesenen Lärmkurven sind ausschliesslich auf die oben aufgeführten, unterschiedlichen Berechnungsgrundlagen zurückzuführen. Diese Grundlagen sind jedoch in den entsprechenden Untersuchungsberichten dokumentiert.

6.3.2 Vergleich der Flugbahnen nach DES mit Radardaten

Die den Berechnungen zu Grunde liegenden Fluggeometrien haben einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis der Berechnungen. Als Grundlage für die Berechnungen nach AzB dienen die im sog. DES (Datenerfassungssystem) definierten Fluggeometrien. Es wurde untersucht, wie gut diese idealisierten Flugbahnen mit den realen Fluggeometrien übereinstimmen.

6.3.2.1 Vergleich der Flugspuren

Die Flugspuren nach DES und die aus den Fanomos-Aufzeichnungen ermittelten Flugspuren für verschiedene An- und Abflugrouten sind auf den Karten 2 und 3 der Beilage dargestellt.

Wie aus diesen Darstellungen zu entnehmen ist, stimmen die Flugspuren nach DES im Allgemeinen gut mit den Radarspuren überein. Lokal gibt es aber doch beachtenswerte Unterschiede:

- Die Anflugrouten nach DES beinhalten nur die eigentlichen ILS-Anflugstrecken. Der Einfädungsbereich und insbesondere die südlich vom Flughafen verlaufenden Gegenanflüge auf die Pisten 07 werden von den DES-Spuren nicht berücksichtigt.
- Auf der Abflugroute 30/35 dreht ein beträchtlicher Teil der Flugzeuge in der Region Oppenheim nach Norden ab. Diese Flugbahnen werden gemäss DES nicht berücksichtigt.
- Im DES ist zwar eine Abzweigung von der nach Süden führenden Flugroute 50/55 in der Region Wolfskehlen, Erfelden nach Südwesten vorgesehen. Auf dieser abzweigenden Flugroute werden jedoch keine Bewegungen ausgewiesen.
- Die auf der Route 10 nach Nordwesten abfliegenden Flugzeuge drehen je nach Steiggeschwindigkeit früher oder später nach Norden ab. Gemäss DES werden diese Flugspuren mit zwei Einzelrouten approximiert. Die Lage dieser Routen ist zwar den effektiven Flugspuren gut angepasst, allerdings können diese Routen die reale, typenabhängige Streuung der Flugspuren nur unvollständig wiedergeben. Zudem fehlen die weiter nördlich nach Nordost abdrehenden Flugrouten.

6.3.2.2 Vergleich der Flugprofile

In der Beilage 7 sind die aus Radaraufzeichnungen ermittelten Höhen- und Geschwindigkeitsprofile für verschiedene Routen und Typen zusammen mit DES-Profilen dargestellt. Modellbedingt können die DES-Profile die reale Streuung der Flugprofile nicht abbilden. Für einzelne Typen und Routen gibt es beachtliche Abweichungen zwischen den Höhen- und Geschwindigkeitsprofilen nach DES und den realen Verläufen der Flugbahnen. Es kann jedoch keine systematische Abweichung zwischen DES-Profilen und Radardaten festgestellt werden. Es werden sowohl zu steile wie auch zu flach verlaufende Profile beobachtet. Im Mittel stimmt der Verlauf der DES-Profile gut mit den gemessenen Profilen überein.

6.4 Fluglärmrechnungen mit FLULA2

6.4.1 Berechnungen der Mittelungspegel mit FLULA

Zu Vergleichszwecken und als Referenz für detailliertere Untersuchungen wurden im Rahmen dieses Gutachtens Fluglärmrechnungen mit dem an der EMPA entwickelten Simulationsprogramm FLULA2 durchgeführt. Dabei wurden zwei verschiedene Berechnungen durchgeführt: Zum einen eine sogenannte Basissimulation zur Ermittlung der Fluglärmbelastung in einem ausgedehnten Untersuchungsgebiet in Form von Mittelungspegeln (vgl. Kapitel 6.4.2). Zusätzlich wurde eine Einzelflugsimulation ausgeführt, bei welcher die Lärmimmission einzelner Flugbewegungen im Detail simuliert wird. Diese Detailrechnungen dienen in erster Linie zum direkten Vergleich von berechneten Pegeln mit den an den Messstationen ausgewiesenen Messwerten (vgl. Kap. 6.4.5).

Beide Berechnungsarten basieren auf Fluggeometrien, welche aus den dafür bereitgestellten Radaraufzeichnungen übernommen wurden. Da die in Frankfurt mit dem Fanomos-System aufgezeichneten Radardaten nicht direkt zugänglich sind, mussten diese Daten vorgängig durch das NLR aufbereitet werden. Neben der reinen Formatumwandlung wurde dabei auch eine Höhenkorrektur vorgenommen. Dabei wurden die in den Fanomos-Daten enthaltenen, auf die Standardatmosphäre bezogenen Flughöhen mit Hilfe des aktuellen Luftdrucks auf effektive Flughöhen umgerechnet (zur Genauigkeit der Fanomos-Daten und zur Höhenkorrektur vgl. Kapitel 9). Für die Fluglärmsimulation mit FLULA2 wurden diese Daten anschliessend an der EMPA weiter aufbereitet. Da das Radarsystem die Flugzeuge in der Regel nicht ab dem Startpunkt, sondern erst ab einer gewissen minimalen Flughöhe erfasst, müssen die Flugbahnen mit Hilfe typenspezifischer Kriterien ergänzt und bis zum Startpunkt verlängert werden. Für die Identifikation des genauen Flugzeugtyps werden die Daten zudem mit der Bewegungsliste verknüpft und mit Informationen aus dem Flugzeugregister [1] ergänzt.

6.4.2 Basissimulation

Die Berechnungen wurden für einen rechteckigen Berechnungsausschnitt von 56 x 42 km² ausgeführt. Auf Wunsch des Auftraggebers wurde das Untersuchungsgebiet beispielhaft nach Westen ausgedehnt, so dass es insbesondere die Stadt Mainz umfasst. Für die Berechnung wird ein digitales Höhenmodell mit 40 Meter Rasterabstand verwendet [32, 33]. Dadurch wird auch für erhöhte Immissionspunkte die effektive Entfernung zum Flugzeug korrekt berechnet. Reflexionen und Schallabschirmungen werden bei der Simulation jedoch nicht berücksichtigt. Die Betriebsdaten (Anzahl Flugbewegungen pro Flugzeugtyp und Flugroute) wurden aus den Bewegungslisten der Fraport ermittelt. Die Berechnungen basieren auf den effektiven Bewegungszahlen der sechs verkehrsreichsten Monate des Jahres 2000. Einzelheiten zu den Berechnungsparametern können der Beilage 8 entnommen werden.

In der Basissimulation werden pro Flugzeugtyp und Flugroute ca. 100 individuelle Flugbahnen zufällig ausgewählt. Jede Flugbahn wird in FLULA2 einzeln durchgerechnet, indem im Abstand von einer Sekunde an allen Gitterpunkten des Berechnungsausschnitts die momentane Lärmbelastung berechnet wird. Für jede durchgerechnete Flugbahn werden der Maximalpegel L_{max} , der Ereignispegel L_{AE} und die T_{10} -Zeit ermittelt. Der Maximalpegel und der Ereignispegel werden pro Flugzeugtyp und Flugroute energetisch gemittelt und auf eine Bewegung normiert. Man erhält die sogenannten *Footprints* eines bestimmten Flugzeugtyps auf einer vorgegebenen Flugroute unter bestmöglicher Berücksichtigung der vertikalen und horizontalen Streuung der Flugwege. Zur Berechnung der Gesamtbelastung werden die Footprints entsprechend dem Verkehrsaufkommen gewichtet. Die Gewichtung wird aus der Bewegungsliste ermittelt. Es werden die gemäss Fluglärmgesetz massgebenden Bewegungen der sechs verkehrsreichsten Monate berücksichtigt. Die entsprechenden Bewegungszahlen sind ebenfalls der Beilage 8 zu entnehmen. Es wird sowohl eine energieäquivalente Gewichtung ($Leq(3)$) als auch eine Gewichtung nach AzB mit Halbierungsparameter $q=4$ und unterschiedlicher Tag/Nacht-Gewichtung ausgeführt. Weitere Einzelheiten zum Simulationsverfahren sind in der Technischen Dokumentation FLULA2 beschrieben [57].

Die Ergebnisse der Lärmberechnungen mit FLULA2 werden in Form von Niveaukurven für verschiedene Lärmmasse ausgegeben. Beispiele verschiedener Berechnungen sind auf den Karten in der Beilage zu diesem Bericht dargestellt.

Karte 4:	Energieäquivalenter Dauerschallpegel $Leq(3)$, Tag Dargestellt sind die Niveaukurven der 16 Stunden Mittelungspegel von 55 dB bis 70 dB mit einer Abstufung von 5 dB. Es wird die mittlere Fluglärmbelastung am Tag (06.00 bis 22.00 Uhr) für die sechs verkehrsreichsten Monate des Jahres 2000 ausgewiesen.
Karte 5:	$Leq(4)$ nach DIN 45'643-1 Ebenfalls für die sechs verkehrsreichsten Monate des Jahres 2000 wird der Mittelungspegel $Leq(4)$ nach DIN 45'643-1 ausgewiesen. Hierbei wird die gemäss Fluglärmgesetz gültige unterschiedliche Gewichtung für Tag- und Nachtflüge angewandt.
Karte 6:	NAT_x (für $x = 68\text{dB}, 70\text{dB}$ und 75dB) Es werden drei Kurven dargestellt, die ein Gebiet umschliessen, in dem der A-bewertete Maximalpegel von 68 dB, 70 dB bzw. 75 dB während der Nacht mindestens 6 mal erreicht oder überschritten wird.

6.4.3 Vergleich der Fluglärmerechnungen nach AzB und FLULA2

6.4.3.1 Vergleich der Berechnungsverfahren

Das Berechnungsverfahren nach AzB dient primär gemäss der vom Bundesministerium des Inneren herausgegebenen Bekanntmachung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen in der Umgebung von Flugplätzen. Diese auf Grund des Gesetzes zum Schutz gegen Fluglärm festgesetzten Lärmschutzbereiche dienen zum Schutz der Allgemeinheit vor erheblichen Nachteilen und erheblichen Belästigungen. Die massgeblichen Grenzwerte sind relativ hoch angesetzt (67 und 75 dB). Die AzB sowie das Datenerfassungssystem für die Ermittlung von Lärmschutzbereichen (DES) dienen der Gewährleistung von eindeutigen und reproduzierbaren Ergebnissen. Mit dem Verfahren soll sichergestellt werden, dass die Gebiete, in denen die vom Gesetz festgelegten Grenzwerte für erhebliche Belästigung erreicht oder überschritten werden, zuverlässig und eindeutig ermittelt werden können. Im Vordergrund steht dabei primär eine hohe Rechtssicherheit. Gesetzlich geregelt ist, dass das AzB-Verfahren grundsätzlich zur Ermittlung von Lärmschutzbereichen herangezogen werden muss. Daneben kann das Verfahren auch für Berechnungen in einem weniger streng geregelten Bereich verwendet werden. In derartigen Anwendungen sind auch Erweiterungen und Modifikationen möglich, mit denen die reale Lärmbelastung verlässlicher wiedergegeben werden kann. So kann beispielsweise ein Geländemodell in die Berechnung mit einbezogen werden.

Mit dem Simulationsprogramm FLULA2 soll eine möglichst realistische Reproduktion der physikalischen Schallausbreitung und damit der durch den Flugverkehr hervorgerufenen Lärmimmission erreicht werden. Das Verfahren beschränkt sich nicht auf die vom Gesetzgeber vorgegebenen Grenzwerte. Vielmehr soll die realistische, auf physikalischen Gesetzmässigkeiten basierende Schallausbreitung reproduziert werden. Auf Grund dieser unterschiedlichen Zielsetzungen unterscheiden sich die beiden Berechnungsverfahren in verschiedenen Punkten, obwohl mit beiden Verfahren dieselbe Lärmbelastung ermittelt wird. In Tabelle 6-2 werden die charakteristischen Eigenschaften der beiden Verfahren einander gegenübergestellt. Eine detailliertere Analyse der unterschiedlichen Methoden ist in der Beilage 9 wiedergegeben. Zahlen und Beispiele der charakteristischen Kenndaten zu den Fluglärmmodellen nach AzB und FLULA2 sind der Beilage 10 zu entnehmen.

Tabelle 6-2 Vergleich der charakteristischen Eigenschaften der Berechnungsverfahren nach AzB und FLULA2

FLULA2	AzB
<u>Rechenverfahren, Modell:</u>	
Simulationsverfahren zur Nachbildung der realen Schallausbreitung.	Verfahren zur Ermittlung von Lärmschutzbereichen.
<u>Quellendaten:</u>	
Beschreibung des A-bewerteten richtungsabhängigen Schallpegels durch typenspezifische Richtcharakteristiken. Im Modell der Quellenbeschreibung wird die Richtwirkung der Schallabstrahlung in der Längsrichtung explizit berücksichtigt	Quellendaten für verschiedene Flugzeugkategorien in Form von Oktavpegeln, geringere Detaillierung als FLULA. Richtwirkung der Schallabstrahlung wird nur in vereinfachter Weise im Zusammenhang mit der massgebenden Ausbreitungsdämpfung und der Bodendämpfung berücksichtigt.
<u>Flugbetriebsdaten:</u>	
Fluggeometrien werden aus den realen Radaraufzeichnungen entnommen.	Idealisierte Flugbahnen auf der Basis der von der Flugsicherung publizierten An- und Abflugrouten.
<u>Lärmmasse:</u>	
In der Simulation wird der reale Pegel-Zeit-Verlauf einzelner An- und Abflüge nachgebildet. Daraus können alle beliebigen Lärmmasse abgeleitet werden (A-Pegel).	Äquivalenter Dauerschallpegel $L_{eq}(4)$ nach Fluglärmgesetz.

6.4.3.2 Vergleich der berechneten Lärmbelastungen

Für die sechs verkehrsreichsten Monate des Jahres 2000 wurde der Mittelungspegel $L_{eq}(4)$ mit FLULA2 berechnet und mit entsprechenden AzB-Berechnungen verglichen. Weil die der derzeit gültigen AzB zu Grunde liegende Flugzeuggruppeneinteilung AzB/84 veraltet ist und den damit ermittelten Belastungen keine wissenschaftliche Aussagekraft zugemessen werden kann, wurde der Vergleich auf der Basis der aktualisierten Flugzeuggruppeneinteilung AzB/99 durchgeführt. Um auch die nicht von der Flugzeuggruppeneinteilung abhängigen, bereits erkannten Unterschiede zwischen FLULA2 und dem Verfahren nach AzB zu minimieren wurde dabei von HLUK ein etwas modifiziertes Berechnungsverfahren angewandt [34]. Folgende Modifikationen wurden vorgenommen:

- Berechnung ohne Schwellenkriterium für L_{max} (es werden also auch Ereignisse mit $L_{max} < 55$ dB berücksichtigt).
- Verlängerter Einfädungsbereich im Anflug von ca. 13 km auf 20 km.
- Berücksichtigung der Geländestruktur (Topographie)
- Modifizierte Abflugrouten Richtung Nordwest gegenüber dem von der Fraport erstellten DES (5 statt 2 Routen). Damit soll die reale Streuung der Flugspuren in dieser Region besser abgebildet werden.

Durch diese Modifikation ergeben sich geringfügige Verschiebungen der Niveaueurven. Die Isolinien der nach dem unveränderten AzB-Verfahren und dem modifizierten Verfahren ermittelten Mittelungspegel werden auf der Karte 7 einander gegenübergestellt. Ein Vergleich der mit den beiden Verfahren ermittelten Mittelungspegel an einzelnen Immissionspunkten ist in Beilage 10, Abbildung 8 wiedergegeben. Innerhalb des relevanten Belastungsgebietes sind die Differenzen nur sehr gering und betragen weniger als 0.5 dB. Etwas grössere Differenzen bis 2 dB entstehen in den Gebieten querab zu den Landeschwelle der Pisten 25 in der Region Zeppelinheim – Walldorf im Süden bzw. in der Region Goldstein – Kelsterbach im Norden des Flughafens. Diese Differenzen sind auf die beim modifizierten Verfahren zusätzliche Berücksichtigung der Flugereignisse mit $L_{max} < 55$ dB zurückzuführen. Wegen der sehr grossen Anzahl Flugbewegungen im Landeanflug auf die Pisten 25 wirken sich diese Ereignisse trotz ihrem geringen Maximalpegel in den genannten Regionen spürbar auf den Mittelungspegel aus. Ebenfalls Differenzen von 2 dB werden westlich von Kelsterbach beobachtet.

Die nachfolgenden Ausführungen und Untersuchungen beziehen sich auf diese modifizierte Berechnung nach AzB von HLUK [34]. Karte 8 zeigt einen Vergleich der mit FLULA2 und den von HLUK nach dem modifizierten AzB-Verfahren ermittelten Niveaulinien für den Mittelungspegel $L_{eq}(4)_{FLG}$. Auch nach

diesen Modifikationen weichen die nach FLULA2 und nach AzB ermittelten Lärmbelastungen voneinander ab. Die Differenzen zwischen den beiden Berechnungsverfahren fallen dabei lokal unterschiedlich aus:

- Für mittlere Belastungen von ca. 65 dB stimmen die mit den beiden Verfahren ermittelten Belastungen gut überein, bei niedrigeren Pegeln sind die FLULA2-Berechnungen dagegen deutlich lauter. In flughafennahen Gebieten mit hoher Lärmbelastung fallen die nach AzB berechneten Pegel dagegen höher aus.
- Die Differenzen zwischen den nach AzB und den mit FLULA2 berechneten Lärmbelastungen nehmen mit der Entfernung zu den Flugrouten und damit mit abnehmender Belastung generell zu (FLULA2 lauter).
- Speziell grosse Differenzen werden in den Regionen südöstlich des Flughafens im Gebiet Mörfelden-Walldorf beobachtet. Hier ergibt die FLULA2-Berechnung auf dem Niveau der 55 dB Kurve um bis zu 4 dB höhere Werte.
- Die Unterschiede zwischen den Berechnungen nach AzB und FLULA2 sind für die Mittelungspegel $Leq(3)$ und $Leq(4)$ praktisch gleich.

6.4.3.3 Diskussion

Die unzureichende Berücksichtigung der *Kurvenflüge* beim Berechnungsverfahren nach AzB führt zu einer systematischen Unterschätzung des Fluglärms im kurveninneren Bereich und zu einer Überschätzung im kurvenäusseren Bereich. Weitere Abweichungen ergeben sich wegen der *Nichtberücksichtigung der Gegenanflüge* bei der Berechnung nach AzB. Diese allein bewirken einen Mittelungspegel von ca. 40 dB in der Region südlich des Flughafens. Auf dem Niveau der 55 dB Kurve führt dies zwar noch zu keiner signifikanten Erhöhung des Gesamtpegels, aber zusammen mit den Auswirkungen der Kurvenflüge können damit die besonders grossen Abweichungen zwischen den Berechnungen nach AzB und FLULA in der Region Mörfelden-Walldorf zumindest teilweise erklärt werden.

Daneben führen die unterschiedlichen Ansätze zur Ermittlung der t_{10} -Zeit sowie die verschiedenen *Luftdämpfungskoeffizienten* bei den Berechnungen mit FLULA im Vergleich zu den Berechnungen nach AzB zu einer geringeren Pegelabnahme mit zunehmender Distanz zur Schallquelle und damit zu einer erhöhten Lärmbelastung in grösseren Entfernungen. Dieser Effekt kann mit ca. + 2 dB bei einer Entfernung von 2000 Metern zwischen Flugzeug und Immissionspunkt abgeschätzt werden (vgl. Beilage 10, Abbildung 2).

Bei der Fluglärmrechnung mit FLULA2 wird für landende Flugzeuge eine Pegelreduktion von 6 dB angewandt, nachdem das Flugzeug auf der Piste aufgesetzt hat. Die AzB-Berechnung kennt keine derartige Pegelreduktion. Die höheren Mittelungspegel gemäss der AzB-Berechnung im unmittelbaren Pistenbereich können teilweise darauf zurückgeführt werden. Dies gilt aber nur für die Pisten 07/25, auf der Piste 18, auf der nach AzB ebenfalls höhere Pegel entstehen, erfolgen keine Landungen. Die Differenzen müssen also andere Ursachen haben.

Neben den oben aufgeführten Grössen wird das Ergebnis der Berechnung durch eine Reihe weiterer Faktoren beeinflusst:

- Quellendaten:
 - AzB: Flugzeuggruppeneinteilung nach AzB/99
 - FLULA2: Quelldatensatz RC2001_01 (Ein Vergleich der mit FLULA2 durchgeführten Einzelflugsimulationen mit Messungen zeigt, dass verschiedene für die Gesamtbelastung in Frankfurt relevante Flugzeugtypen mit dem Quelldatensatz von FLULA2 zu laut simuliert werden.)
- Verwendete Höhenprofile.
- Fluggeschwindigkeiten
- Bodendämpfung

Da sich diese Einflussgrössen örtlich sehr unterschiedlich auswirken und weil die Gesamtbelastung aus einer Überlagerung einer Vielzahl einzelner Berechnungen für verschiedene Flugzeugtypen und Routen ermittelt wird, kann keine allgemeine Aussage gemacht werden, ob daraus eine Erhöhung oder eine Verminderung der Gesamtbelastung resultiert. Um den Einfluss der einzelnen Parameter genauer abzuschätzen, müsste eine detaillierte Vergleichsberechnung durchgeführt werden, bei der nicht nur das Endergebnis ausgewiesen wird, sondern bei der sämtliche Zwischenergebnisse der Berechnungen nach AzB und mit FLULA einzeln dargestellt werden. Hierzu müssen für ausgewählte Immissionspunkte mit

beiden Berechnungsverfahren der von einzelnen Flugzeugtypen resultierende Maximalpegel sowie alle weiteren das Ergebnis beeinflussenden Parameter (t_{10} -Zeit, Entfernung zur Flugbahn, Elevationswinkel, Bodendämpfung usw.) ermittelt und ausgewiesen werden. Bei der im Rahmen dieses Gutachtens bereits durchgeführten Einzelflugsimulation liegen die betreffenden Parameter für die Standorte der Monitoringstationen bereits vor. Für einen direkten Vergleich müssten diese Parameter mit einer spezifischen AzB Berechnung zusätzlich ermittelt werden.

Die wichtigsten Einflussgrößen, welche zu den verbleibenden Unterschieden bei der Berechnung der Fluglärmbelastung nach AzB und mit dem Simulationsprogramm FLULA2 führen, sind:

- Unterschiedliche Luftdämpfungskoeffizienten.
- Unterschiedliche t_{10} -Zeiten.
- Keine Unterscheidung zwischen Kurvenflug und Geradeausflug bei der Berechnung nach AzB.
- Nichtberücksichtigung der Gegenanflüge bei den Landeanflügen beim Berechnungsverfahren nach AzB.

6.4.4 Vergleich von berechneten und gemessenen Mittelungspegeln

6.4.4.1 Auswertung und Ergebnisse

An den Standorten der Messstationen werden die mit FLULA2 berechneten Mittelungspegel mit den Messwerten verglichen. Der Vergleich basiert auf den von den verschiedenen Organisationen an den Messstationen für das Jahr 2000 ausgewiesenen Mittelungspegel $Leq(4)$ [13,30,35]. Wie in Kapitel 5.4 erörtert wurde, basieren die von Fraport ausgewiesenen Werte nicht ausschliesslich auf Messungen, sondern sie werden mit Hilfe von Standardpegeln hochgerechnet. Die entsprechenden Pegel sowie die Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Mittelungspegeln sind in der Tabelle 6-3 wiedergegeben. Zum Vergleich werden auch die mit AzB-Verfahren berechneten Pegel ausgewiesen. Die Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Mittelungspegeln sind in Abbildung 6-1 graphisch dargestellt. Detailliertere Informationen zu den an den einzelnen Messpunkten ausgewiesenen Mittelungspegeln sowie der betreffenden Differenzen zwischen Messung und Berechnung können in der Beilage 11 nachgeschlagen werden. Nachfolgend sind die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst:

- 1) Die mit FLULA2 berechneten Mittelungspegel ($Leq(4)$) sind generell lauter als die an den Messstellen ausgewiesenen Pegel, der Mittelwert der Abweichungen beträgt +2.4 dB.
- 2) Sehr gute Übereinstimmung wird an den im Bereich der Anflugrouten positionierten Messpunkten MP01 (+0.4 dB) und MP05 (+0.2 dB) sowie bei der Messstelle MP4 der deBAKOM (+0.1 dB) festgestellt.
- 3) Die Mehrheit der Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Pegeln liegt im Bereich von +1 dB bis +3 dB
- 4) Abweichungen von mehr als 4 dB werden an den Messpunkten MP41, MP57 und MP72 sowie an der Messstelle von HLUG in Raunheim festgestellt. Die grösste Differenz zu den Fraport-Messungen wird an MP3 in Zeppelinheim mit +6 dB ausgewiesen.
- 5) Die Differenzen bezüglich den von deBAKOM in der Region Neu-Isenburg und Zeppelinheim ausgewiesenen Werten liegen unter 2 dB; Ausnahme: MP3/Gravenbruch (+3.4 dB)

Zum Vergleich werden auch die entsprechenden Differenzen bezüglich den AzB-Berechnungen von HLUG untersucht. Es wurden sowohl die Differenzen bezüglich der unveränderten AzB-Berechnung wie auch die Differenzen bezüglich der modifizierten Berechnung (vgl. Kapitel 6.4.3.2) untersucht. Die entsprechenden Zahlenwerte sind der Tabelle 6-3 zu entnehmen, eine graphische Darstellung ist in Abbildung 6-1 wiedergegeben.

Feststellungen:

- 1) Die mit AzB berechneten und die an den Messstellen ausgewiesenen Mittelungspegel stimmen im Mittel gut überein. Die mittlere Abweichung (Mittelwert der Differenzen) zwischen berechneten und gemessenen Pegeln beträgt + 0.4 dB.
- 2) Die mit dem modifizierten AzB-Verfahren berechneten Pegel weichen im Durchschnitt etwas mehr von den gemessenen Pegeln ab, die mittlere Abweichung beträgt + 1.2 dB.
- 3) Auffallend sind die grossen Veränderungen der Differenzen bezüglich den Berechnungen nach AzB und AzB modifiziert an denjenigen Messstationen mit besonders grossen Abweichungen: Während beim Vergleich mit der unveränderten AzB-Berechnung vor allem bei der Messstation MP17 (Okriftel) ein besonders grosse negative Differenz beobachtet wird (- 4.5 dB), reduziert sich diese beim Vergleich mit der modifizierten Berechnung auf das Niveau der übrigen Abweichungen (-1.3 dB). Demgegenüber entsteht am Messpunkt MP 3 (Zeppelinheim) eine besonders grosse positive Abweichung von +5.6 dB.

Tabelle 6-3 Gemessene und berechnete Mittelungspegel

Dargestellt sind die aus den Messungen ermittelten und die mit verschiedenen Verfahren berechneten Mittelungspegel $Leq(4)$ für die 6 verkehrsreichsten Monate des Jahres 2000 sowie die betreffenden Differenzen zwischen den berechneten und gemessenen Werten.

MP	Ort	Messung [dB]	Berechnung			Berechnung minus Messung		
			FLULA2 [dB]	AzB [dB]	AzB mod [dB]	FLULA2 [dB]	AzB [dB]	AzB mod [dB]
Messungen Fraport								
FRA_1	Offenbach-Lauterborn	61	61.4	60.6	60.9	0.4	-0.4	-0.1
FRA_2	Offenbach-Bieber	58	59.4	57.8	58.2	1.4	-0.2	0.2
FRA_3	Zeppelinheim	49	55.0	52.2	54.6	6.0	3.2	5.6
FRA_5	Opelbrücke	58	58.2	56.9	57.2	0.2	-1.1	-0.8
FRA_6	Raunheim	59	61.4	60.0	60.1	2.4	1.0	1.1
FRA_7	Eddersheim	58	59.8	56.9	58.4	1.8	-1.1	0.4
FRA_8	Kelsterbach	55	56.9	58.4	58.8	1.9	3.4	3.8
FRA_9	Neu-Isenburg Rathaus	56	58.0	57.2	57.5	2.0	1.2	1.5
FRA_11	Flörsheim	55	58.5	57.2	57.5	3.5	2.2	2.5
FRA_12	Bad Weilbach	58	60.0	58.7	59.0	2.0	0.7	1.0
FRA_17	Okriftel	53	54.3	48.5	51.7	1.3	-4.5	-1.3
FRA_31	Groß-Gerau Nord	53	55.8	51.3	52.2	2.8	-1.7	-0.8
FRA_32	Nauheim	53	55.5	52.4	53.1	2.5	-0.6	0.1
FRA_35	Groß-Gerau West	54	55.9	52.8	53.2	1.9	-1.2	-0.8
FRA_41	Frankfurt Süd	58	62.3	61.2	61.5	4.3	3.2	3.5
FRA_42	Neu-Isenburg Nord	56	58.6	57.8	58.1	2.6	1.8	2.1
FRA_51	Worfelden	57	59.8	57.3	57.6	2.8	0.3	0.6
FRA_52	Klein-Gerau	56	58.6	56.4	56.8	2.6	0.4	0.8
FRA_55	Büttelborn	57	58.3	56.7	56.9	1.3	-0.3	-0.1
FRA_57	Mörfelden West	57	62.2	59.2	59.4	5.2	2.2	2.4
FRA_71	Forsthaus	57	59.8	58.7	59.0	2.8	1.7	2.0
FRA_72	Weiterstadt	54	58.8	55.1	55.4	4.8	1.1	1.4
FRA_75	Gräfenhausen	55	58.1	55.3	55.8	3.1	0.3	0.8
FRA_77	Mörfelden Süd	56	58.9	56.1	56.5	2.9	0.1	0.5
FRA_89	Bischofsheim	51	52.6	51.1	51.4	1.6	0.1	0.4
Messungen HLUG								
HLUG_Ni	Neu-Isenburg	60.0	62.0	61.7	62.0	2.0	1.7	2.0
HLUG_Ra	Raunheim	55.5	60.8	58.7	58.9	5.3	3.2	3.4
HLUG_Kg	Klein-Gerau	57.5	59.0	57.0	57.4	1.5	-0.5	-0.1
Messungen deBAKOM								
deBAK_1	Zeppelinheim Windhag 3	56.3	57.5	56.8	57.7	1.2	0.5	1.4
deBAK_2	Neu-Isenburg KITA	59.5	61.4	61.0	61.3	1.9	1.5	1.8
deBAK_3	Gravenbruch	48.8	52.2	46.4	50.6	3.4	-2.4	1.8
deBAK_4	Neu-Isenburg Friedensallee	61.8	61.9	61.5	61.9	0.1	-0.3	0.1
deBAK_5	Zeppelinheim Flughafenstr.	58.6	59.8	60.0	60.5	1.2	1.4	1.9
deBAK_6	Zeppelinheim Tennisplatz	54.2	55.1	52.2	54.6	0.9	-2.0	0.4
deBAK_7	Neu-Isenburg Zeppelinstr.	59.4	60.7	60.2	60.5	1.3	0.8	1.1



Abbildung 6-1 *Differenzen zwischen den mit verschiedenen Berechnungsverfahren berechneten und den gemessenen Mittelungspegeln Leq(4)_FLG an verschiedenen Messstationen. Berechnung mit FLULA2 (a), Berechnung nach AzB/99 (b), Berechnung mit modifizierter AzB (c).*

6.4.4.2 Diskussion

Beim Vergleich von Messergebnissen mit berechneten Werten muss berücksichtigt werden, dass sowohl die gemessenen wie auch die berechneten Werte mit einer erheblichen Unsicherheit versehen sind. Die Unsicherheit bei den aus Messungen ermittelten Mittelungspegel beträgt gemäss [58] ca. 2 dB. Ebenso sind die berechneten Pegel mit einer Unsicherheit von derselben Grössenordnung behaftet (vgl. Kap. 6.2). Beim Vergleich der Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Mittelungspegeln müssen diese Unsicherheiten berücksichtigt werden.

Betrachtet man nur die Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Pegeln, so ergibt die Berechnung nach dem unveränderten AzB-Verfahren die beste Übereinstimmung mit den Messwerten, der Mittelwert der Differenzen beträgt lediglich + 0.4 dB, positive und negative Abweichungen sind ungefähr gleich verteilt. Mit dem modifizierten AzB-Verfahren, welches auf Grund der behobenen Unzulänglichkeiten des unveränderten AzB-Verfahrens die Lärmbelastung besser wiedergeben sollte, werden mehrheitlich positive Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Mittelungspegeln festgestellt. Der Mittelwert der Differenzen beträgt + 1.2 dB. Noch einmal etwas grössere Differenzen zwischen den berechneten und den gemessenen Werten entstehen beim Vergleich mit den FLULA2-Berechnungen, der Mittelwert der Differenzen beträgt hier + 2.4 dB, wobei ausschliesslich positive Abweichungen registriert werden.

Allein die Abweichung zwischen Berechnung und den an den Messstationen ausgewiesenen Mittelungspegeln bedeutet noch nicht, dass mit der unveränderten AzB-Berechnung die effektive Lärmbelastung am besten wiedergegeben wird. Bei der Interpretation der Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Mittelungspegeln muss berücksichtigt werden, dass die Messwerte für die nicht erfassten Flugereignisse mit Standardpegeln ergänzt werden. Diese Standardpegel wurden, sofern möglich, aus den Messdaten selbst abgeleitet. Bei Messstationen mit besonders geringem Anteil erfasster Überflüge wurden hierzu auch AzB-Berechnungen beigezogen [16]. Die Messungen und die AzB-Berechnungen sind somit nicht unabhängig voneinander.

Betrachtet man die Abweichungen an den einzelnen Messstationen, so fällt auf, dass die besonders grosse negative Differenz bei der Messstation MP17 (Okriftel) nur beim Vergleich mit der Berechnung nach dem unveränderten AzB-Verfahren entsteht. An dieser Stelle bewirken die Modifikationen im AzB-Berechnungsverfahren eine beträchtliche Zunahme des neu berechneten Mittelungspegels, so dass die Differenz zum Messwert auf -1.3 dB reduziert wird. Dafür vergrössert sich die Differenz an der Messstation MP3 (Zeppelinheim) markant.

Beim Vergleich der Messwerte mit den Berechnungen nach dem modifizierten AzB-Verfahren ergibt sich ein ähnliches Bild wie beim Vergleich mit den FLULA2-Berechnungen. Die Differenzen sind zwar im Mittel um etwa 1 dB geringer als beim Vergleich mit FLULA2, aber es sind mehrheitlich dieselben Messstationen, an denen überdurchschnittliche Abweichungen beobachtet werden. Dazu gehören :

- MP03 Zeppelinheim
- MP41 Frankfurt Süd
- MP_Ra Raunheim (Messung HLUG)

Beim Vergleich mit den FLULA-Berechnungen werden zusätzlich an den Messstationen MP57 (Mörfelden West) und MP72 (Weiterstadt) überdurchschnittliche Abweichungen registriert, ohne dass an diesen Stellen übermässige Abweichungen zu den AzB-Berechnungen festgestellt werden.

An den genannten Messstellen wird im Vergleich zu den übrigen Messstationen ein um 2 bis 3 dB geringerer Mittelungspegel ausgewiesen. Die Ursache für diese Abweichung kann nicht zweifelsfrei geklärt werden. Ein Vergleich mit dem prozentualen Anteil der registrierten Überflüge ergibt, dass an den oben aufgeführten Messstellen der Fraport weniger als 25% der Überflüge registriert werden (vgl. Beilage 11, Abbildung 4). Für die Messstelle Raunheim der HLUG liegt keine entsprechende Auswertung vor, da bei diesen Messungen kein direkter Bezug zu einzelnen Flugereignissen hergestellt werden kann. Wegen der hohen Belastung durch Umgebungslärm sind die Messungen an dieser Messstelle jedoch besonders problematisch [35].

Die grossen Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Mittelungspegeln an einzelnen Standorten sind zumindest teilweise auf die geringe Anzahl erfasster Überflüge und eine unvollständige Ergänzung mit Standardpegeln zurückzuführen. Umgekehrt werden an den Messstationen MP8, MP9, MP17, MP42, und MP77, welche ebenfalls nur einen geringen Anteil Überflüge erfassen, relativ gute Übereinstimmungen zu den berechneten Mittelungspegeln gefunden. Dies bestätigt, dass die Ergänzung der Messwerte mit Standardpegeln in diesen Fällen zu realistischen Mittelungspegeln führt.

6.4.5 Vergleich von berechneten und gemessenen Einzelwerten

6.4.5.1 Methodik

Neben der Basissimulation zur Ermittlung der Mittelungspegel wird zusätzlich eine *Einzelflugsimulation* mit FLULA2 durchgeführt. Im Gegensatz zur Basissimulation werden dabei nicht nur die für die Ermittlung der Mittelungspegel erforderlichen Footprints berechnet, sondern es wird für jeden Flug der am betreffenden Immissionspunkt resultierende Pegel-Zeitverlauf simuliert und daraus alle charakteristische Kenngrössen abgespeichert. Da bei diesem Verfahren eine extrem grosse Datenmenge entsteht, kann die Berechnung im Gegensatz zur Basissimulation nicht flächendeckend ausgeführt werden, sie muss auf wenige Immissionspunkte beschränkt bleiben. Für den Vergleich mit Messdaten werden daher an den Standorten von Monitoringstationen für einzelne Vorbeiflüge die Grössen L_{max} , t_{10} und LAZ berechnet. Für detailliertere Untersuchungen werden diese Daten ergänzt durch eine Vielzahl weiterer Parameter:

- Minimale Entfernung zwischen Flugbahn und Immissionspunkt.
- Entfernung zwischen Quelle und Immissionspunkt bei Detektion des Maximalpegels.
- Höhe über Pistenniveau bei Detektion des Maximalpegels.
- Polarwinkel bei Detektion des Maximalpegels (Winkel bezüglich Längsachse des Flugzeuges)
- Azimut bei Detektion des Maximalpegels (Winkel bezüglich Transversalebene zur momentanen Flugbahn)
- Elevationswinkel bezüglich Mikrofon bei Detektion des Maximalpegels (Winkel zur Horizontalen)
- Geschwindigkeit bei Detektion des Maximalpegels

Durch die Verknüpfung mit den Wetterdaten werden die Datensätze weiter ergänzt mit:

- Druck
- Temperatur
- relative Feuchtigkeit
- Windrichtung
- Windgeschwindigkeit

Mittels einer Verknüpfung mit der Bewegungsliste und dem Flugzeugverzeichnis werden die Daten mit typenspezifischen Informationen ergänzt.

- Flugzeugtyp
- Triebwerkstyp
- Uhrzeit
- Destination

Mit Hilfe dieser Informationen können die gemessenen und berechneten Daten als Funktion verschiedenster Kenngrössen analysiert werden. Im Gegensatz zum Vergleich der Mittelungspegel (vgl. Kapitel 6.4.4), welche auch bei Messungen mit rechnerischen Methoden ermittelt und hochgerechnet werden (Mittelwertbildung, Hochrechnung mit Standardpegeln, Kompensation für Ausfalltage usw.), erfolgt hier der Vergleich mit den echten Messwerten, d.h. direkt mit den von den Messstationen an den Zentralrechner übermittelten Messwerten für einzelne Überflüge.

Um den Aufwand in Grenzen zu halten wurde die Einzelflugsimulation nur für eine beschränkte Auswahl von Messpunkten ausgeführt. Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, dass sowohl Messpunkte im Bereich von Abflug- wie auch von Anflugrouten berücksichtigt sind. Es wurden folgende Messpunkte ausgewertet:

MP01	Offenbach-Lauterborn
MP05	Opelbrücke
MP09	Neu-Isenburg Rathaus
MP11	Flörsheim
MP12	Bad Weilbach
MP35	Groß-Gerau West
MP51	Worfelden
MP57	Mörfelden West
MP71	Forsthaus
MP72	Weiterstadt
MP75	Gräfenhausen
MP77	Mörfelden Süd

Bei der nachfolgenden typenspezifischen Auswertung wurden die Flugzeugtypen berücksichtigt, die für die Lärmimmission massgebend sind. Dazu wurde der Anteil der einzelnen Flugzeugtypen an der gesamten Schalleistung ermittelt, indem der Maximalpegel (Starts) der einzelnen Flugzeugtypen gemäss FLULA-Quellendaten mit den Bewegungszahlen der betreffenden Typen gewichtet wurde (vgl. Beilagen 3 und 10). Die auf diese Art ausgewählten Flugzeugtypen tragen ca. 70 Prozent zur gesamten abgestrahlten Schalleistung bei. Die Auswertung wurde für folgende Flugzeugtypen durchgeführt:

RC-Typ	Detaillierte Typenbezeichnung
A3103	Airbus A310-300
A320	Airbus A320
A321	Airbus A321
B73S	Boeing B737-300
B73V	Boeing B737-500
B7473	Boeing B747-300
B7474	Boeing B747-400
B7673	Boeing B767-300
MD11	McDonnell Douglas MD11
MD80	McDonnell Douglas MD80

Für die genannten Flugzeugtypen und Messstationen wurden die berechneten und gemessenen Pegel und Ereigniszeiten ermittelt und in Abhängigkeit verschiedener Einflussparameter untersucht. Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der Beilage 12 zusammengestellt.

6.4.5.2 Ergebnisse des Vergleichs

Allgemeines

Der Vergleich der für die einzelnen Flugzeugtypen berechneten Maximalpegel sowie weiterer akustischer Kenngrößen mit den gemessenen Werten ergibt ein kontroverses Bild. Es entstehen teilweise erhebliche Unterschiede zwischen den berechneten und gemessenen Werten. Diese Differenzen fallen nicht nur für die einzelnen Flugzeugtypen unterschiedlich aus, es ergeben sich auch beträchtliche Unterschiede zwischen den untersuchten Messstellen. Dabei fallen diese Unterschiede je nach Flugzeugtyp ebenfalls unterschiedlich aus. So beträgt die mittlere Differenz zwischen berechnetem und gemessenem Maximalpegel für den Jumbo B7473 an der Messstelle MP11 +0.5 dB, an der Messstelle MP12 -2.2 dB (vgl. Beilage 12). Eine detailliertere Untersuchung zeigte, dass diese Abweichung auf diverse Fehlzuordnungen von gemessenen Lärmereignissen zurückzuführen ist: Mehrere Lärmereignisse wurden

Flugzeugen zugeordnet, welche in bis zu 8 km Entfernung am Messposten vorbeiflogen. Dadurch ergaben sich bei der Einzelflugsimulation Abweichungen bis zu 50 dB. Da diese Detailuntersuchung wegen des grossen Aufwands nur exemplarisch für einen kleinen Teil der untersuchten Flüge durchgeführt wurde, ist nicht auszuschliessen, dass ein Teil der nachfolgend diskutierten Differenzen ebenfalls auf derartige Fehlzuordnungen zurückzuführen ist. Obwohl die Ergebnisse in einzelnen Fällen also etwas verfälscht sein können, lassen sich daraus doch verschiedene Tendenzen erkennen.

L_{max}

Die Streuung der Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Maximalpegeln ist relativ gross. Die Standardabweichung der Differenzen beträgt ca. 2 dB (typenspezifisch). Die mittleren Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Maximalpegeln fallen für verschiedene Flugzeugtypen unterschiedlich aus. Eine relativ gute Übereinstimmung wird für die Typen A3103, A320, B73S und B73V festgestellt. Die Pegel der Typen A321, B7473, B7474, B7673 und MD11 werden mit FLULA2 offensichtlich systematisch 2 bis 3 dB zu laut simuliert. Die Ursache für diese Überschätzung ist u.a. darin zu suchen, dass die in Frankfurt verkehrenden Flugzeuge z.T. nicht mit denselben Triebwerktypen ausgerüstet sind wie die bei der Ermittlung der Quellendaten für FLULA vermessenen Flugzeuge. So verkehren beispielsweise in Frankfurt mehrheitlich MD11 mit CF6-80C2D1F Triebwerken, während die in Zürich vermessenen MD11 mit dem PW4462 ausgerüstet waren. Offensichtlich hat die spezifische Triebwerkskonfiguration des lokalen Flottenmixes eine erhebliche Auswirkung auf die resultierende Lärmbelastung.

t₁₀-Zeit

Gemäss Definition ist die t₁₀-Zeit die Zeit, während welcher der Schallpegel eines Ereignisses nicht mehr als 10 dB unter dem Maximalpegel liegt. Aus allgemeinen akustischen Überlegungen nimmt die t₁₀-Zeit in erster Näherung linear mit der Entfernung zu und umgekehrt proportional mit der Geschwindigkeit des vorbeifliegenden Flugzeuges ab. In FLULA2 wird die t₁₀-Zeit nicht direkt ausgewiesen, sie wird vielmehr analog zur Messtechnik aus dem Pegel-Zeit-Verlauf ermittelt. Der Vergleich der mit FLULA ermittelten t₁₀-Zeit mit den an den Monitoringstationen ausgewiesenen Werten zeigt, dass die simulierten Werte grundsätzlich mit den gemessenen Werten übereinstimmen. Die Streuung ist allerdings erheblich.

In der Einzelflugsimulation wird zusätzlich auch die t₁₀-Zeit gemäss der Berechnungsvorschrift nach AzB ausgewiesen. Ein Vergleich dieser Werte mit den Messdaten ergibt eine geringere Übereinstimmung. Während die gemessenen und die mit FLULA simulierte t₁₀-Zeiten etwa linear mit der Entfernung zunehmen, zeigen die nach AzB ermittelten Werte nur eine schwache Abhängigkeit von der Entfernung. Demzufolge sind die resultierenden Werte für Entfernungen unter 1000 Meter grösser als die gemessenen bzw. die mit FLULA2 berechneten Zeiten, während für Entfernungen von mehr als 2000 Metern nach AzB eher geringere t₁₀-Zeiten resultieren. Bei diesen grossen Entfernungen ist die Streuung der gemessenen Werte jedoch sehr gross, so dass die genaue Entfernungsabhängigkeit nicht genau ermittelt werden kann (vgl. Beilage 12, Abbildungen 9 bis 11).

LAZ

Der für die Berechnung des Mittelungspegels massgebende Einzelereignispegel LAZ wird gemäss DIN 45'643-1 aus dem Maximalpegel L_{max} sowie der Geräuschkdauer t₁₀ ermittelt. Die Untersuchung der Differenzen zwischen simulierten und gemessenen Ereignispegeln LAZ ergibt ein ähnliches Bild wie bei den Abweichungen der Maximalpegel. Die Differenzen zwischen berechneten und gemessenen LAZ-Werten sind mehrheitlich noch etwas grösser als die betreffenden Differenzen bei den Maximalpegeln, der Mittelwert der Differenzen beträgt + 1.8 dB gegenüber + 1.0 dB beim L_{ASmax}.

Entfernung

Die Darstellung der Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Maximalpegeln als Funktion der Entfernung zwischen dem Empfangspunkt und der Flugbahn deutet auf den ersten Blick auf eine Unterschätzung der mit FLULA2 berechneten Pegel mit zunehmender Entfernung hin (vgl. Beilage 12). Dabei gilt es aber zu beachten, dass die Pegel generell mit zunehmender Entfernung zwischen

Schallquelle und Empfänger abnehmen. Da von den Messstationen nur Ereignisse gemessen werden, die über der Messschwelle liegen, werden mit zunehmender Entfernung nur noch die relativ lauten Ereignisse registriert. Von der Gesamtheit aller Lärmereignisse bleibt ein zunehmender Anteil der leisen Ereignisse unberücksichtigt. Dieser Umstand führt dazu, dass der gemessene Maximalpegel mit zunehmender Entfernung zur Flugbahn überschätzt wird. Auf Grund der grossen Streuung zwischen berechneten und gemessenen Pegeln und unter Berücksichtigung des oben erwähnten Effekts kann weder ein Zu- noch eine Abnahme der Differenz mit zunehmender Entfernung nachgewiesen werden (vgl. Beilage 12).

Temperatur

Ebenfalls in Beilage 12 wird die Abhängigkeit der beobachteten Differenzen als Funktion der Temperatur dargestellt. Gemäss dieser Darstellung kann kein Zusammenhang zwischen den gemessenen bzw. den mit FLULA berechneten Pegeln und der Temperatur festgestellt werden. Das heisst, dass die Temperatur keinen quantifizierbaren Einfluss auf die gemessenen Schallpegel hat.

Windrichtung

Für Messstationen, welche seitlich zu den Abflugrouten angeordnet sind, wurden die Differenzen als Funktion der Windrichtung untersucht. Da die Flugzeuge die betreffenden Messstationen immer auf derselben Seite passieren, entsteht dadurch je nach Windrichtung eine Mitwind- bzw. eine Gegenwindsituation. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnte keine Abhängigkeit zwischen den gemessenen bzw. den mit FLULA berechneten Pegeln und der Windrichtung festgestellt werden. Auch die Windrichtung hat innerhalb der Messgenauigkeit keinen systematischen Einfluss auf die gemessenen Schallpegel.

6.5 Fazit der Fluglärmrechnungen

Für eine flächendeckende Ermittlung der Fluglärmbelastung sind Berechnungsverfahren unabdingbar. Aus verschiedenen Gründen ist die mit Berechnungsverfahren ermittelte Fluglärmbelastung aber stets mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Diese Unsicherheit ist umso geringer, je besser das verwendete Modell den realen Flugbetrieb abzubilden vermag. Naturgemäss kann grundsätzlich mit einem echten Simulationsverfahren unter Verwendung von Radardaten die Lärmbelastung besser wiedergegeben werden als mit einem auf vereinfachten Annahmen basierenden Verfahren. Insbesondere bei Kurvenflügen können bei der Berechnung nach AzB erhebliche systematische Abweichungen zur realen Lärmbelastung entstehen. Unabhängig vom Simulationsverfahren sind die verwendeten Quelldaten jedoch von entscheidender Bedeutung für die Genauigkeit der Fluglärmrechnung. Weil der bei einem Überflug erzeugte Lärm nicht nur vom Flugzeugtyp, sondern auch vom betreffenden Triebwerk abhängt, sind für eine zuverlässige Lärmberechnung detaillierte Kenntnisse über die lokale Flugzeugflotte erforderlich. In der durchgeführten Simulation wurden Quelldaten verwendet, die spezifisch für Zürich sind und für Frankfurt optimiert werden müssen.

Aber selbst bei sehr sorgfältig auf den lokalen Betrieb abgestimmten Modellparametern verbleibt eine Berechnungsunsicherheit. Diese Unsicherheit nimmt generell mit der Entfernung zwischen der Quelle und dem Immissionsort und damit mit abnehmender Lärmbelastung zu. Massgebend ist dabei nicht die Entfernung zum Flughafen, sondern die Distanz zwischen dem Immissionsort und den relevanten An- und Abflugrouten. Unter der Voraussetzung, dass die Quelldaten hinreichend auf den lokalen Flottenmix abgestimmt sind, kann für Frankfurt die verbleibende Unsicherheit (im Sinne einer Standardunsicherheit) auf dem Niveau von 60 dB (Mittelungspegel $Leq(4)$) mit 1.5 dB, von 55 dB mit 2 dB und auf dem Niveau von 50 dB mit rund 3 dB abgeschätzt werden. *Mit einer auf einem optimierten Quelldatensatz basierenden Simulation ist somit eine hinreichend verlässliche Berechnung der Lärmbelastung für einen Mittelungspegel $Leq(4)$ von 55 dB und höher möglich.* Diese optimierte Berechnung sollte dann anhand von - bemannten - Messungen (siehe Kap. 10) validiert werden. Bevor diese Schritte nicht unternommen sind, lässt sich keine gesicherte Aussage darüber treffen, wie hoch die Belastungen im vom Flughafen entfernten Bereich tatsächlich sind. Die vorgelegten Berechnungen stellen eine erste Annäherung dar. Für eine sachgerechte Interpretation der Ergebnisse muss dabei die ausgewiesene Berechnungsunsicherheit angemessen berücksichtigt werden.

7 Meteorologische Einflüsse auf den Fluglärm

Der Zustand der Atmosphäre hat in zweierlei Hinsicht Auswirkungen auf den Fluglärm. Zum einen beeinflusst die Witterung unmittelbar das Flugzeug als Schallquelle, zum anderen ist die Schallausbreitungsdämpfung von der Quelle zum Immissionspunkt abhängig von den meteorologischen Bedingungen [5]. Im Folgenden werden die verschiedenen Einflussgrößen diskutiert.

7.1 Witterungseinfluss auf das Flugzeug als Schallquelle

7.1.1 Ort des Flugzeugs

Der offensichtlichste und in Bezug auf die Lärmbelastung wichtigste Einfluss ist die Wahl der Abflugroute je nach Windrichtung. Zudem verändert sich durch die Windgeschwindigkeit der geometrische Ort des Flugzeugs im Raum und die Fluggeschwindigkeit relativ zum Boden. Die Temperatur hat einen direkten Einfluss auf das Steigvermögen des Flugzeugs, so dass daraus wiederum eine Variation in der Geometrie der Flugbahn resultiert. Der genaue Ort des Flugzeugs bzw. der Verlauf der Flugbahn und die sich daraus ergebenden Abstandsverhältnisse zum Empfangspunkt haben einen sehr grossen Einfluss auf den resultierenden Pegel am Empfangspunkt.

7.1.2 Leistungssetzung

Bei hohen Temperaturen muss als Folge der kleineren Luftdichte eine höhere Triebwerksleistung gewählt werden, mit der Konsequenz, dass der Spielraum hinsichtlich reduzierter Triebwerksleistung ("flex take-off") bei Starts und bei nicht vollbeladenen Flugzeugen eingeschränkt wird. Die Flugzeuge werden damit in der ersten Phase des Starts eher mit "full take-off power" und somit ohne die bei reduzierter Leistung mögliche Lärminderung starten, bis dann in einigen hundert Metern Flughöhe die Leistung auf „climb power“ reduziert wird. Inwiefern die Temperatur einen Einfluss auf die Schalleistung eines Triebwerks bei konstantem effektivem Schub hat, ist Gegenstand verschiedener Untersuchungen. Hierzu liegen zur Zeit jedoch noch keine gesicherten Erkenntnisse vor.

7.1.3 Bedeutung für die berechneten Fluglärmimmissionen

Durch die Verwendung der Radarspuren von real geflogenen Flugwegen können in einer Berechnung von Fluglärmimmissionen die oben angeführten geometrischen Effekte wie Abflugrichtung und Positionsverschiebung unter Windeinfluss direkt berücksichtigt werden. Die je nach Wetter unterschiedlichen Steigprofile werden durch die Radarspuren im Prinzip ebenfalls korrekt einbezogen. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass durch die luftdruckbasierte Höhenmessung des Transponders systematische Höhenfehler entstehen, wenn die aktuelle Atmosphäre stark von der Standardatmosphäre abweicht (siehe Abbildung 9-2, Seite 65). Von diesem möglichen Höhenfehler abgesehen verbleibt im Wesentlichen die wetterbedingte Unsicherheit der Triebwerksleistung.

7.2 Witterungseinfluss auf die Schallausbreitung

7.2.1 Grundlagen

Bei Schallausbreitungsberechnungen sind alle möglichen Ausbreitungspfade von der Quelle zum Empfänger zu berücksichtigen. Im Freien setzt sich das Empfängersignal in der Regel aus dem Direktschall und der Reflexion am Boden zusammen. Diese beiden Anteile interferieren, wobei sie sich je nach Frequenz verstärken oder abschwächen können. Diese Interferenzwirkung wird als sogenannter Bodeneffekt bezeichnet.

Das Wetter beeinflusst die Schallausbreitung auf verschiedene Art und Weise: Die frequenz- und distanzabhängige Luftdämpfung wird von den meteorologischen Parametern Luftfeuchtigkeit und

Temperatur beeinflusst. Für mittlere und hohe Frequenzen ist die Witterungsabhängigkeit der Luftdämpfung grösser als bei tiefen Frequenzen. Für grosse Entfernungen (über 2 Kilometer) wird daher der A-Pegel von Flugzeugen durch tiefe Frequenzen unterhalb 1 kHz dominiert. Die Bedeutung der meteoabhängigen Luftdämpfung auf den A-Pegel ist deshalb beschränkt. Aus der nachfolgenden Abbildung geht hervor, dass die wetterbedingten Unterschiede der Luftdämpfung für normale atmosphärische Bedingungen bis zu einer Entfernung von 2000 Meter weniger als 1 dB(A) betragen. Erst bei extrem trockener oder sehr kalter Luft beträgt der Unterschied zum Wert bei Standardbedingungen (15° C/ 70% r.F.) mehr als 1 dB(A).

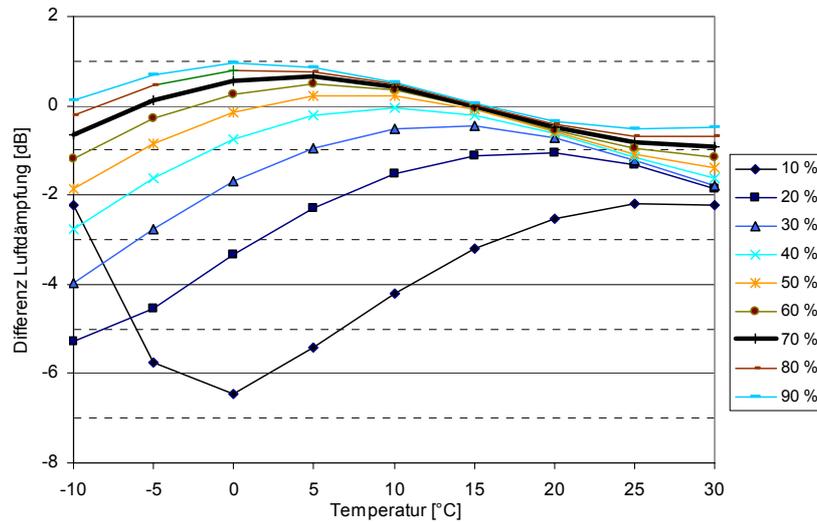


Abbildung 7-1 Auswirkung der Luftdämpfung für verschiedene meteorologische Bedingungen auf den A-Pegel. Die Kurven beschreiben die Differenz der atmosphärischen Dämpfung bezüglich der Standardatmosphäre (15°C, 70% r.F.) in 2000 Metern Entfernung für ein typisches Frequenzspektrum (MD11).

Vertikale Gradienten der Schallausbreitungsgeschwindigkeit haben gekrümmte Ausbreitungspfade zur Folge (Abbildung 7-2). Gekrümmte Ausbreitungspfade führen zu einer Veränderung des Bodeneffekts und können mögliche Hinderniswirkungen stark beeinflussen. Bei einer Krümmung gegen den Boden hin können Hindernisse überstiegen werden, was zu einer deutlichen Reduktion der Abschirmwirkung führt. Im Extremfall können auch zusätzliche Ausbreitungspfade durch Mehrfachbodenreflexionen entstehen. Bei einer Aufwärtskrümmung kann sich trotz freier Sicht zwischen Quelle und Empfänger eine Schattenzone (d.h. kein Schallstrahl gelangt von der Quelle zum Empfänger) mit deutlich abgesenkten Immissionspegeln ausbilden. Die Schallausbreitungsgeschwindigkeit ist dabei von der Lufttemperatur und allfällig vorhandenem Wind abhängig. Positive Temperaturgradienten, d.h. die Temperatur nimmt mit der Höhe zu, und/oder Mitwind führen zu einer Krümmung der Ausbreitung gegen den Boden hin. Negative Temperaturgradienten und/oder Gegenwind führen zu einer Aufwärtskrümmung.

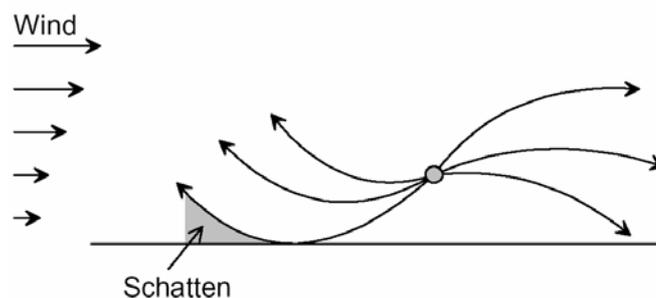


Abbildung 7-2: Schematische Darstellung der gekrümmten Schallausbreitung als Folge eines vertikalen Windgeschwindigkeitsgradienten. In Mitwindrichtung krümmen sich die Strahlen zum Boden hin, gegen den Wind krümmen sich die Strahlen vom Boden weg.

Mechanische und thermische Turbulenzen in der Luft führen zu kurzfristigen Pegelschwankungen. Diese werden bei Mittelungszeiten im Minutenbereich bereits weitgehend ausgeglichen. Turbulenzen stellen Luftpakete mit von der Umgebung abweichenden Dichte und Temperatur dar. Beim Auftreffen von Schallwellen auf diese Mediumsinhomogenitäten wird ein Teil der Schallenergie gestreut. Dies kann dazu führen, dass Schallenergie in Schattenzonen gelangen kann und so beispielsweise eine Reduktion der Hinderniswirkung resultiert. Ein weiterer Effekt der Schallstreuung manifestiert sich in einer Verflachung des Frequenzgangs des Bodeneffekts im Sinne, dass die Interferenzmuster geglättet werden.

7.3 Bedeutung für Fluglärmimmissionen

7.3.1 Luftdämpfung

Die für die Fluglärmimmissionen relevanten Quellen-Empfängerabstände liegen typisch im Bereich von einigen Hundert bis wenigen Tausend Metern. Die Luftdämpfung nimmt bei diesen Abständen bereits relativ hohe Werte an, die eine entsprechende Empfindlichkeit hinsichtlich des Witterungseinflusses aufweisen. Für ein typisches Fluglärmspektrum ist pro Kilometer von einer möglichen Variation der Luftdämpfung in der Grössenordnung von 1 dB(A) auszugehen. Eine präzise Schallausbreitungsrechnung sollte hinsichtlich der Luftdämpfung von den echten Feuchten und Temperaturen ausgehen. Dabei ist zu beachten, dass insbesondere bei Fällen in denen das Flugzeug hoch über Boden ist, die Höhenabhängigkeit der Meteoparameter berücksichtigt werden muss. Die Werte der Luftdämpfung in Funktion der Frequenz, der Lufttemperatur und Luftfeuchte lassen sich nach ISO 9613-1 [43] berechnen. Im Jahresmittel verliert die Variation der Luftdämpfung etwas an Bedeutung, da die im Jahresgang auftretenden Änderungen der meteorologischen Parameter hinsichtlich der Luftdämpfung zu einer teilweisen Ausmittelung führen. *Insgesamt kann die Unsicherheit der Luftdämpfung im Jahresmittel zu rund 0.5 dB(A) pro Kilometer abgeschätzt werden.*

7.3.2 Turbulenzen

Die durch Turbulenzen hervorgerufenen zufälligen Pegelschwankungen mitteln sich zum grössten Teil bereits in der Integration eines Überflugs aus. Bei der Bestimmung des Maximalpegels L_{ASmax} kann sich allerdings eine grössere Unsicherheit ergeben. *Im Jahresmittel ist die Bedeutung der turbulenzbedingten Pegelschwankungen zu vernachlässigen.*

7.3.3 Gekrümmte Ausbreitungspfade

Windgeschwindigkeits- und Temperaturgradienten führen zu gekrümmten Schallausbreitungspfaden. Diese Krümmung ist umso ausgeprägter, je horizontaler die Ausbreitung erfolgt. Damit bleibt die Bedeutung der gekrümmten Ausbreitung für Flugzeuge, die vom Immissionspunkt aus unter einem grossen Elevationswinkel gesehen werden, relativ gering. In Flughafennähe sind allerdings Geometrien denkbar, bei welchen wesentliche Immissionsanteile z.B. von startenden, sich aber noch auf der Piste befindenden Flugzeugen herrühren. In diesen Fällen wie auch für den gesamten Roll- und Bodenlärm muss aus heutiger Sicht die gekrümmte Ausbreitung in Rechenprognosen mitberücksichtigt werden. Diese Aufgabe kann z.B. mit einem "Ray Tracing Modell" gelöst werden. Bei dieser Methode werden Schallstrahlen von der Quelle ausgesandt, ihr (gekrümter) Weg berechnet und die Anteile, die den Empfangsort erreichen, aufsummiert. Im Sinne einer Approximation für hohe Frequenzen und unter Vernachlässigung von Beugungsphänomenen wird die Schallausbreitung als Verfolgung von Energiequanten approximiert. Es gibt auch andere Verfahren, die eine numerische Lösung der Wellengleichung ermitteln wie z.B. die parabolische Gleichung [55].

Es lassen sich nur bedingt allgemeine quantitative Aussagen zur Bedeutung der gekrümmten Schallausbreitung auf die Immissionen machen. Anhand von eigenen Untersuchungen mit einem ray tracing Modell wurden einige Faustregeln abgeleitet, die eine Abschätzung der wetterbedingten Sensitivität der Schallausbreitungsdämpfung erlauben.

Bei mehr oder weniger freiem Himmel erwärmt tagsüber die Sonneneinstrahlung den Boden und damit die untersten Luftschichten. Dabei entwickelt sich eine labile und entsprechend turbulente Schichtung. Die

Schallausbreitungsgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Höhe ab, so dass hinderliche Ausbreitungsbedingungen entstehen. Für bodennahe Quellen können sich ab Abständen von einigen hundert Metern Schattenzonen ausbilden, für welche die Immissionspegel im Vergleich zur neutralen Schichtung eine zusätzliche Dämpfung von 20 dB(A) und mehr erfahren. Mit zunehmender Quellenhöhe vergrössert sich die Entfernung, ab der eine Schattzone entsteht. So ist für eine Quellenhöhe von 100 Meter ein 10 Meter hoher Empfänger erst ab einem Abstand von rund 1 Kilometer im Schatten. Bei einer 200 Meter über Boden befindlichen Quelle beginnt der Schatten ab rund 2 Kilometer, eine Quellenhöhe von 500 Meter führt ab rund 4 Kilometern zu einem Schatten.

Während der Nacht kühlt sich bei klarem Himmel der Boden schneller ab als die oberen Luftschichten, so dass bei nicht zu starkem Wind positive Temperaturgradienten und damit förderliche Ausbreitungsbedingungen entstehen. Die Inversionsschichten sind typisch zwischen einigen Zehn und einigen Hundert Meter mächtig. Für bodennahe Quellen führt die Ausbreitungskrümmung gegen den Boden hin zu einem möglichen Übersteigen von Hindernissen. Dadurch können im Vergleich zur neutralen Schichtung Immissionspegelerhöhungen von 10 dB(A) und mehr auftreten. Wie angesprochen, haben die Inversionsschichten nur eine relativ kleine Ausdehnung. Für höher gelegene Luftschichten kehrt dann der Gradient um, so dass sich oberhalb der Inversionsschicht hinsichtlich der Ausbreitung eine Schattzone ausbildet. Dieser Effekt kann mitunter beobachtet werden, wenn ein aufsteigendes Flugzeug in einiger Entfernung anfänglich gut gehört wird, dann aber relativ abrupt abbricht, sobald die Quelle eine bestimmte Höhe erreicht hat. Wie bereits oben ausgeführt, vergrössert sich die Distanz, ab der eine Schattzone auftritt, mit zunehmender Quellenhöhe.

Besondere Temperaturverteilungen in unterschiedlichen Luftschichten sind nicht nur die Folge des beschriebenen Strahlungsmechanismus sondern können auch durch Verschiebung von Luftmassen entstehen. Analog zu den beschriebenen Temperatureffekten können die förderlichen und hinderlichen Ausbreitungsbedingungen auch durch Windgeschwindigkeitsgradienten verursacht werden. Bei freier Sichtlinie von der Quelle zum Empfänger beeinflusst ein Mitwind den Immissionspegel nur unbedeutend. Bei Gegenwind tritt ein Schallschatten auf, wobei die Verhältnisse zwischen Quellenhöhe und Abstand zur Schattzone mit dem oben beschriebenen Fall der labilen Schichtung vergleichbar sind.

7.4 Totaler Wettereinfluss auf die Schallausbreitungsdämpfung im Jahresmittel

Um die Bedeutung des Wettereinflusses auf die Schallausbreitungsdämpfung gemittelt über einen Jahresmittelwert abzuschätzen, muss unterschieden werden zwischen zwei Kategorien von Immissionspunkten. Die Kategorie A umfasst Immissionspunkte, die sich in Flughafennähe z.B. seitlich der Pisten befinden und den wesentlichen Anteil der Schallenergie von Bodenquellen (Rolllärm) und startenden bzw. landenden Flugzeugen bis zu einer Höhe von etwa 100 Metern erhalten. Die Kategorie B umfasst Immissionspunkte in grösserem Abstand vom Flughafen, die den Hauptanteil der Schallenergie von Flugzeugen in einer Höhe über 100 Metern erhalten. Für die Kategorie A muss auch im Jahresmittel von einem wesentlichen Wettereinfluss ausgegangen werden. So ist in gewissen Situationen mit vorherrschenden Windrichtungen, bzw. bei der Beschränkung auf bestimmte Tagesperioden (z.B. Abendstunden) mit vorherrschenden Temperaturschichtungen zu rechnen. Besonders kritisch sind die Fälle mit versperrter Sichtverbindung zwischen Quelle und Empfänger. Hier kann der Wettereinfluss mehr als +/-5 dB(A) betragen. Wenn dagegen Sichtverbindung besteht, ist zu beachten, dass die möglichen wetterbedingten Abweichungen der Immissionspegel vom neutralen Fall stark asymmetrisch ausfallen. So sind nur geringe Pegelerhöhungen (ca. 2 dB(A)), dagegen beträchtliche Pegelreduktionen (bis zu 20 dB(A)) zu erwarten. Für Immissionspunkte der Kategorie B ist der Wettereinfluss auf die Ausbreitungsdämpfung geringer. Obwohl auch hier Schattzoneneffekte auftreten können, bleiben die Auswirkungen begrenzt. *Die Unsicherheit lässt sich mit rund 1 dB(A) pro Kilometer abschätzen.*

7.5 Fazit zu den meteorologischen Einflüssen auf den Fluglärm

Die meteorologischen Einflussfaktoren auf den Fluglärm sind

- mögliche Beeinflussung der Abflugrouten
- von der Luftdichte abhängige Leistungssetzung
- Variation der Schallausbreitungsdämpfung vom Flugzeug zu den Immissionspunkten

Der Einfluss des Windes auf die Wahl der Abflugrouten sowie ein allenfalls von der Temperatur abhängiges Steigverhalten der Flugzeuge können durch Einbezug der effektiven Radarspuren in die rechnerische Modellierung vollständig berücksichtigt werden. Als wesentlicher Faktor verbleibt die wetterbedingte Variation der Ausbreitungsdämpfung. Im Jahresmittel lässt sich diese Unsicherheit auf etwa 1 dB(A) pro Kilometer veranschlagen. Dies gilt für Immissionspunkte, die sich in grösserem Abstand vom Flughafen befinden und entsprechend die wesentliche Schallenergie von Flugzeugen aus einer Höhe von über 100 m erhalten.

8 Bodenlärm

Die Problemstellung Bodenlärm wurde in verschiedenen Gutachten [25],[26],[59] eingehend behandelt. Dabei wurde ein rechnerischer Ansatz gewählt, indem für die verschiedenen Bodenlärmquellen ein Emissionswert bestimmt wurde und anschliessend mittels eines Schallausbreitungsrechenmodells auf die Pegel an den Immissionspunkten geschlossen wurde. Als Schwierigkeit stellt sich dabei die Ermittlung der Emissionsdaten heraus, da im Gegensatz zum Fluglärm keine Grundlagendaten zur Verfügung stehen. In der Folge werden die Problemkreise rund um den Bodenlärm allgemein diskutiert.

8.1 Abgrenzung der Kategorie Bodenlärm zum Fluglärm und zu weiteren möglichen Lärmquellen auf einem Flughafen

In den Dokumenten [25],[26],[46] wird folgende Abgrenzung angenommen: Zum Fluglärm werden die Immissionen gezählt, die von Flugzeugen ausgehen, die sich in der Luft oder auf den Start- bzw. Landebahnen befinden. Der Bodenlärm umfasst dagegen den übrigen flughafenbezogenen Lärm wie Triebwerkstandläufe, Rollverkehr und sonstige Lärmquellen. In [26] werden diese „sonstigen“ Lärmquellen näher spezifiziert und in folgende Teilquellen aufgeschlüsselt: Triebwerke der Luftfahrzeuge im Stand und im Rollen, Hilfstriebwerke (APU) und Schleppfahrzeuge. Anhand einer Relevanzbetrachtung wird gezeigt, dass die im Prinzip auch zum Bodenlärm gehörende Quellgruppe „Kraftfahrzeug-Fahrten“ vernachlässigt werden kann. Es stellt sich die Frage, ob konsequenterweise auch alle übrigen Quellen auf dem Flughafengelände wie z.B. Pumpen, Ventilatoren etc. in die Bodenlärmimmissionsbetrachtung einfließen müssten, bzw. es müsste gezeigt werden, dass die entsprechenden Immissionsanteile vernachlässigbar sind.

8.2 Messung des Bodenlärms im Sinne eines Monitorings

Der Bodenlärm setzt sich – wie oben angedeutet – aus einer Vielzahl von Quellen zusammen. Diese Quellen befinden sich an ganz unterschiedlichen Positionen auf dem Flughafenareal. Da sich die Quellen in Bodennähe befinden, hat die Topographie und die Bebauung einen wesentlichen Einfluss auf die Schallausbreitung zu den Immissionspunkten. Die wichtigsten Elemente sind Hindernisse und Reflektoren, die zu einer Abschirmung bzw. einer Verstärkung führen können. Als Folge der grossen Bedeutung der Ausbreitungssituation ist mit lokal stark unterschiedlichen akustischen Immissionen zu rechnen. *Es ist damit nur schwer möglich, jeweils für grössere Gebiete repräsentative Immissionspunkte für ein Bodenlärmmonitoring zu finden.*

Bodenlärm weist keine besondere Zeitstruktur auf, d.h. er ist mehr oder weniger permanent vorhanden, bzw. tritt in nicht vorhersagbarer Weise auf. Ein Monitoring für Bodenlärm muss deshalb ununterbrochen Schall registrieren. Es ist nicht zu vermeiden, dass dabei auch akustische Ereignisse, die nicht in die Kategorie Bodenlärm gehören (z.B. Fluglärmereignisse, Strassenlärm, etc.), mitaufgezeichnet werden. Dieses - im Sinne des Bodenlärmmonitorings – unerwünschte Störgeräusch kann nicht ohne weiteres unterdrückt werden. Es wäre zwar denkbar, die Fluglärmereignisse mit Kenntnis ihres Auftretens durch zeitliche Fensterung beim Bodenlärmmonitoring wegzufiltern. *Es muss aber dennoch von einer grossen Unsicherheit beim automatischen Bodenlärmmonitoring ausgegangen werden.*

Insgesamt lassen die lokal stark unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen und die Störgeräuschproblematik ein umfassendes Bodenlärmmonitoring (im Sinne einer Messung) als wenig sinnvoll erscheinen.

8.3 Berechnung von Bodenlärmimmissionen

Hier stellen sich zwei Probleme. Der erste Aspekt bezieht sich auf die Schwierigkeit, die Quelle „Bodenlärm“ hinsichtlich ihrer Position und Quellstärke exakt zu beschreiben. Der zweite Aspekt umfasst die Bestimmung der Ausbreitung von den Quellen zu den Immissionspunkten.

In erster Näherung könnte das Flughafenareal als grosse, homogen strahlende Flächenquelle betrachtet werden. Eine solche Vereinfachung würde dazu führen, dass die berechneten Immissionen in der Nähe des Flughafenareals mit grossen Unsicherheiten behaftet wären, da lokale Inhomogenitäten der Quellstärke (z.B. als Folge von definierten Fahrwegen oder auf Grund von abschirmenden Hindernissen) nicht berücksichtigt würden. Als zweiter Nachteil erweist sich das kaum lösbare Problem der Bestimmung der Leistungsdichte der Flächenquelle. Mit dem Parameter Leistungsdichte bzw. Intensität einer Flächenquelle wird beschrieben, wie gross die pro Quadratmeter emittierte Schalleistung ist. Es scheint insgesamt unabdingbar, dass eine feinere örtliche Auflösung angestrebt werden muss. Dabei sollten nach Möglichkeit alle einzeln identifizierbaren und beschreibbaren Quellen ausgewiesen werden.

Als recht gut beherrschbar dürfte sich der Rolllärm als Unterkategorie des Bodenlärms erweisen. In [25] werden dazu für einige typische Flugzeugtypen Emissionsspektren und Richtcharakteristiken angegeben. Dabei werden die beiden Lastzustände *Idle* und *Anrollen aus dem Stand* unterschieden. Die Messung der Emissionskennwerte ist nicht trivial, da es sich um eine ausgedehnte Quelle (mehrere Triebwerke) handelt und demzufolge mit einem relativ grossen Messabstand gearbeitet werden muss. Die grosse Distanz führt aber dazu, dass die Ausbreitung (Bodeneffekt) bereits eine massgebliche Beeinflussung des Spektrums bewirkt und demzufolge rechnerisch wegkompensiert werden muss. Wenn die Emissionsdaten vorliegen, kann mit Kenntnis der Bewegungszahlen und dem Verlauf der Rollwege eine zuverlässige Immissionsprognose vorgenommen werden. Dazu wird die Bewegung in einzelne Punktquellen diskretisiert und mit einem Modell für bodennahe Ausbreitung die jeweilige Ausbreitungsdämpfung bestimmt. Dabei ist nach Möglichkeit die Bebauung des Flughafens und der angrenzenden Zonen miteinzubeziehen (Hindernismwirkungen, Reflexionen).

Die Bestimmung der von den Schleppfahrzeugen verursachten Immissionen dürfte analog zum Rolllärm abzuwickeln sein. Die Ermittlung der weiteren relevanten Quellen erfordert dagegen minutiöse Detailabklärungen. Mit Hilfe von Messungen im Nahbereich müssten die Quellenleistungen sowie die Richtcharakteristika einzeln bestimmt und schliesslich in das Ausbreitungsrechenmodell integriert werden. Dabei ist nicht nur die horizontale Position der Quellen bedeutend. Es ist auch wichtig, die Höhe der Abstrahlung richtig einzubeziehen. Es ist denkbar, mehrere Quellen zu einer Flächenquelle zusammenzufassen, wobei hier wieder das Problem der Bestimmung der flächenbezogenen Leistungsdichte auftritt.

In den gesichteten Gutachten [25],[26],[59] wird als Schallausbreitungsmodell die international anerkannte Rechenvorschrift ISO 9613-2 [44] verwendet. Damit werden die wesentlichen Aspekte der Schallausbreitung von der Quelle zum Empfänger berücksichtigt. Für moderate Mitwindbedingungen, d.h. Mitwind innerhalb von $\pm 45^\circ$ bei Geschwindigkeiten zwischen 1 und 5 m/s auf 10 Meter Höhe und freie Ausbreitung ohne Hindernisse schätzt ISO 9613-2 die Genauigkeit für Quellen-Empfängerabstände zwischen 100 und 1000 Meter auf ± 3 dB(A). Im Falle von Hindernissen und abweichenden Wetterbedingungen vergrössert sich die Unsicherheit entsprechend. Aus heutiger Sicht müssten für Bodenlärmimmissionsprognosen von Flughäfen auf Grund der grossen relevanten Abstände Schallausbreitungsmodelle eingesetzt werden, die insbesondere die meteorologischen Einflüsse zuverlässiger abbilden können. Solche Modelle sind zur Zeit noch nicht kommerziell erhältlich, dürften aber in naher Zukunft den Weg von den Forschungsinstituten in die gängigen Softwarepakete finden.

8.4 Beurteilung von Bodenlärm

Gemäss [46] lässt sich Bodenlärm von Flughäfen anhand der TA-Lärm [56] beurteilen. Für den lärmgeplagten Anwohner ergibt sich die etwas unbefriedigende Situation, dass die gesamte vom Flughafen ausgehende akustische Immission aufgeteilt und separat beurteilt wird, obwohl beispielsweise der von einem Triebwerkstandlauf bzw. von rollenden Flugzeugen ausgehende Lärm sehr ähnliche Eigenschaften wie der Lärm der startenden Flugzeuge aufweist.

8.5 Fazit zum Bodenlärm

Auf Grund der grossen lokalen Variation des Bodenlärms ist es im Allgemeinen kaum möglich, wenige repräsentative Bodenlärmimmissionspunkte zu definieren. Überdies ist die automatische messtechnische Erfassung des Bodenlärms mit grossen Unsicherheiten verbunden, da in den meisten Fällen mit weiteren, nicht zur Kategorie des Bodenlärms gehörenden Schallimmissionen gerechnet werden muss. Ein auf Messungen basierendes Bodenlärmmonitoring erscheint daher wenig sinnvoll. Erfolgversprechend ist die rechnerische Ermittlung der Bodenlärmimmissionen. Dazu sind ein geeignetes Schallausbreitungsmodell sowie detaillierte Kenntnisse der akustischen Eigenschaften der Bodenlärmquellen erforderlich.

9 Genauigkeit der Radardaten

9.1 Allgemeines

In der vorliegenden Untersuchung wurde erstmals die Lärmbelastung in der Umgebung des Flughafens Frankfurt/Main mit Hilfe von Radardaten berechnet. Dadurch kann sowohl die horizontale wie auch die vertikale Verteilung der einzelnen Flugbahnen berücksichtigt werden. Da die Geometrie der in die Berechnung einflussenden Flugbahnen einen direkten Einfluss auf die resultierende Lärmbelastung hat, stellt sich die Frage, wie genau denn die verwendeten Radardaten sind. Um diese Frage zu beantworten wurden die Radardaten, genauer die für die Simulation verwendeten Fanomos-Daten mit GPS-Aufzeichnungen eines Vermessungsflugzeugs anlässlich der periodisch durchgeführten Vermessungen der ILS-Anflüge verglichen. Hierzu wurden die sehr genauen Positionsmessungen des Vermessungsflugzeuges nicht nur während des eigentlichen ILS-Anflugs aufgezeichnet, sondern auch während des anschliessenden Durchstartmanövers und dem Weiterflug zur nächsten Anflugposition. In einer weiteren Untersuchung wurden die Flugbahnen der ILS-Anflüge des normalen Flugverkehrs analysiert, indem die Überflughöhen bei einzelnen Messstellen als Funktion verschiedener Einflussparameter untersucht wurden.

9.2 Vergleich der Fanomos-Daten mit GPS-Aufzeichnungen

9.2.1 Aufbereitung der Messdaten

Die vom Radarsystem (Fanomos) und dem Messflugzeug aufgezeichneten Daten liegen in sehr unterschiedlichen Formaten vor. Neben verschiedenen Datenformaten werden auch unterschiedliche Koordinatensysteme sowie verschiedene Definitionen einzelner Flugabschnitte verwendet. Die Koordinaten wurden mit Hilfe des Transformationsprogramms Troja [31] in Gauss-Krüger Koordinaten umgerechnet. Dabei werden nicht nur die Lagekoordinaten, sondern auch die ellipsoidischen Höhen bezüglich WGS84 auf Normalhöhen (NN-Höhen) transformiert. Die Zuordnung einzelner Flugabschnitte erfolgt auf der Basis der in beiden Systemen aufgezeichneten Ereigniszeit. Insgesamt 11 verschiedene Flugabschnitte konnten dabei zugeordnet und miteinander verglichen werden. Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die verglichenen Messdaten.

Tabelle 9-1 **Übersicht über verglichene Flugbahnen aus Radaraufzeichnungen und GPS-Messungen**

	Radaraufzeichnung	Vermessungsflugzeug
Datengrundlage	Fanomos-Daten	GPS-Daten
Koordinaten	UTM	UTM
Koordinatensystem	ED50	WGS84
Bezugshöhen	Druckhöhe bezüglich Standardatmosphäre	WGS84

Die als Druckhöhe in den Fanomos-Daten enthaltenen Höhenangaben wurden dabei mit Hilfe des aktuellen Luftdrucks mit nachfolgender Korrektur auf Standarddruck umgerechnet [48].

$$H' = H + 8.32 dp$$

H': bezüglich aktuellem Luftdruck korrigierte Höhe in Meter.

H: Höhenangabe gem. Fanomos in Meter

dp: Druckdifferenz zwischen aktuellem Luftdruck und Standardatmosphäre in hPa.

9.2.2 Ergebnisse

In Abbildung 9-1 sind die Fanomos- und GPS-Aufzeichnungen eines Anfluges auf die Piste 25L mit anschliessendem Durchstart dargestellt. Der Vergleich der Fanomos-Daten mit den GPS-Daten zeigt, dass horizontale Abweichungen bis zu 1000 Meter und vertikale Abweichungen bis zu 100 Meter auftreten können. Grosse horizontale Abweichungen werden vor allem bei Kurvenflügen beobachtet. Diese Abweichungen sind darauf zurückzuführen, dass die Flugbahnen im Fanomos-System in einer geglätteten Form dargestellt werden [15]. Da nur eine begrenzte Anzahl Stützstellen verwendet werden, können dadurch vor allem bei langen Flugbahnen bei engen Kurvenradien Abweichungen zu den realen Flugbahnen in der beobachteten Grössenordnung auftreten.

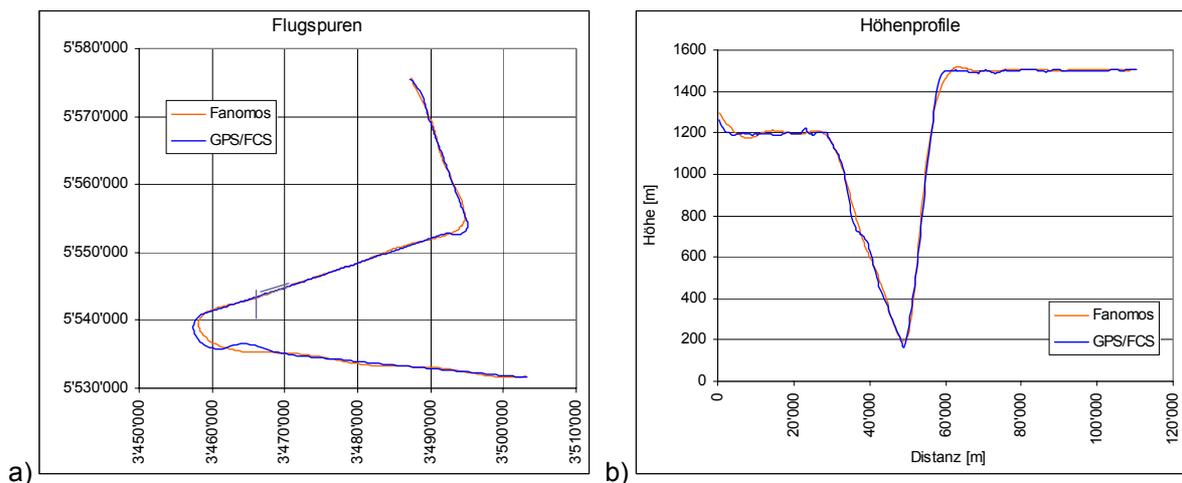


Abbildung 9-1 Horizontale (a) und vertikale (b) Abweichungen zwischen den Fanomos-Radardaten und den mit GPS aufgezeichneten Flugdaten eines Anfluges auf Piste 25L mit anschliessendem Durchstart.

Die vertikalen Abweichungen sind teilweise auf den selben Effekt zurückzuführen. Besonders grosse Abweichungen treten bei einem abrupten Übergang vom Steigflug in den Horizontalflug und umgekehrt auf. Aber auch bei horizontal verlaufenden Flugphasen auf konstanter Höhe werden bei einzelnen Flügen vertikale Abweichungen bis 100 Meter beobachtet. Diese Abweichungen sind darauf zurückzuführen, dass die in der Zivilliegerei eingesetzten Radarsysteme nur die horizontale Position messen, die Flughöhe wird aus dem vom Flugzeug selbst übermittelten Transpondersignal entnommen. Diese Höhenmessung basiert auf einer Druckmessung und die resultierende Höhenangabe ist auf die international genormte Standardatmosphäre bezogen. Wenn die aktuelle Atmosphäre von der Standardatmosphäre abweicht, so ist die angezeigte Höhe falsch und muss entsprechend korrigiert werden. Aus diesem Grund werden die Höhenangaben bezüglich dem aktuellen Luftdruck korrigiert. Neben dieser Druckkorrektur werden die Höhenangaben zusätzlich durch die Temperatur beeinflusst.

Da die Vermessungsflüge in zwei Serien im April und September 2002 durchgeführt wurden, kann dieser Effekt beim Vergleich der Daten nachgewiesen werden. Bei den im April in relativ kalter Luft durchgeführten Messflügen sind die Flughöhen gemäss Fanomos höher als die mit GPS ermittelten Flughöhen. Umgekehrt werden bei den im September bei höheren Temperaturen durchgeführten Messungen von Fanomos zu niedrige Flughöhen ausgewiesen.

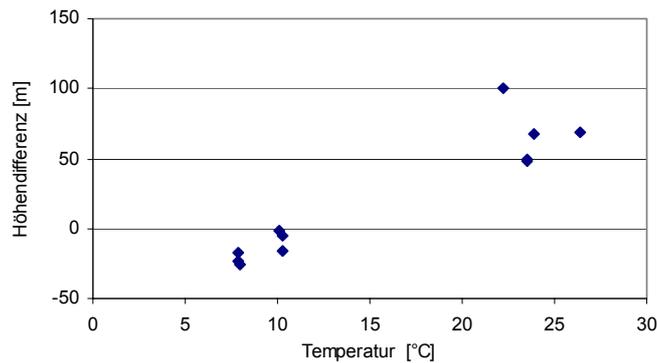
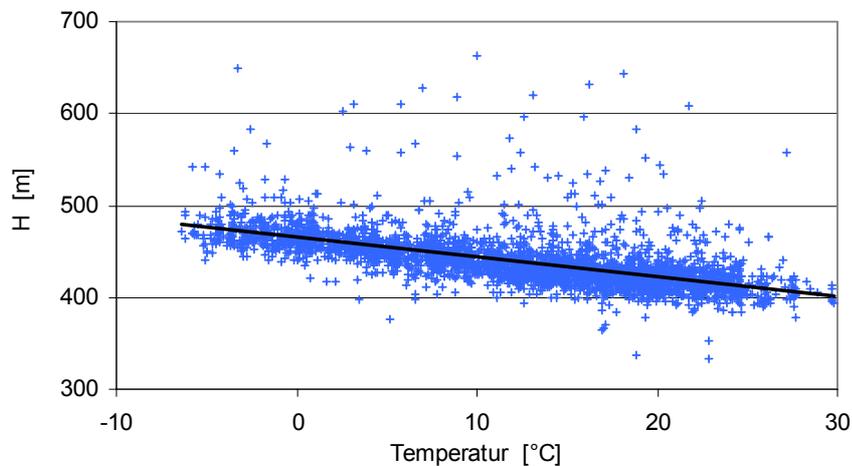


Abbildung 9-2 *Mittlere Höhenabweichung zwischen den GPS-Aufzeichnungen des Vermessungsflugzeugs und den druckkorrigierten Höhen der Fanomos-Daten bei unterschiedlichen Temperaturen.*

Grundsätzlich könnte dieser Temperatureffekt analog zur Druckkorrektur ebenfalls kompensiert werden. Da für eine einwandfreie Korrektur jedoch nicht nur die Temperatur auf der Erdoberfläche, sondern das gesamte Höhenprofil der Temperatur bekannt sein muss, ist eine vollständige Korrektur in der Regel nicht möglich. Wegen der offensichtlichen systematischen Abhängigkeit von der Bodentemperatur könnte dieser Höhenfehler aber zumindest teilweise kompensiert werden. *Grundsätzlich gilt, dass bei einer aktuellen Atmosphäre, die kälter ist als die Standardatmosphäre, eine zu grosse Höhe angezeigt wird, während bei einer warmen Atmosphäre eine zu geringe Flughöhe angezeigt wird.*

9.3 Überflughöhen von Landeanflügen

Zur Abschätzung des Einflusses der Temperatur auf angezeigte Flughöhen wurden die bei der Einzelflugsimulation verwendeten Flugbahnen von Landeanflügen untersucht. Da die Landeanflüge durch das wetterunabhängige Instrumenten Landesystem (ILS) geführt werden, kann davon ausgegangen werden, dass die effektiven Überflughöhen an einem Ort unter der Anflugroute unabhängig von der aktuellen Temperatur sind. Mit Hilfe der Daten aus der Einzelflugsimulation wurden die aus den (druckkorrigierten) Fanomos-Daten entnommenen Überflughöhen an den im Bereich der Anflugrouten stationierten Messpunkte 01 und 05 als Funktion der Temperatur analysiert (Abbildung 9-3). Auch hier ist eine eindeutige Abnahme der angezeigten Flughöhe mit zunehmender Temperatur erkennbar.



MP05.xls

Abbildung 9-3 *Aus den (druckkorrigierten) Fanomos-Daten ermittelte Überflughöhen an der Messstelle MP05 (Opelbrücke) von Landeanflügen auf die Pisten 07L und 07R in Abhängigkeit von der Temperatur.*

9.4 Einfluss auf die berechnete Fluglärmbelastung

Es stellt sich nun die Frage, wie gross der Einfluss der Unsicherheit in der Ortsbestimmung mit Radardaten auf die berechnete Fluglärmbelastung ist. Hierbei muss unterschieden werden zwischen den als zufällige Unsicherheiten zu betrachtenden Abweichungen auf Grund der Bahnglättung im Fanomos-System und den systematischen Abweichungen der Höhenangaben als Folge des Temperatureinflusses.

9.4.1 Zufällige Abweichungen

Als Folge der Bahnglättung weisen die angezeigten Positionen entlang der Flugbahn eine als zufällig zu betrachtende Abweichung von bis zu 1000 Meter horizontal und 100 Meter vertikal auf. Die Unsicherheit im Sinne einer Standardunsicherheit kann mit 140 Meter (horizontal) und 20 Meter (vertikal) abgeschätzt werden. Dadurch weist auch die Entfernung zwischen dem Flugzeug und dem Immissionspunkt eine entsprechende Unsicherheit auf, welche für eine typische Quelle-Empfänger Geometrie mit einem Schalleinfallswinkel von 45° zur Horizontalen mit rund 100 Meter abgeschätzt werden kann. Der Immissionspegel nimmt mit zunehmender Entfernung zwischen Schallquelle und Immissionspunkt ab. Es gilt:

$$L_{\max} = L_0 - 20 \lg (r/r_0)$$

$$L_{AE} = L_{AE0} - 10 \lg (r/r_0)$$

mit:

- L_{\max} : Maximalpegel in der Entfernung r
- L_{AE} : Ereignispegel in der Entfernung r
- L_0 : Maximalpegel in der Entfernung r_0
- L_{AE0} : Ereignispegel in der Entfernung r_0

Für ein einzelnes Lärmereignis bewirkt die Unsicherheit in der Ortsbestimmung somit folgende Unsicherheiten der Lärmimmission.

Tabelle 9-2 *Unsicherheit der berechneten Lärmimmission eines einzelnen Vorbeifluges als Folge einer Unsicherheit in der Ortsbestimmung von 100 Meter.*

Entfernung r	Bezugsgrösse	
	L_{AE}	L_{\max}
500 m	0.8 dB	1.6 dB
1000 m	0.4 dB	0.8 dB
2000 m	0.2 dB	0.4 dB

Die Lärmimmission des gesamten Flugverkehrs ist eine Überlagerung einer Vielzahl von einzelnen Flugereignissen. *Da die Unsicherheiten der Beiträge der einzelnen Flüge als zufällig angenommen werden können, nimmt die Unsicherheit der gesamten Lärmbelastung in erster Näherung mit $1/n^{1/2}$ ab und kann im Vergleich zu den übrigen Unsicherheiten vernachlässigt werden.*

9.4.2 Systematische Abweichungen

Durch den Einfluss der Temperatur auf die Höhenmessung weisen die ausgewiesenen Flughöhen eine systematische Abweichung von der effektiven Flughöhe auf, wenn die Temperatur nicht der Normtemperatur der Standardatmosphäre entspricht. Bei extrem hohen oder niedrigen Temperaturen können dadurch systematische Höhenfehler bis zu 100 Metern entstehen. Nach obiger Abschätzung bewirkt eine Abweichung der Flughöhe von 100 Meter bei einer typischen Überflughöhe von 1000 Meter einen Fehler des berechneten Ereignispegels und damit des Mittelungspegels von 0.4 dB. Im Jahresmittel gleichen sich negative und positive Abweichungen der berechneten Lärmpegel mehrheitlich aus. *Die verbleibende Unsicherheit auf den berechneten Mittelungspegel auf Grund temperaturabhängiger Höhenfehler der Radardaten kann somit auf weniger als 0.2 dB abgeschätzt werden und kann im Vergleich zu den übrigen Unsicherheiten vernachlässigt werden.*

9.5 Fazit zur Genauigkeit von Radardaten

Durch die bei der Aufzeichnung der Radardaten mit Fanomos verwendete Parametrisierung und Glättung der Flugbahn entstehen erhebliche Abweichungen zur effektiven Flugbahn. In engen Kurvenflügen und bei abrupten Höhenänderungen können diese Abweichungen bis zu 1000 Meter horizontal und 100 Meter vertikal betragen. Zusätzliche systematische Höhenabweichungen bis zu 100 Meter können durch Temperatureffekte entstehen. Diese temperaturabhängige Abweichung könnte mit einer geeigneten Korrektur zum grössten Teil kompensiert werden. Da sich diese Abweichungen über die Gesamtheit aller Flüge im Jahresmittel mehrheitlich ausgleichen, kann die daraus resultierende Unsicherheit bei der Ermittlung des Jahresmittelungspegels vernachlässigt werden.

10 Ausblick und Empfehlungen

10.1 Vorbemerkung

Die Ermittlung der Fluglärmbelastung in Gegenden mit relativ geringer Belastung ist mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Dies führt dazu, dass die mit unterschiedlichen Verfahren ermittelten Belastungen unterschiedlich ausfallen können. Es stellt sich deshalb die Frage, wie diese Unsicherheit vermindert werden kann.

Messtechnisch steht man hier vor einem Dilemma: Wie in diesem Gutachten dargelegt wird, darf für eine zuverlässige, verlässliche Fluglärmmessung die Entfernung zwischen Flugzeug und Messanlage nicht zu gross sein. Je grösser die Entfernung zwischen Flugzeug und Messanlage ist, um so geringer sind die gemessenen Maximalpegel und um so grösser sind die störenden Einflüsse durch den Umgebungslärm. Ist die Entfernung zwischen Flugzeug und Messanlage grösser als ca. 1.5 Kilometer, dann ist bei der Messung mit erheblichen Unsicherheiten zu rechnen. Die tatsächliche Lärmbelastung kann somit messtechnisch nicht mehr zuverlässig erfasst werden.

Mit Fluglärmmodellen kann die Lärmbelastung grundsätzlich in beliebigen Gebieten berechnet werden. Dabei ist die Berechnung um so genauer, je besser die Modellparameter den (unbekannten) tatsächlichen Werten entsprechen. Werden diese Modellparameter mit Hilfe von flughafennahen Messungen ermittelt, dann können diese Parameter zwar relativ genau abgeleitet werden. Die unverminderte Modellgenauigkeit gilt dann aber nur bis zu der relativ kurzen Distanz zwischen Flugzeug und Messmikrofon, wie sie bei dieser Messung geherrscht hatte. Werden die Berechnungen für grössere Entfernungen extrapoliert, wird die Berechnungsunsicherheit auf Grund unbekannter Einflüsse auf die Schallausbreitung vergrössert. Basieren die Modellparameter aber auf Messungen, die in grösseren Entfernungen durchgeführt wurden, dann vermindern sich zwar die Extrapolationsfehler, dafür können die Modellparameter weniger genau ermittelt werden. Die Unsicherheit der Berechnungen bleibt unvermindert.

Dieses messtechnische Dilemma kann nicht grundsätzlich umgangen werden. Dennoch werden im Folgenden ein paar Möglichkeiten aufgezeigt, wie die Unsicherheiten bis zu einem gewissen Grad reduziert und die Einflussgrössen zumindest abgeschätzt werden können. Hier muss darauf hingewiesen werden, dass man sich an der Grenze des Machbaren bewegt. Sicher können verschiedene kleinere Verbesserungen realisiert werden, "Quantensprünge" mit einer drastischen Verminderung der Messunsicherheit sind dagegen nicht zu erwarten.

Neben den hier angestellten messtechnischen Betrachtungen muss aber auch die Frage geklärt werden, bis zu welchem Belastungsniveau die Ermittlung der Lärmbelastung aus planerischer und politischer Sicht überhaupt sinnvoll ist. Die hier diskutierten Belastungen auf dem Niveau von 55 dB (Tagesbelastung) und weniger liegen weit unterhalb der aktuellen Grenzwerte. Ebenso werden möglicherweise verschärfte, zukünftige Grenzwerte kaum unter diesem Niveau liegen. Es stellt sich daher die Frage, welche Relevanz derart geringe Lärmbelastungen aufweisen. Das ist jedoch eine politische Frage und kann und soll im Rahmen dieses Gutachtens nicht diskutiert werden.

10.2 Monitoringstationen

Der in der Bevölkerung stark verankerte Glaube, dass einzig eine Messung die wahre Lärmbelastung ausweise, steht oft im Widerspruch mit den messtechnischen Möglichkeiten. Eine Messung an einem messtechnisch ungeeigneten Ort liefert keine oder unzuverlässige Angaben, ausser bei aussergewöhnlich lauten, seltenen Ereignissen. Zwar können nicht erfasste Ereignisse durch Standardpegel ersetzt werden, aber wenn fast nur noch Standardpegel verwendet werden müssen, so ist das keine Messung mehr, sondern eine Berechnung, die als „Messung“ dient. Deshalb müssen der Bevölkerung die Grenzen klar erläutert werden, wo eine Monitoringstation noch sinnvoll ist und wo nicht. Weil moderne Flugzeuge leiser geworden sind, sind Monitoringstationen in weit entfernten Gebieten heute untauglich. Grundsätzlich muss die Fluglärmbelastung berechnet werden und die Berechnung soll mit den Ergebnissen von

Messstationen, die an ausgesuchten, messtechnisch gut geeigneten Standorten positioniert sind, überprüft werden. Bei einer Monitoringstation sollte der maximale Pegel eines Vorbeiflugs mindestens 13 dB lauter sein als das (mittlere) Umgebungsgeräusch.

Die akustischen Tore zur Überwachung der Flugwege erfassen die leisen Flugzeuge nicht mehr. Es sollten unbedingt Wege gefunden werden, dass die bei DFS vorhandenen Radarinformationen auch für die Kontrolle der Einhaltung von Flugwegen verwendet werden können, so wie dies in vielen anderen Ländern praktiziert wird. In dem Falle könnten die Messstationen, die als akustischen Tore verwendet werden, aufgehoben oder wenigstens auf eine Station reduziert werden.

Messungen in weit entfernten Gebieten, d.h. dort wo sich der Fluglärm nur noch wenig abhebt vom Umgebungsgeräusch, sind nur mit den folgenden, aufwändigen Methoden möglich:

- Für die Überprüfung von Berechnungen können durch bemannte Messungen und manuelle Auswertung von ausgesuchten Flügen, wo gerade keine Lärmstörung aus der Umgebung stattfand, gewisse Aussagen gemacht werden. Diese Art eignet sich nur für kurze Zeiträume (einige Tage).
- Mit aufwändigen, teuren Messeinrichtungen kann unterschieden werden, aus welcher Richtung der Schall kommt (Intensitätsmessung, Arraytechnik) oder durch aufwändige Signalanalyse wird versucht, den Schallanteil von einem Flugzeug durch bestimmte zeitliche und klangliche Muster vom Umgebungsgeräusch zu trennen.

In allen diesen Situationen mit Pegelunterschieden kleiner als 13 dB muss aber damit gerechnet werden, dass der Umgebungsgeräusch die Erfassung des Fluglärms verfälschen kann und die Messungen somit tendenziell zu hohe Werte ausweisen.

10.3 Mögliche Massnahmen zur Verringerung der Mess- und Berechnungsunsicherheit

10.3.1 Kontrollierte Messungen

Durchführung von zusätzlichen kontrollierten Messungen unter optimalen Bedingungen in weit entfernten Gebieten d.h. bemannte Messungen mit Aufzeichnung der Audiosignale zur detaillierten Analyse im Tonstudio. Um möglichst unverfälschte Messungen zu ermöglichen sollten dabei Standorte ausserhalb bebauter Regionen in Gebieten mit möglichst geringem Grundgeräuschpegel gewählt werden.

Vorteil: Die Modellparameter der Berechnungsverfahren (Ausbreitungsdämpfung, aktuelle Leistungssetzung, Richtwirkung) können optimiert werden. Dadurch kann untersucht und entschieden werden, welche Ausbreitungsdämpfung (AzB oder FLULA/ISO9613) besser ist. Die Modellparameter für die t_{10} Zeit können überprüft werden.

Nachteil: Wegen hohem Aufwand können bemannte Messungen nur während relativ kurzer Zeit und an wenigen Standorten durchgeführt werden. Als Folge der kurzen Messdauer sind die Messungen für einen Jahres-Mittelungspegel u.U. nicht repräsentativ. Der Jahres-Mittelungspegel kann nach diesen Verfahren rein messtechnisch nicht ermittelt werden.

Es ist fraglich, ob in der Umgebung von Frankfurt überhaupt Standorte gefunden werden können, welche die obigen Anforderungen erfüllen (niedriger Grundgeräuschpegel).

10.3.2 Kalibrierung der Quelldaten mit Monitoringdaten

Verwendung der Messdaten der bestehenden Monitoringanlagen zur Optimierung der Quelldaten des Simulationsprogramms FLULA2.

Vorteil: Mit einer Kalibrierung der Quelldaten mit Hilfe der Messdaten bestehender Monitoringanlagen könnte die Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung erheblich verbessert werden. Die Vorteile der Lärmsimulation auf der Basis von Radardaten zur Berücksichtigung der realen Flugbahnverteilungen bleibt dabei erhalten.

Nachteil: Die unterschiedliche Ausbreitungsdämpfung zwischen AzB und FLULA bleibt ungeklärt. Es kann keine Aussage gemacht werden, welches Verfahren die "Realität" besser wiedergibt.

Allfällige bestehende systematische Fehler bei den Monitoringdaten fließen in das Berechnungsverfahren ein und bleiben unerkannt.

10.3.3 Analyse der Berechnungsverfahren

Detailanalyse von AzB und FLULA. Durchführung einer detaillierten Berechnung für ausgewählte Immissionspunkte, an denen die einzelnen Teilergebnisse der Berechnung nach AzB und FLULA im Detail untersucht und verglichen werden.

Vorteil: Der Grund und die massgebenden Faktoren für die unterschiedlichen Ergebnisse der Berechnungen nach AzB und FLULA können identifiziert und quantifiziert werden.

Nachteil: Es kann keine Aussage gemacht werden, welches Verfahren das „richtige“ ist, d.h. welches Verfahren die Realität besser wiedergibt.

10.4 Zukünftige Entwicklungen

10.4.1 Online-Darstellungen

Bei heutigen Berechnungsverfahren steht der Nachweis des gesetzlich relevanten Mittelungspegels im Vordergrund. In der Öffentlichkeit besteht aber vielfach der Wunsch nach Lärminformationen zu einzelnen Flugereignissen (vgl. hierzu auch die Ausführungen in AP3: Kommunikation). Mit Hilfe von Radardaten und einem geeigneten Fluglärmmodell ist es grundsätzlich möglich, die Lärmbelastung eines bestimmten Fluges an einem beliebigen Punkt zu ermitteln. Hierzu sind auf dem Markt bereits erste entsprechende Systeme erhältlich. Bei der Anwendung derartiger Online-Darstellungen stellen sich jedoch verschiedene Probleme:

10.4.1.1 Quelldaten

Für eine Fluglärmsimulation müssen verlässliche Quelldaten des betreffenden Flugzeuges vorliegen. Solche Quelldaten sind als Bestandteil verschiedener Berechnungsmodelle grundsätzlich vorhanden. Hierzu könnte beispielsweise auf die Quelldaten der AzB oder des Simulationsprogramms FLULA2 zurückgegriffen werden. Für eine realitätsnahe Simulation sollten diese Daten aber noch besser an die spezifischen Gegebenheiten der auf dem betreffenden Flughafen verkehrenden Flugzeugflotte angepasst werden.

10.4.1.2 Fluggeometrie

Die für die Simulation erforderliche Fluggeometrie kann grundsätzlich aus den vorliegenden Radaraufzeichnungen entnommen werden. Da Radardaten insbesondere in Flughafennähe oft durch Störungen verfälscht oder gar abgeschnitten sind, mussten diese bei bisherigen Berechnungen in aufwändigen Vorverarbeitungsprozessen aufbereitet werden.

Für ein automatisiertes Berechnungsverfahren müsste dieser Aufbereitungsprozess ebenfalls automatisiert werden.

10.4.1.3 Identifikation des Flugzeuges

Bei bestehenden Radaraufzeichnungen erfolgt die Identifikation des Flugzeugs in der Regel über das Callsign (Funkrufbezeichnung). Die genaue Typenbezeichnung für die Zuordnung der akustischen Quellendaten muss mit zusätzlichen Informationen aus Bewegungslisten und Flugzeugregistern ergänzt werden. Wegen teils unterschiedlichen Bezeichnungen in den verschiedenen Datensätzen erfordert diese Zuordnung in heutigen Systemen aufwändige manuelle Kontrollen. Für ein automatisiertes Berechnungsverfahren müssten die verwendeten Datensätze besser abgestimmt werden.

10.4.2 Neue Berechnungsmodelle

Bestehende Fluglärmrechnungsprogramme basieren auf idealisierten Annahmen über die Schallabstrahlung an der Quelle. Insbesondere die seitliche Schallabstrahlung („lateral directivity“, „lateral attenuation“) wird bei bestehenden Fluglärmrechnungsverfahren nicht optimal modelliert. Auch die Algorithmen zur Berechnung der Schallausbreitung basieren auf vereinfachten Annahmen. Insbesondere gekrümmte Ausbreitungspfade wegen Temperatur oder Windgradienten sowie die Interferenzwirkung durch die am Boden reflektierten Schallwellen können mit bisherigen Verfahren nicht oder nur ungenügend berücksichtigt werden.

Damit diese Effekte realistisch simuliert werden können, müssen neue Modelle entwickelt werden, welche die vollständige, dreidimensionale Schallausbreitung spektral berücksichtigen. Erste derartige Labormodelle wurden bereits entwickelt und befinden sich in der Erprobung. So wurde beispielsweise an der EMPA ein entsprechendes dreidimensionales Quellenmodell entwickelt. Erste Anwendungen zur Beschreibung der stark richtungsabhängigen Schallemission von Helikoptern ergaben ermutigende Ergebnisse [45]. Zum heutigen Zeitpunkt verhindert der hohe Rechenaufwand noch eine Anwendung dieses Verfahrens zur grossflächigen Berechnung von Schallpegeln. Wegen der stetig zunehmender Leistungsfähigkeit neuer Computer und als Folge von Optimierungen im Rechenalgorithmus sind bei zukünftigen Anwendungen massive Verkürzungen der Rechenzeit wahrscheinlich, so dass routinemässige Anwendungen möglich erscheinen. Ob damit die erhoffte Verbesserung der Simulationsgenauigkeit allerdings erbracht werden kann, muss erst noch bestätigt werden. Das grösste Problem dürfte auch hier die Bereitstellung geeigneter Quellendaten darstellen. Entsprechende Untersuchungen befinden sich in Ausführung [21].

11 Glossar

11.1 Literaturverzeichnis

- [1] BUCHair Aviation Database UK Ltd 2001, aktualisiert und ergänzt mit Daten des Bundesamtes für Zivilliffahrt (BAZL) und der EMPA.
- [2] Bundesminister des Innern (1975). Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen an zivilen und militärischen Flugplätzen nach dem Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm vom 30. März 1971. GMBI 26, Ausgabe A, Nr. 8, S. 162-227, 10. März 1975
- [3] Bütikofer, R; Thomann, G; Plüss, S; "Track dispersion in aircraft noise modeling"; Forum Acusticum Berlin, March 15-19, 1999; 4 pages
- [4] Bütikofer R., Thomann G., Validation of FLULA, a time-step model for aircraft noise calculation, paper presented at Inter Noise 2001, The Hague, The Netherlands, August 27-30, 2001
- [5] Cremezi, Cora, Etude de la propagation du son dans l'atmosphère: Application au bruit des avions en phase d'approche et de décollage, These de doctorat de l'université de Maine, Académie de Nantes, Mai 2000
- [6] DIN 45 643, Messung und Beurteilung von Flugzeuggeräuschen
Teil 1: Mess- und Kenngrößen
Teil 2: Fluglärmüberwachungsanlagen im Sinne von § 19 a Luftverkehrsgesetz
Teil 3: Ermittlung des Beurteilungspegels für Fluglärmimmissionen
Beuth-Verlag, Berlin, 1984
- [7] DIN 45'645, Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen - Teil 1: Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft, Beuth-Verlag, Berlin, 1996
- [8] DIN EN 60'651 (1994) "Schallpegelmesser"
- [9] DIN EN 60'804 (1994) "Integrierende mittelwertbildende Schallpegelmesser"
- [10] DIN EN 60'942 (1998) "Schallkalibratoren"
- [11] DIN, Internationales Wörterbuch der Metrologie (VIM), Beuth Verlag GmbH (Berlin, Köln), 1994 (2. Auflage)
- [12] deBAKOM, Verfahren und Vorrichtungen zur Geräuscherkennung und -trennung sowie Lärmüberwachung und -prognose, Deutsches Patent- und Markenamt, Offenlegungsschrift DE 199 49 637 A1 (1999)
- [13] deBAKOM, Schallimmissionsmessungen in Neu-Isenburg zur Bestimmung der Ist-Belastung, Gutachten Nr. 30012001 / DK-1397 im Auftrag der Stadt Neu-Isenburg, 30.1.2001
- [14] DFS, Radardaten (Fanomos-Aufzeichnungen) zu einzelnen Vermessungsflügen vom 26. bis 27. 4 2002 und vom 8.9. bis 9.9.2002, e-mail DFS vom 28.5.2002 und vom 31.10.2002.
- [15] DFS, Mündliche Mitteilung vom 28.11.02
- [16] DLR, Zur Gewährung eines Bonus bei der Festlegung der Landeentgelte auf der Basis von Messungen durch Fluglärmüberwachungsanlagen, Untersuchung im Auftrag der Flughafen Frankfurt Main AG, Göttingen 1998
- [17] DLR, Lärmphysikalisches Gutachten für den Flughafen Frankfurt - Flugbetriebsfälle 2000 und 200X -, im Auftrag der Fraport AG, Göttingen 14.12.2000
- [18] DLR, Gutachten zur nächtlichen Fluglärmbelastung am Flughafen Frankfurt/Main für die Flugbetriebsfälle 2000, 2001 und 200X, im Auftrag der Fraport AG, Göttingen 12.12.2001
- [19] FAA, Integrated Noise Model (INM) Version 6.0 User's Guide. Office of Environment and Energy, Federal Aviation Administration (FAA), September 1999

- [20] ECAC.CEAC DOC.29 (1998) Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Airports, European Civil Aviation Conference.
- [21] EMPA, Abt. Akustik, internes Projekt 840'733, 3D Richtcharakteristiken für Zivilflugzeuge, 2003.
- [22] European Environmental Noise Directive 2002/49/EC
- [23] FCS Flight Calibration Services, Aufzeichnungen von GPS-Messungen bei Vermessungsflügen vom 26. bis 27. 4 2002 und vom 6.9. bis 9.9.2002, Daten-CD vom 16.5.2002 und e-mail vom 14.10.2002
- [24] Fraport AG, Unterlagen zum Raumordnungsverfahren, Gutachten G 6.1: Technisches Lärmgutachten Fluglärm (Lärmphysikalisches Gutachten), DLR, Stand 8.10.2001
- [25] Fraport AG, Unterlagen zum Raumordnungsverfahren, Gutachten G 6.3 Technisches Lärmgutachten, Rolllärmuntersuchung, erstellt von A. Sinz, Obermeyer Planen + Beraten, 80035 München, 8.10.2001.
- [26] Fraport AG, Unterlagen zum Raumordnungsverfahren, Gutachten G 6.4 Technisches Lärmgutachten, Bodenlärmuntersuchung, erstellt von A. Sinz, Obermeyer Planen + Beraten, 80035 München, 8.10.2001.
- [27] Fraport AG: Mündliche Mitteilung von Fraport beim Besuch am 13.11.02
- [28] Fraport AG: www.fraport.de: Dokument VTM_Flughafenentgelte.pdf; "Flughafenentgelte Frankfurt Main, gültig ab 1.1. 2003"
- [29] Fraport AG, Fluglärmreport Ausgabe 1, 2002
- [30] Fraport AG, Fluglärmreport Ausgabe 2, 2002
- [31] Fröhlich, H.; Lohmar, F.J.; Handbuch Troja, Geodätische Bezugssystem- und Abbildungswechsel, Sankt Augustin 2001
- [32] Geobasisdaten (DGM) des Landesamtes für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz vom 11.11.2002; Az.: 26 722-1.21
- [33] Hessisches Landesvermessungsamt HLVA, DGM25,
- [34] HLUg, EMPAG4M.ERT, Rastardaten der von HLUg berechneten Fluglärmbelastung für das Jahr 2000 nach modifiziertem AzB-Verfahren, E-Mail von K.Müller/HLUG vom 27.01.2003.
- [35] HLUg, Hess. Landesamt für Umwelt und Geologie, Bericht über die Fluglärmmessungen 2000 in der Umgebung des Flughafens Frankfurt am Main
- [36] HLUg, K.Müller: E-Mail vom 25.10.2002, Rastardaten der von HLUg berechneten Fluglärmbelastung für das Jahr 2000. F2000G3: Mittelung über 6 Monate mit $q=3$, F2000G4: Mittelung über 6 Monate mit $q=4$.
- [37] HLUg, Mündliche Mitteilung von Herrn K.Müller 10.2.2003
- [38] HLUg, Mündliche Mitteilung von Herrn K.Müller 18.3.2003
- [39] ICAO International Civil Aviation Organisation: Recommended method for computing noise contours around airports. ICAO Circular 205-AN/1/25 (1988)
- [40] ICAO (1998). Round Robin Exercise Using the Hybrid Airport: Phase 2 Results (Draft). Recipients: Members of the Meeting of ICAO CAEP/ WG 2 / Model 1 Task Group. Toulouse. 13-15 October 1998.
- [41] Isermann, U. & R. Schmid (1996). Untersuchungen mit dem Integrated Noise Model. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Strömungsmechanik, Abteilung Messverfahren und Strömungsanalysen. FE-Nr. L-1 / 95-50135/95. Oktober 1996.
- [42] Isermann, U. & R. Schmid (1999). Bewertung und Berechnung von Fluglärm. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Strömungsmechanik, Abteilung Messverfahren und Strömungsanalysen. FE-Nr. L-2/96-50144/96. Juli 1999.
- [43] ISO 9613-1 Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere, 1993.

- [44] ISO 9613-2 Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation, 1996.
- [45] Krebs, W. et al., Modeling of the three-dimensional sound directivity patterns of helicopters, *Acta Acoustica* Vol. 89, 273-279, 2003
- [46] Mediationsgruppe: Beschluss der Mediationsgruppe Bodenlärm im Flughafenbereich, am 27./28./29.01.2000.
- [47] NATO/CCMS Working Group Study: "Aircraft Noise Propagation over varying topography - Measurements made at Narvik Airport, Norway"; The follow-Up Programme to the NATO/CCMS Pilot study on aircraft noise; To be published (contact EMPA for information).
- [48] NLR, Angaben von H. Veerbeek, e-mail vom 1.10.2002
- [49] Pietrzko S.J., Hofmann R.F., Prediction of A-Weighted Aircraft Noise Based on Measured Directivity Patterns. *Journal of Applied Acoustics* 23 (1988), pp. 29-44, UK
- [50] Probst, Wolfgang; Donner, Ulrich; Die Unsicherheit des Beurteilungspegels bei der Immissionsprognose; *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 49 (2002) Nr. 3 - Mai
- [51] RDF, Regionales Dialogforum, Leistungsbeschreibung für ein Gutachten "Fluglärmmonitoring am Flughafen Frankfurt/Main", 25.9.2001
- [52] Roosnek, N, "Passive ranging with four microphones in a spatial configuration"; *Inter Noise 2001*, Den Haag. siehe auch: www.roosnek.nl
- [53] SAE 1751 (1981) "Aircraft Noise, Prediction Method for Lateral Attenuation of Airplane Noise during Takeoff and Landing", Society of Automotive Engineers, Inc.
- [54] SAE 1845 (1986) "Procedure for the computation of airplane noise in the vicinity of airports", Society of Automotive Engineers, Inc.
- [55] Salomons, E. M., *Computational atmospheric acoustics*, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [56] TA Lärm - Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm; Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, , 26. August 1998.
- [57] Thomann, G., W. Krebs, S. Plüss, S. Pietrzko & R. Bütikofer (2001). FLULA2 - Ein Simulationsverfahren zur Berechnung und Darstellung der Fluglärmbelastung; Technische Programm-Dokumentation, Version 2. EMPA Dübendorf. Report Nr: 840'143. Sept. 2001.
- [58] TÜV Süddeutschland; Begutachtung der Fluglärmmessstationen am Frankfurter Flughafen, Gutachten Nr. L 4694 im Auftrag der Fraport AG, 10.4.2002
- [59] Obermeyer, Inst. für Umweltschutz und Bauphysik, Untersuchung über die vom Flughafen Frankfurt/Main nachts ausgehende Roll- und Bodenlärmbelastung, Gutachten im Auftrag der Fraport AG, 19.11.2002

11.2 Abkürzungen und Begriffe

<i>ATOW</i>	Aktuelles Abfluggewicht
<i>AzB</i>	Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen
<i>AzB/84</i>	Flugzeuggruppeneinteilung der derzeit gültigen AzB
<i>AzB/99</i>	Aktualisierte Flugzeuggruppeneinteilung basierend auf einem Vorschlag des Umweltbundesamtes
<i>CPA</i>	Closest Point of Approach
<i>Cutback</i>	Leistungsreduktion nach dem Start
<i>dB</i>	Dezibel
<i>DES</i>	Datenerfassungssystem
<i>DFS</i>	Deutsche Flugsicherung
<i>DLR</i>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
<i>ECAC</i>	European Civil Aviation Conference
<i>ED50</i>	Europäisches Datum 1950 (Geodätisches Lagebezugssystem)
<i>EMPA</i>	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
<i>FAA</i>	Federal Aviation Administration (Amerikanische Luftfahrtbehörde)
<i>FCS</i>	Flight Calibration Services
<i>FLG</i>	Fluglärmgesetz
<i>Flugbahn</i>	Orts- und Geschwindigkeitsangabe des dreidimensionalen Flugweges im Raum
<i>FLULA2</i>	Fluglärmrechnungsprogramm der EMPA Dübendorf
<i>Footprint</i>	Fluglärmbelastung als Folge einer einzelnen Flugbewegung
<i>FT</i>	Code für Richtcharakteristik mit maximalem Abfluggewicht
<i>ft</i>	Fuss; 1 ft = 0.3048 m
g_i	Bewertungsfaktoren für Tag- und Nachtflüge
<i>GPS</i>	Global Positioning System
<i>HLUG</i>	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
<i>ILS</i>	Instrumenten-Landesystem
<i>INM</i>	Integrated Noise Model (Fluglärmrechnungsprogramm der amerikanischen Luftfahrtbehörde FAA)
L_{AE}	Ereignispegel
$L_{AS}(t)$	A-bewerteter und mit der Zeitbewertung SLOW gemessener Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Zeit t.
L_{ASmax}	Maximalwert von $L_{AS}(t)$
L_{AZ}	Einzelereignispegel gem. DIN 45'643-1
L_{den}	Day Evening Night Pegel
L_{eq}	Energieäquivalenter Dauerschallpegel (zur Abgrenzung gegenüber $L_{eq(4)}$ auch als $L_{eq(3)}$ bezeichnet)
$L_{eq(3)}$	Mittelungspegel
$L_{eq(4)}$	Äquivalenter Dauerschallpegel mit Verdoppelungsparameter q=4
$L_{eq(4)_FLG}$	Äquivalenter Dauerschallpegel mit Verdoppelungsparameter q=4 und Tag/Nacht Gewichtung gemäss FLG
L_{max}	Maximalpegel
<i>MP</i>	Messpunkt
<i>MTOW</i>	Maximales Abfluggewicht
<i>N1/N2</i>	Verhältnis zwischen Anzahl gemessener Überflüge und der Anzahl aller Überflüge
<i>NATx</i>	Noise Above Threshold mit $L_{ASmax} \geq x$ dB

<i>NLR</i>	National Aerospace Laboratory
<i>NPD</i>	Noise-Power-Distance Table
<i>Polarwinkel</i>	Winkel zwischen Bezugsrichtung und Flugzeuglängsachse bzw. Tangentialvektor zur Flugbahn.
<i>Profil</i>	Höhen- und Geschwindigkeitsangabe der Flugbahn in Funktion der abgewickelten horizontalen Flugdistanz
<i>q</i>	Halbierungsparemeter für Mittelungspegel
<i>RC</i>	Richtcharakteristik
<i>RDF</i>	Regionales Dialogforum
<i>SLOW</i>	Zeitkonstante für die Messung von Fluglärm
<i>t₁₀</i>	Zeitspanne, während der der Schalldruckpegel $L_{AS}(t)$ um nicht mehr als 10 dB unter dem Schalldruckpegelmaximum L_{ASmax} liegt
<i>USG</i>	Umweltschutzgesetz
<i>UTM</i>	Universale Transverse Mercator (Koordinatensystem)
<i>VG</i>	Code für Richtcharakteristik mit mittlerem Abfluggewicht
<i>WGS84</i>	World Geodetic System 1984 (Geodätisches Lagebezugssystem)

11.3 Beilagenverzeichnis

Beilage	Bezeichnung, Inhalt
Beilage 1	Definition der wichtigsten Lärmmasse
Beilage 2	Übersicht Messpunkte
Beilage 3	Flugzeugtypen: Schallpegel, Anzahl Starts und Schallenergie
Beilage 4	Messtechnische Beurteilung einzelner Mikrofonstandorte
Beilage 5	Zusammenfassung der Antworten zu Monitoring
Beilage 6	Vergleich verschiedener Messungen in Neu-Isenburg
Beilage 7	Vergleich der gemessenen Flugprofile mit Geometriedaten gemäss DES
Beilage 8	Kenndaten zur Basisimulation mit FLULA2
Beilage 9	Vergleich der Lärmberechnungen mit AzB und mit FLULA2
Beilage 10	Charakteristische Kenndaten der Fluglärmmodelle AzB und FLULA2
Beilage 11	Vergleich gemessene und berechnete Mittelungspegel
Beilage 12	Vergleich mit Einzelflugsimulation

11.4 Kartenverzeichnis

Beilage	Bezeichnung, Inhalt
Karte 1	Vergleich berechneter Fluglärmbelastungen von HLUg und DLR für identischen Betriebszustand
Karte 2	Radarspuren (Fanomos) Start
Karte 3	Radarspuren (Fanomos) Landungen
Karte 4	Energieäquivalenter Dauerschallpegel $L_{eq(3),Tag}$; Berechnung FLULA2
Karte 5	$L_{eq(4)}$ nach DIN; Berechnung FLULA2
Karte 6	MATx, Nacht; Berechnung FLULA2
Karte 7	Vergleich berechneter Fluglärmbelastungen; Berechnungen HLUg nach AzB und AzB(modifiziert)
Karte 8	Vergleich berechneter Fluglärmbelastungen; Berechnung AzB(modifiziert) und FLULA2

11.5 Berechnungen HLUg für getrennte Ost- und Westbetriebsrichtungen

Auf Wunsch der Projektteams Anti-Lärmpakt und Optimierung wurden zusätzliche Berechnungen der Lärmbelastung getrennt nach Ost- und Westbetriebsrichtung durchgeführt. Diese Berechnungen sind nach Beschluss des RDF vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie HLUg durchgeführt worden. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle ausgewiesenen Betriebszustände untersucht. Die entsprechenden Karten der resultierenden Fluglärmbelastung sind diesem Bericht am Schluss beigelegt.

Lärmmaß	Betriebszustand
$L_{eq(3)}$	Westbetrieb Tag
$L_{eq(3)}$	Ostbetrieb Tag
$L_{eq(4)_FLG}$	Westbetrieb Tag/Nacht
$L_{eq(4)_FLG}$	Ostbetrieb Tag/Nacht