

Schlussbericht

Einzelaufgabe 1636
**„Abschätzung des Lärminderungspotenzials
wetterabhängiger Flugrouten“**

Programmschwerpunkt 1600
„Lärmoptimierte An- und Abflugverfahren“ (LAnAb)

Programmbereich 1
„Gemeinsame Verfahren und Methoden“

Forschungsverbund
„Leiser Verkehr“

bearbeitet von
Dietrich Heimann, Martina Kästner, Reinhard Blumrich
DLR Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen,
26 April 2005



Inhaltsverzeichnis

I Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung
2. Voraussetzungen des Vorhabens
3. Planung und Ablauf des Vorhabens
4. Wissenschaftliche und technische Ausgangssituation
5. Zusammenarbeit

II Eingehende Darstellung

1. Erzielte Ergebnisse
 - 1.1 Datenbasis
 - 1.1.1 Radardaten der DFS
 - 1.1.2 Meteorologische Daten
 - 1.1.3 Fluglärmdaten der FMG
 - 1.2 Methode
 - 1.2.1 Emission – Transmission – Immission
 - 1.2.2 Bestimmung des Vertikalprofils der effektiven Schallgeschwindigkeit
 - 1.2.3 Bestimmung der Emissionsposition des Flugzeuges
 - 1.2.4 Isolation des Brechungseffekts
 - 1.3 Statistische Auswertung
 - 1.4 Bewertung
 - 1.4.1 Meteorologisch-akustische Interpretation
 - 1.4.2 Relevanz für die Lärminderung durch wetterabhängige Flugrouten

Danksagung

Liste der Abbildungen

I Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Die Ausbreitung des Schalls wird entscheidend von meteorologischen Faktoren beeinflusst. Geeignete Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit und der Temperatur können zu einer Brechung der Schallwellen führen, es entstehen dann akustische Schattenzonen oder Mehrfachreflexionen am Boden (s.a. Abb. 11). Die Temperatur und Feuchte führen zu einer frequenzabhängigen Absorption. Die Turbulenz in der Atmosphäre hat eine Streuung der Schallwellen zur Folge.

Ziel des Einzelvorhabens ist der Nachweis meteorologisch bedingter Ausbreitungseffekte in routinemäßig gemessenen Fluglärm Daten, wodurch eine Abschätzung des Potenzials zur Lärminderung durch wetterabhängig gewählte Flugrouten möglich wird. Dabei soll die natürlich vorhandene Schalldämpfung in der Atmosphäre bei der Wahl einer lärmarmen Flugroute ausgenutzt werden.

2. Voraussetzungen des Vorhabens

Das Vorhaben wurde am Institut für Physik der Atmosphäre durchgeführt, an dem seit Ende der 90er Jahre eine hohe Kompetenz in atmosphärischer Akustik aufgebaut wurde.

Das Einzelvorhaben wurde in Kooperation mit der Flughafen München GmbH, der Deutschen Flugsicherung GmbH (FMG), dem Deutschen Wetterdienst (DWD) und der „Meteorologie in München“ im Department Physik der Ludwig-Maximilian Universität München (MIM) durchgeführt, von denen die benötigten Daten bereitgestellt wurden.

Am Institut für Physik der Atmosphäre wurde das Vorhaben mit 925 Personalstunden, verteilt auf 2 Jahre und 4 Monate durchgeführt. 22.000 € standen für Unteraufträge an FMG und MIM zur Verfügung.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Phasen	Partner	Plan (Monate)	Ist (Monate)
Vorbereitung	DLR-IPA	01	01
Datensammlung	DLR-IPA, FMG	02 - 09	02 - 09
Erstellung von Auswertewerkzeugen	DLR-IPA	02 - 12	02 - 12
Auswertung	DLR-IPA	12 - 18	12 - 24
Darstellung und Bewertung der Ergebnisse	DLR-IPA, FMG	19 - 24	25 - 28

4. Wissenschaftliche und technische Ausgangssituation

Der am Flugzeug emittierte Lärm breitet sich durch die Atmosphäre zum Ohr des Empfängers oder zum Schallmesspegel aus (Transmission), wobei der Schall durch Absorption an Luftmolekülen entlang seines Weges gedämpft wird. Andere Prozesse, die die Schallausbreitung im Freien beeinflussen, sind Refraktion (Brechung), Diffraktion (Beugung), Streuung (Turbulenz) und Reflexion am Boden. Bei günstigen meteorologischen Bedingungen, nämlich einer Temperaturabnahme mit der Höhe und einer Schallausbreitung entgegen dem Wind, entsteht durch Refraktion (Aufwärtsbrechung) eine akustische Schattenzone, in der der Lärmpegel stark gemindert ist. Je stärker der Wind gegen die Schallausbreitungsrichtung weht und je niedriger das Flugzeug fliegt, desto näher befindet sich der Beginn der Schattenzone am Fußpunkt des Flugzeugs (Abb. 1). Diffraktion und Turbulenz sorgen dagegen für eine Schallausbreitung in die Schattenzone hinein. Die einzelnen Prozesse tragen zu einer natürlichen Dämpfung der Lärmausbreitung bei.

Da akustische Schattenzonen natürlich auftreten können, kann man ihr Vorhandensein nutzen, um bewohnte Gebiete vor Fluglärm zu schützen, indem geeignete Flugrouten gewählt werden. Selbstverständlich steht bei der Beurteilung die Sicherheit der Flugmanöver und die Fliegbarkeit der Routen im Vordergrund. Dennoch soll hier unter diesen Rahmenbedingungen die offene Frage geklärt werden, wie groß das Potenzial ist, eine von den meteorologischen Bedingungen abhängige Flugroutenwahl durchzuführen (Abb. 1).

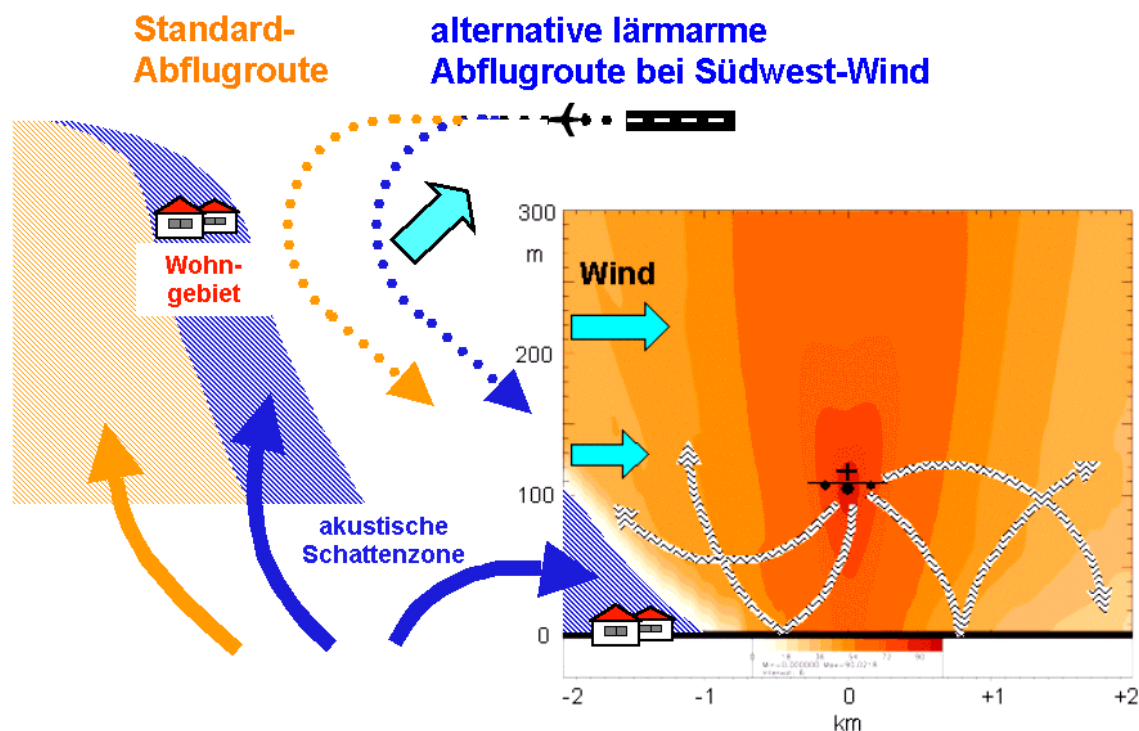


Abb. 1: Beispiel der Wahl einer lärmarmen Flugroute (blau) unter Berücksichtigung natürlicher Schalldämpfung in der Atmosphäre.

Im Rahmen des Vorhabens sollte der meteorologische Dämpfungseffekt in den Daten des Routine-Lärmmessnetzes am Flughafen München nachgewiesen werden. Es bestand die Arbeitshypothese, dass eine weitere Verfolgung des Themas „Lärminderung durch wetterabhängige Flugrouten“ nur dann sinnvoll ist, wenn dieser Nachweis gelingt. Es war von Beginn des Projektes an klar, dass der Datensatz eine große Unsicherheit bzgl. der

Lärm-Emissionsstärke in sich birgt, da wesentliche Einflussgrößen auf die Emission unbekannt sind.

Es bestand aber die Hoffnung, dass durch die große Datenmenge von ca. 180000 Einzel-Lärmereignissen und geeignete statistische Auswerteverfahren, der Einfluss eines Teils der Unsicherheiten eliminiert werden könnte.

5. Zusammenarbeit

Die Durchführung des Vorhabens wurde durch die reibungslosen Kooperation verschiedener Organisationen und durch die verantwortlichen Personen gewährleistet und getragen. Die Zusammenführung der sich ergänzenden Datensätze der Flughafen München GmbH (FMG), der Deutschen Flugsicherung GmbH (DFS), der „Meteorologie in München“ (MIM) der Ludwigs-Maximilians-Universität München und des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ergaben einen einzigartigen Datenschatz, der mit den neu erstellten Auswertewerkzeugen neue Erkenntnisse ermöglicht.

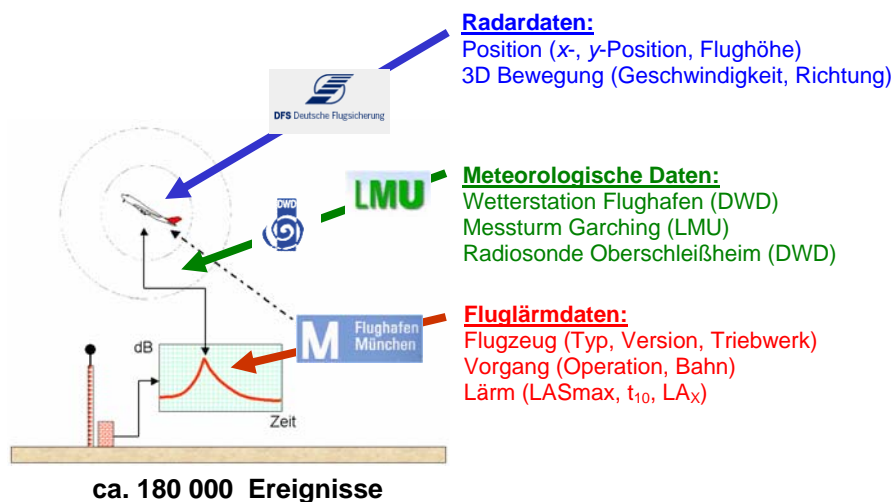


Abb. 2: Synchronisation verschiedener Datensätze von FMG, DFS, LMU-MIM und DWD.

II Eingehende Darstellung

1. Erzielte Ergebnisse

1.1 Datenbasis

Die Untersuchungen beziehen sich auf den Flughafen "Franz-Joseph-Strauß" (ICAO-Kennung: EDDM, IATA-Kennung: MUC), der ca. 35 km nordöstlich der Landeshauptstadt München liegt (Abb. 3). Er verfügt über zwei parallele, jeweils 4000 m lange Start- und Landebahnen, die 2.3 km voneinander entfernt und um 1.5 km zueinander versetzt sind. Dies ermöglicht einen Parallelbetrieb, sodass pro Stunde bis zu 80 Flugzeuge starten oder landen können. Die Nordbahn hat die Bezeichnungen 08L und 26R, die Südbahn 08R und 26L.

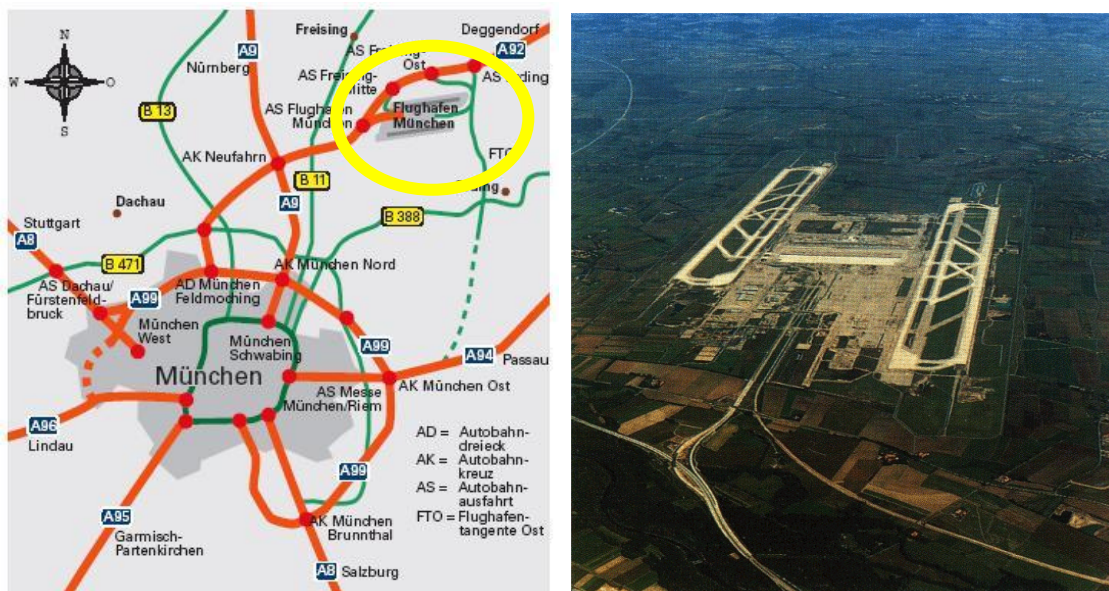


Abb. 3: Lage (links) und Luftaufnahme des Flughafen Münchens (rechts).

Die verwendeten Daten werden aus drei verschiedenen **Datenquellen** kombiniert:

- Flugzeugpositionsdaten der Deutschen Flugsicherung (DFS)
- Meteorologische Daten des Deutschen Wetterdiensts (DWD) und der Meteorologie in München (MIM) der LMU
- Fluglärmdaten der Umweltschutzabteilung der Flughafen München GmbH (FMG)

Die rund 356.000 Starts und Landungen im Jahr 2003 am Flughafen München (MUC) werden am häufigsten von den **Flugzeugtypen** Airbus A 300-600 („A306“), A 320-200 und A 320-300 („A320“), A 340 („A340“) und Boeing B 737-300 („B733“) und B 767-300 („B763“) ausgeführt. Diese Untersuchung beschränkt sich auf diese häufigsten Flugzeugtypen, dennoch ist das Datenmaterial außerordentlich groß. Es werden insgesamt 180.054 Lärmereignisse berücksichtigt.

Der untersuchte **Zeitraum** ist das gesamte Jahr 2003. Dadurch wird gewährleistet, dass sowohl Sommer- wie auch Wintermonate in die Untersuchung eingehen und ein breites

Spektrum der meteorologischen Bedingungen in unserer variablen Witterung abdecken. Die große Anzahl von Lärmereignissen ist ein großer Vorteil, um bei der statistischen Auswertung signifikante Ergebnisse zu erzielen, sofern ein Effekt aufgrund der Meteorologie nachweisbar ist.

1.1.1 Radardaten der DFS

Für die oben genannten Flugzeugtypen wurden von der DFS folgende Bahndaten im Abstand von 5 s zur Verfügung gestellt:

- Flugidentitätsnummer
- Zeitpunkt in hh:mm:ss MEZ, bzw. MSZ
- x -Position bezogen auf Radarantenne in 1/64 nm \approx 29 m
- y -Position bezogen auf Radarantenne in 1/64 nm \approx 29 m
- Flugniveau (*flight level*) in 100 ft (100 ft \approx 30 m)
FL ist immer auf den Druck von 1013 hPa (ICAO-Atmosphäre) bezogen
- Fluggeschwindigkeit (*ground speed*) in Knoten
(1 kt \approx 1.852 km/h \approx 0.5144 m/s)
- Flugrichtung (*heading*) in Grad

Die verwendeten Daten sind nicht die verschlüsselten Originaldaten der DFS, sondern sie wurden mit Hilfe von Software der Fa. Topsonic, Würselen, bei der FMG in eine lesbare Form konvertiert.

Die Radarposition (Südantenne) hat die geografische Breite $48^{\circ}18'39.87''$ N und die geografische Länge $11^{\circ}48'52.06''$ E und befindet sich in einer Höhe von 448 m ü. NN. die Antennenhöhe ist ca. 45 m ü. Grund. Eine Radarumdrehung (360°) benötigt 4.3 s, sodass die Flugzeugpositionsdaten in diesem zeitlichen Abstand zur Verfügung stehen. Bei einer Fluggeschwindigkeit von 70 m/s entspricht dies einem Abstand der Positionsdatenpunkte von ca. 300 m. Zusätzlich zur Horizontalposition wird auch die Höhe des Flugzeugs angegeben, die vom Flugzeug-Transponder übermittelt werden. Die Höhen beziehen sich auf die ICAO-Standardatmosphäre.

Aus den Positionsdaten wird die Sink-/Steiggeschwindigkeit (*climb/sink rate*) sowie die Kurvenrate (*turn rate*) des Flugzeugs bestimmt. Hierfür wurde eine Mittelung über 5 Positionsdatenpunkte verwendet.

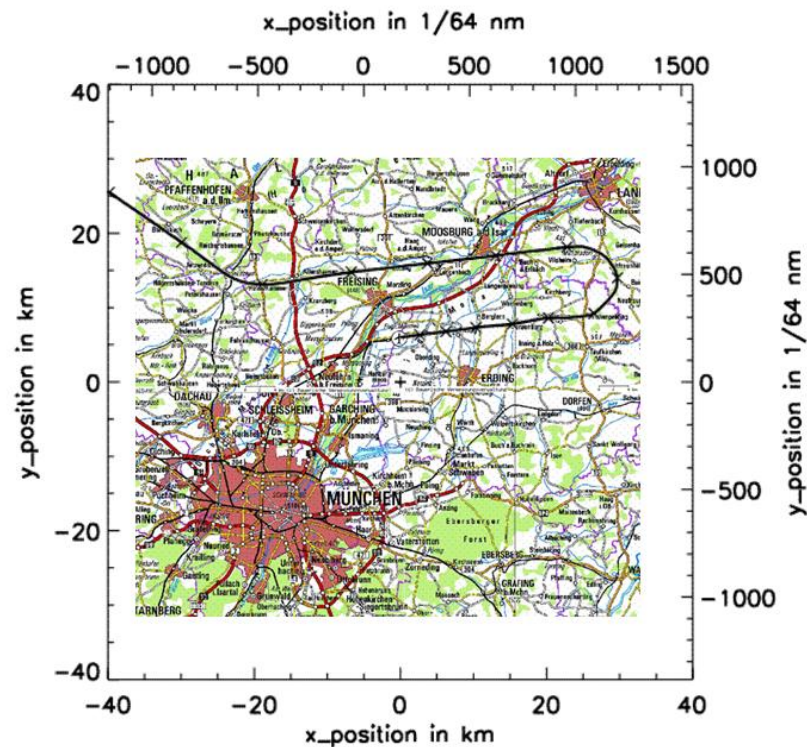


Abb. 4: Flugweg einer B733 von NW beim Landeanflug von Osten, × = Minutenmarken.

Abb. 4 zeigt den Flugweg einer Boeing 737-300 (B733), die am 1.1.2003 zwischen 15:15 und 15:30 MEZ aus NW kam und von Osten auf der Nordbahn 26R landete. Die Abstände zwischen den Minutenmarken (×) werden beim Landeanflug kürzer, sie zeigen die Verlangsamung des Flugzeuges an.

1.1.2 Meteorologische Daten

Die meteorologischen Daten umfassen Bodendaten und Höhendaten.

Die **Bodendaten** stammen von der DWD Wetterstation 10870, Flughafen München, wie sie an allen deutschen Flughäfen zur Verfügung stehen. Sie enthalten u. a. die hier verwendeten Parameter, die stündlich gemessen werden:

- Luftdruck 2 m in hPa Auflösung: 0,1 hPa
- Temperatur 2 m in °C Auflösung: 0,1 K
- Luftfeuchte 2 m in % Auflösung: 1%
- Windstärke 10 m in m/s Auflösung: 1 m/s
- Windrichtung 10 m in Grad Auflösung: 10 Grad

Die DWD-Daten enthalten zusätzlich auch Angaben zu Niederschlag, Gewitter, Nebel oder Schneedecke. Die Daten der DWD Wetterstation am Flughafen können für die gesamte Umgebung des Flughafens (Umkreis 20 km) als repräsentativ angesehen werden

Zusätzlich werden von der FMG die Temperatur in 2 m ü. Gr. und der Wind in 10 m ü. Gr. an drei Stationen mit automatischen Stationen der Fa. Thies gemessen: Hallbergmoos, Massenhäuser und Glasern, wobei die Windmessung in Glasern durch inzwischen hohen Baumbestand nicht mehr brauchbar ist.

Die **Höhendaten** werden aus der Nähe des Flughafens München zweimal täglich (00 und 12 UTC) von der DWD-Radiosondenstation 10868 Oberschleißheim (ca. 20 km südwestlich des Flughafens), als Vertikalprofile von Temperatur, Wind und Feuchte gemessen. Zusätzliche Vertikalprofile des Windes werden mit Pilotballonen 6-stündig (00, 06, 12, 18 UTC) mit einer Vertikalauflösung von etwa 300 m gemessen.

In Garching, ca. 13 km südwestlich des Flughafens, betreibt die MIM der LMU einen Messmast mit 50 m Höhe im Dauerbetrieb. In acht verschiedenen Höhen 0.20 m, 0.50 m, 1 m, 2 m, 5 m, 20 m und 50 m werden Temperatur, Feuchte und Windgeschwindigkeit gemessen, die Windrichtung wird in drei verschiedene Höhen, 10 m, 20 m und 50 m ü. Grund, bestimmt. Die zeitliche Auflösung dieser Daten beträgt 1 min. Die Daten vom Garchinger Mast werden in mittlerer Ortszeit (MOZ (MEZ-13 min)) angegeben, wie sie für Strahlungsmessungen relevant sind. Aus diesen Daten wurden UTC-Stundenmittel berechnet, um die turbulenten Fluktuationen in den Daten zu eliminieren.

Die Abb. 5 zeigt exemplarisch den Tagesgang des vertikalen Wind- und Temperaturprofiles (01. Jan. 2003) am Messmast in Garching. Unterhalb von 10 m über Grund ist das Windprofil durch umliegende Gebäude gestört.

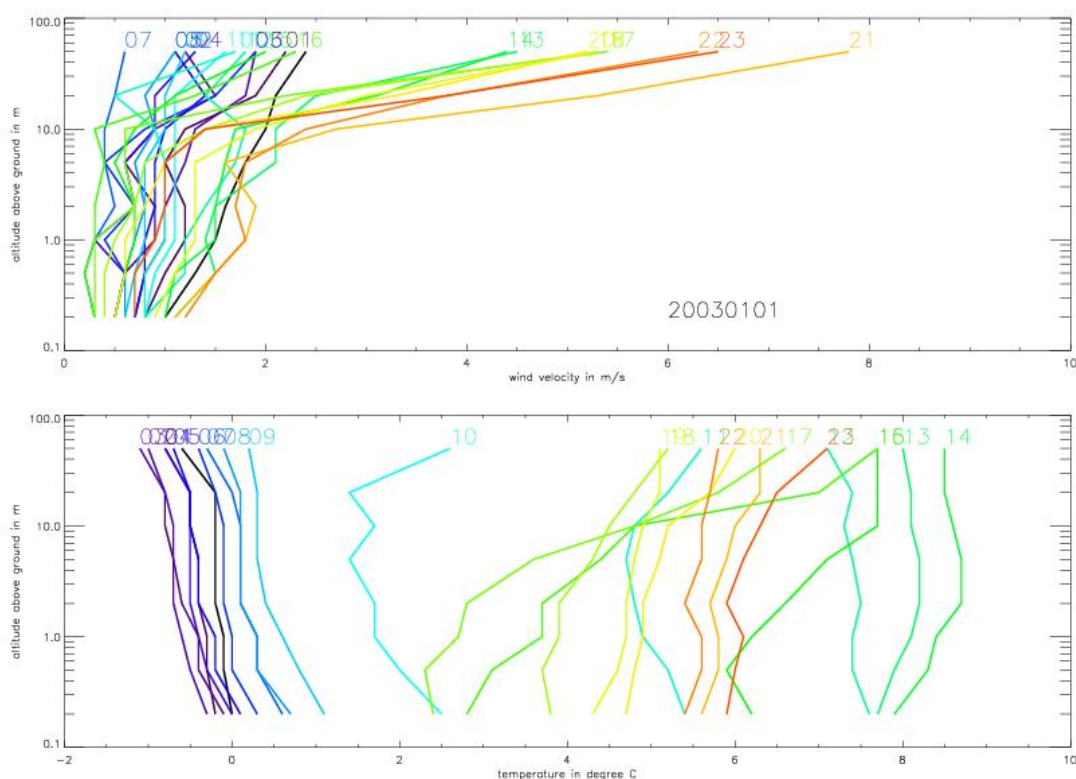


Abb. 5: Wind- und Temperaturprofile vom 01.01.2003 vom Garchinger Messturm, UTC-Stundenmittel (farbcodiert).

1.1.3 Fluglärmdaten der FMG

Die Flughafen München GmbH (FMG) betreibt eine Fluglärmüberwachungsanlage mit 16 Messstellen in einem Umkreis von rund 20 km um den Flughafen. Die Standorte der Messstellen sind in Abb. 6 zusammen mit den Hauptflugrouten dargestellt. Sie befinden sich jeweils unter oder nahe der jeweiligen Flugroute. Die Geo-Koordinaten der Messstationen sind im Anhang zu finden.



Abb. 6: FMG-Messstellen (violett) und Flugrouten am Flughafen München.

Jede dieser Messstellen besteht aus einem 6 m hohen Mast, einem Mikrophon an der Spitze des Mastes, sowie einem Messstellenrechner (Abb. 7).



Abb. 7: Typische Fluglärmmessstellen: Eitting (links) und Schwaig (rechts).

Aus den Rohdaten werden die auf ein Lärmereignis bezogene Kenngrößen L_{ASmax} , L_{AX} und t_{10} abgeleitet. Diese sind in DIN 45643 Teil1 bzw. ISO 3891 definiert

L_{ASmax} Maximalpegel, Frequenzbewertung A, Zeitbewertung ‚slow‘

L_{AX} Einzelereignispegel (zeitlich gemittelt)

t_{10} Zeitspanne mit $L_{AS} \geq L_{ASmax} - 10$ dB

Es gilt die Beziehung

$$L_{AX} = L_{ASmax} + 10 \lg(t_{10} / t_{ref}) \text{ dB} - 3 \text{ dB} \quad \text{mit } t_{ref} = 1 \text{ s}$$

Als Lärmereignis gelten nur diejenigen Ereignisse mit $L_{ASmax} \geq 60$ dB bei einem Bodenwind unter 8.3 m/s.

Zusätzlich zu den akustischen Daten, enthalten die FMG-Daten für jedes Lärmereignis:

- Name der Messstation
- 3-D-Entfernung Messstation – Flugzeug in m
- Höhenwinkel (Elevation) Messstation – Flugzeug in $1/10^\circ$
- Zeitpunkt des max. Pegelwertes $t(L_{ASmax})$ in hh:mm:ss ME(S)Z
- Flug-Identifikationsnummer
- Start bzw. Landung
- Flugzeugtyp
- Start- bzw. Landebahn
- An- bzw. Abflugstrecke

Jedem Lärmereignis ist eine Uhrzeit (Zeitpunkt des Maximalpegels L_{ASmax}) und eine Flug-Identifikationsnummer zugeordnet. Die Flug-Identifikationsnummer dient der Zuordnung der Flugbahnkoordinaten des verursachenden Luftfahrzeugs und findet sich auch in der Datenbank der DFS.

Insgesamt wurden während des Jahres 2003 an den 16 Messstationen ca. 180.000 Lärmereignisse registriert. Die Lärmereignisse sind nicht gleichmäßig auf die 16 Stationen verteilt, (Abb. 8), besonders häufig wird an den Stationen Eitting (Nr. 5), Pulling (Nr. 13) und Glaslern (Nr. 7) der Geräuschpegel L_{ASmax} von 60 dB überschritten. Eitting liegt östlich des Flughafens zwischen den beiden Flugbahnen, welche dort beide zum Lärm beitragen, direkt unter der Flugbahn liegen Glaslern im Osten (08L (Abflug) bzw. 26R (Anflug)) und Pulling im Westen (26R (Abflug) bzw. 08L (Anflug)); andere Stationen, die über 1 km seitlich der Flugbahn liegen, z.B. Mintraching (Nr. 11) oder Neufahrn (Nr. 12) erhalten deutlich seltener lauten Fluglärm.

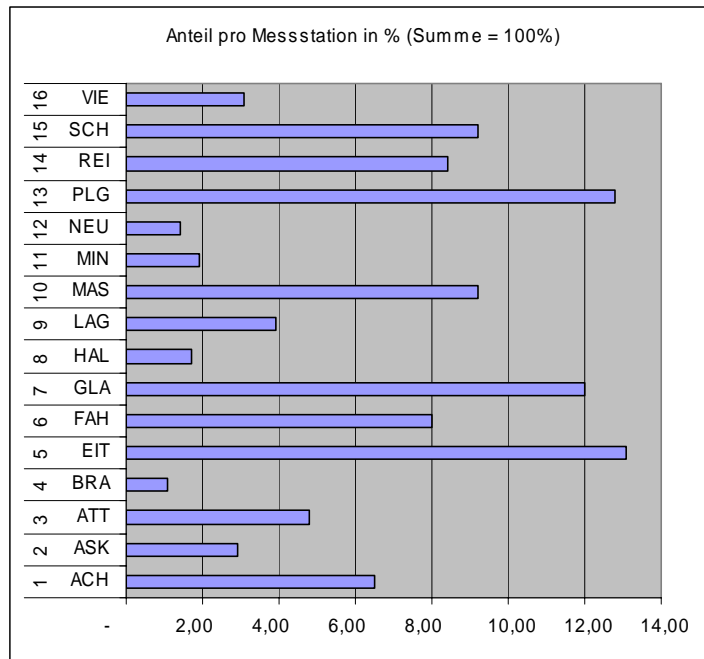


Abb. 8: Häufigkeit der Lärmereignisse in % (100% = 180.054) für 2003.

1.2 Methode

1.2.1 Emission – Transmission - Immission

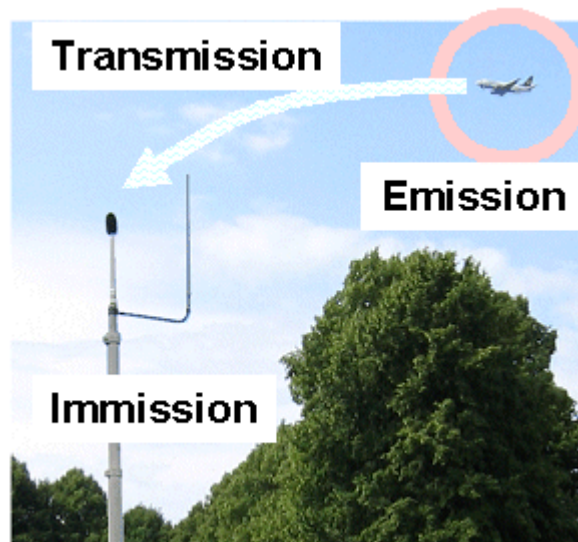


Abb. 9: Emission – Transmission – Immission.

Fluglärm entsteht - im Gegensatz zum Straßen- oder Schienenverkehrslärm – nicht in Bodennähe, sodass die **Lärmemission** eines fliegenden Flugzeugs nicht ohne großen Aufwand gemessen werden kann und daher weitgehend unbekannt bleibt. Die Emission setzt sich einerseits aus dem Triebwerks- und Strahlärm zusammen, der im Wesentlichen von Schub abhängt. Andererseits trägt auch die Umströmung des Flugzeugs, besonders bei ausgefahrenem Fahrwerk und Klappen, zur Lärmemission bei. Dieser Lärmemissionsanteil hängt von der Geschwindigkeit und der Konfiguration des

Flugzeugs ab. Angaben zur Ermittlung der wirklichen Emission (Schalleistungspegel) aller Lärmereignisse sind nicht vorhanden und können auch nicht rekonstruiert werden.

Die Schallemission ist überdies von der Abstrahlrichtung abhängig (Richtcharakteristik). Die Richtcharakteristik hängt von der Geometrie des Flugzeugkörpers und der Lage der Triebwerke ab. Während die horizontale Richtcharakteristik relativ gut bekannt ist, gilt dies nicht für die vertikale Richtcharakteristik.

Die **Lärmtransmission**, d.h. die Ausbreitung der Schallwellen durch die Atmosphäre, wird durch geometrische Faktoren, die Luftabsorption, die Brechung (Refraktion) und die Streuung beeinflusst. Bei flacher Schallausbreitung spielen auch Bodeneffekte eine große Rolle.

Auf Grund der **geometrischen Ausbreitung** einer Kugelwelle vermindert sich der maximale Pegel (und somit L_{ASmax}) je Abstandsverdoppelung um -6 dB bzw. der energieäquivalente Dauerpegel (und somit L_{AX}) um -3 dB.

Die **Luftabsorption** kann entsprechend ISO 9613-1 frequenzabhängig als Dämpfungskoeffizient in dB/km berechnet werden. Typische Werte für die Schalldämpfung sind z.B. -5 dB/km für 1000 Hz, hohe Frequenzen werden sehr viel stärker gedämpft als niedrige, weiter ist die Dämpfung von der Temperatur und der Luftfeuchte abhängig.

Die **Schallwellenbrechung** (Refraktion) hängt weitgehend vom vertikalen Gradienten der so genannten effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} ab, d.h. der Summe aus der Schallgeschwindigkeit in ruhender Luft c und der Windkomponente in Schallausbreitungsrichtung u . Die Schallgeschwindigkeit in ruhender Luft ist wiederum eine Funktion der Lufttemperatur T .

$$c_{eff} = c(T) + u = \sqrt{401 \text{ K}^{-1} T} + u$$

Die Windkomponente in Schallausbreitungsrichtung $u = V \cos(\alpha)$ ergibt sich aus der Windgeschwindigkeit V und dem Winkel α zwischen der Windrichtung und der Richtung der Schallausbreitung. Letztere wird durch die Verbindung zwischen dem Fußpunkt des Flugzeugs zum Zeitpunkt der Schallemission und der Position der Messstation bestimmt (Abb. 10).



Abb. 10: Horizontalwinkel zwischen Wind, Flugzeug und Messstation. Der hellblaue Pfeil deutet die Windkomponente in Schallausbreitungsrichtung u an.

Der Vertikalgradient der effektiven Schallgeschwindigkeit $\partial c_{eff} / \partial z$ führt zu einer Krümmung der Schallstrahlen (Abb. 11). Bei Mitwindausbreitung und/oder Temperaturzunahme mit der Höhe (Inversion) findet eine Abwärtsbeugung statt, die wiederum Mehrfachreflexionen am Boden und die Bildung von Kaustiken mit entsprechend guter Hörbarkeit zur Folge haben kann. Umgekehrt tritt bei Gegenwindausbreitung und/oder Temperaturabnahme mit der Höhe Aufwärtsbrechung und die Bildung einer **akustischen Schattenzone** auf. In Letztere dringt Schallenergie nur durch **Beugung** oder **Streuung** ein, sodass der Schallpegel stark reduziert ist.

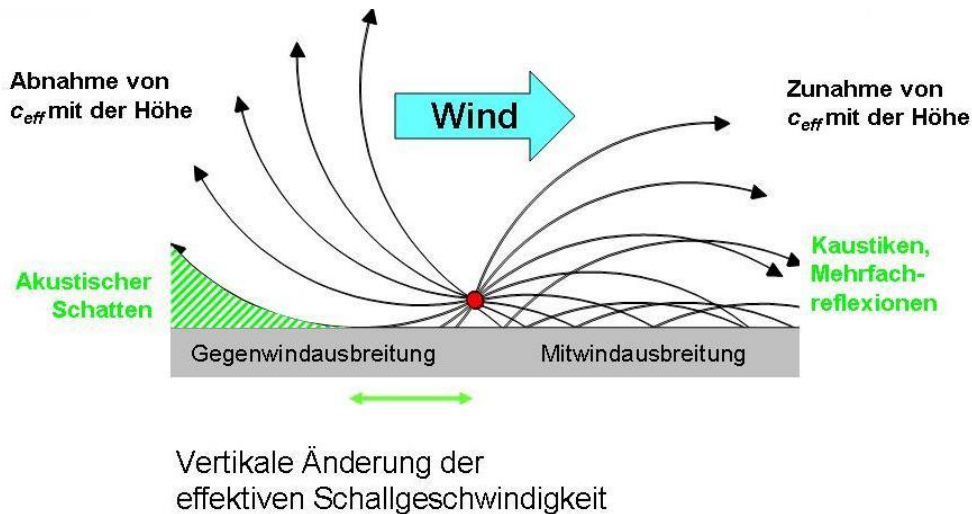


Abb. 11: Schallstrahlkrümmung (Refraktion) in Abhängigkeit von der Änderung der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} mit der Höhe.

Der Abstand zwischen dem Fußpunkt der Quelle und dem Beginn der Schattenzone ist umso geringer je niedriger die Quelle und je größer die Strahlkrümmung ist. Daher wirkt die Schallwellenbrechung insbesondere bei bodennahen Quellen (Straßen-, Schienenverkehrslärm) bereits in geringer Entfernung und ist Ursache für einen großen meteorologischen Einfluss auf den Lärm.

Lediglich der Windeinfluss auf die Schallwellenbrechung bietet ein Potential zur Lärminderung durch wetterabhängige Flugrouten, da alle anderen Einflussgrößen richtungsunabhängig sind

Die **Lärmimmission** wird durch verschiedene Lärmindikatoren (üblicherweise Schallpegel) ausgedrückt. Im Falle dieser Studie sind dies der Maximalpegel L_{ASmax} , der zeitlich gemittelte Einzelereignispegel L_{AX} , und die Zeitspanne t_{10} (siehe Abschnitt 1.1.3 dieses Kapitels) an den Messorten der FMG.

1.2.2 Bestimmung des Vertikalprofils der effektiven Schallgeschwindigkeit

Die vorhandenen meteorologischen Daten liefern das Vertikalprofil der effektiven Schallgeschwindigkeit zum Zeitpunkt eines Lärmereignisses nicht direkt.

Die Daten der *DWD-Station am Flughafen* beziehen sich nur auf eine Höhe über Grund (Temperatur: 2 m, Wind: 10 m). Die Daten des *Messmastes Garching* liefern zwar Vertikalprofile der Temperatur und des Windes, diese reichen aber nur bis 50 m Höhe und somit nicht bis in das Flugniveau (200 - 500 m über Grund). Die Daten der *Radiosondenstation Oberschleißheim* liefern zwar Vertikalprofile bis in das Flugniveau, ihre Vertikalauflösung ist aber mit ca. 200 bis 300 m nicht ausreichend. Zudem liegen die Daten nur alle 6 Stunden (Wind) bzw. 12 Stunden (Temperatur) vor, und damit i.d.R. nicht zeitnah am Lärmereignis.

Aus diesem Grund müssen folgende Annahmen getroffen werden:

die meteorologischen Werte der zu einem Lärmereignis gehörenden Stunde (UTC) werden als hinreichend zeitnah angesehen.

a) Die Vertikalgradienten der Windgeschwindigkeit zwischen Boden und Flugniveau sind mit der Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund (Wetterstation Flughafen) bzw. mit dem Windgeschwindigkeitsgradienten zwischen 20 und 50 m über Grund (Mast Garching) hoch korreliert.

b) Die Vertikalgradienten der Temperatur zwischen Boden und Flugniveau sind mit der Ausbreitungsklasse nach TA (Technische Anleitung) Luft der Wetterstation Flughafen München bzw. mit dem Temperaturgradienten zwischen 20 und 50 m über Grund (Mast Garching) mäßig korreliert.

c) Das Vertikalprofil des Windes zwischen dem Messniveau in 10 m über Grund (Wetterstation Flughafen) und dem Flugniveau wird durch das logarithmische Windgesetz (Prandtschicht) und die so genannte Ekman-Spirale (Ekman-Schicht) beschrieben.

Für den statistischen Vergleich zwischen den Lärmindikatoren und der Wettersituation werden drei alternative meteorologische Einflussparameter G gebildet, die ein Maß für den Vertikalgradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit darstellen:

$$G_{MIM} = \frac{\sqrt{410 \text{ K}^{-1} T_{50,MIM}} - \sqrt{410 \text{ K}^{-1} T_{20,MIM}}}{30 \text{ m}} + \frac{V_{50,MIM} - V_{20,MIM}}{30 \text{ m}} \cos(\alpha_{50,MIM})$$

$$G_{DWD, \text{gnd}} = \frac{\sqrt{410 \text{ K}^{-1} T_{50,MIM}} - \sqrt{410 \text{ K}^{-1} T_{20,MIM}}}{30 \text{ m}} + \frac{V_{10,DWD}}{10 \text{ m}} \cos(\alpha_{10,DWD})$$

$$G_{DWD, \text{air}} = \frac{\sqrt{410 \text{ K}^{-1} T_{50,MIM}} - \sqrt{410 \text{ K}^{-1} T_{20,MIM}}}{30 \text{ m}} + \frac{V_{\text{air},DWD}}{z_{\text{air}}} \cos(\alpha_{\text{air},DWD})$$

Die Zahlen im Index beziehen sich auf die Höhe über Grund (in m), wobei "air" die Flughöhe über Grund bedeutet. Der Index "MIM" bezieht sich auf den Messmast Garching, während sich der Index "DWD" auf die DWD-Wetterstation am Flughafen bezieht. Die Indizes beim Winkel α (zwischen Windrichtung und Ausbreitungsrichtung) beziehen sich auf die Herkunft der Windrichtung.

1.2.3 Bestimmung der Emissionsposition des Flugzeugs

Die mit dem gemessenen Lärmereignis (Zeitpunkt des Maximalpegels L_{ASmax} Immissionszeit) verknüpfte Flugzeugposition stimmt nicht mit der Position des Flugzeugs zum Zeitpunkt der dazugehörigen Emission (Emissionszeit) überein, da der Schall selbst eine gewisse Zeit t_r zwischen Flugzeug und Messstelle benötigt, wobei $t_r = r/c$. Hierbei ist r der Abstand zwischen Flugzeug und Messstelle und $c \approx 340$ m/s die Schallgeschwindigkeit. Eine Abschätzung ergibt, dass bei einem typischen Abstand zwischen Flugzeug und Messstelle von $r=1000$ m und einer mittleren Schallgeschwindigkeit von $c = 340$ m/s die Schalllaufzeit ca. 3 s beträgt, sodass bei einer mittleren Startgeschwindigkeit von 110 m/s eine Verschiebung der Flugposition um ca. 330 m, bei Landungen und einer mittleren Geschwindigkeit von 70 m/s eine Verschiebung um ca. 210 m jeweils nach hinten zu berücksichtigen ist. Für die Auswertung wird die Flugzeugposition zur Emissionszeit herangezogen und der Abstand r zur Messstelle, sowie Azimut und Elevation (Abb. 12) entsprechend neu bestimmt.

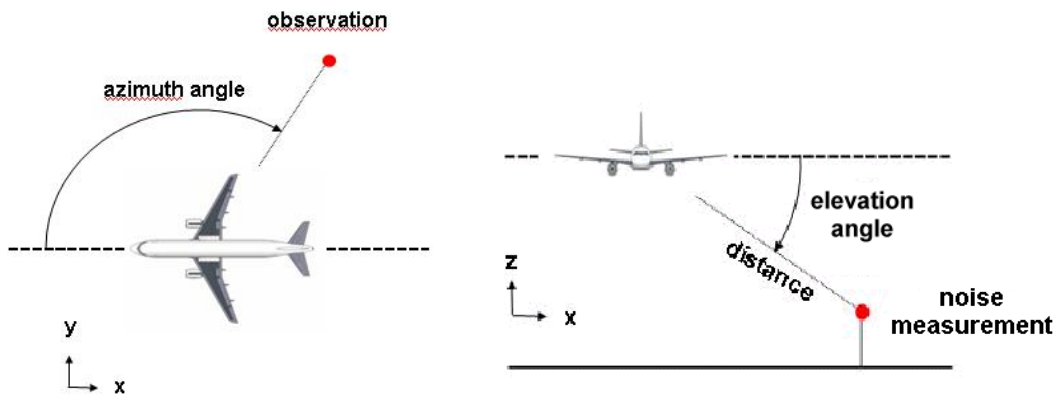


Abb. 12: Winkel zwischen Flugzeug und Messstelle (links: Azimut bzw. Seitenwinkel, rechts: Elevations- bzw. Höhenwinkel).

Bei turbulentem Wetter hat der Maximalpegel L_{ASmax} , der Immissionszeitpunkt und der sich daraus resultierende Emissionszeitpunkt einen gewissen Zufallscharakter. Abb. 13 zeigt den mit einer Sondermessung gewonnenen Pegelverlauf eines Vorbeifluges (Landeansatz gegen den Wind) an der Station Eitting. Während der Annäherung des Flugzeugs an den Messort breitet sich der Schall gegen den Wind aus. Bei $t = 35$ s tritt die Quelle aus der akustischen Schattenzone und der Pegel steigt nahezu schlagartig an. Danach folgen Variationen des Lärmpegels auf hohem Niveau, die von der Turbulenz in der Atmosphäre verursacht werden. Die zeitliche Lage und die Höhe des Maximalpegels L_{ASmax} (rot) ist eher zufällig. Es wäre durchaus möglich, dass bei gleicher Emission des Flugzeugs jedoch etwas anderer atmosphärischer Turbulenzsituation (Lage der Luftwirbel) das Maximum des Pegels etwa 13 s später erreicht worden wäre (violette Markierung). Dies hätte eine um ca. 1000 m verschobene Flugposition zur Folge. Während sich das Flugzeug nach dem Vorbeiflug wieder von der Messstelle entfernt breitet sich der Schall mit dem Wind aus (Mitwindausbreitung), sodass der Pegel relativ langsam auf ein Niveau unter 50 dB absinkt. Aus den in dieser Studie verwendeten Daten lässt sich der Pegelverlauf nicht mehr rekonstruieren. Daher ist auch die relative zeitliche Lage des Maximalpegels innerhalb der Zeitspanne t_{10} unbekannt.

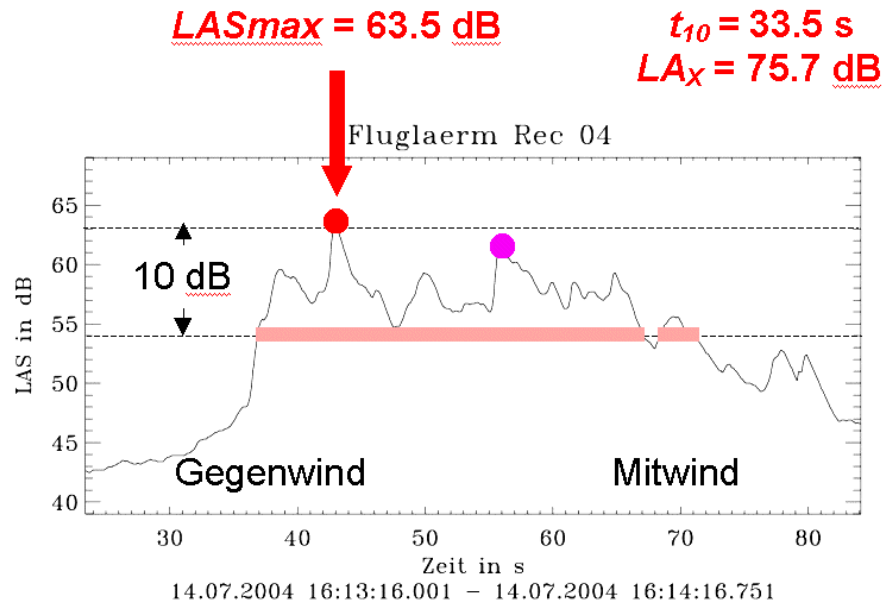


Abb. 13: Pegelverlauf eines Vorbeifluges (Landung) mit zeitlicher Lage und Betrag des Maximalpegels L_{ASmax} (rot) und der Zeitspanne t_{10} (rosa Linie). Der violette Punkt kennzeichnet ein sekundäres Pegelmaximum.

In Abb. 14 sind die Flugzeugpositionen landender B737-300-Flugzeuge abgebildet, für die bereits die Laufzeitkorrektur für die Schallausbreitung zum Zeitpunkt der L_{ASmax} -Registrierung berücksichtigt wurde. Die Streuung der Orte der Lärmemission erstreckt sich über 1 km entlang des Landepfades (hellblau) und kann mit der atmosphärischen Turbulenz zusammenhängen, wie es im vorigen Absatz ausführlich beschrieben wurde.

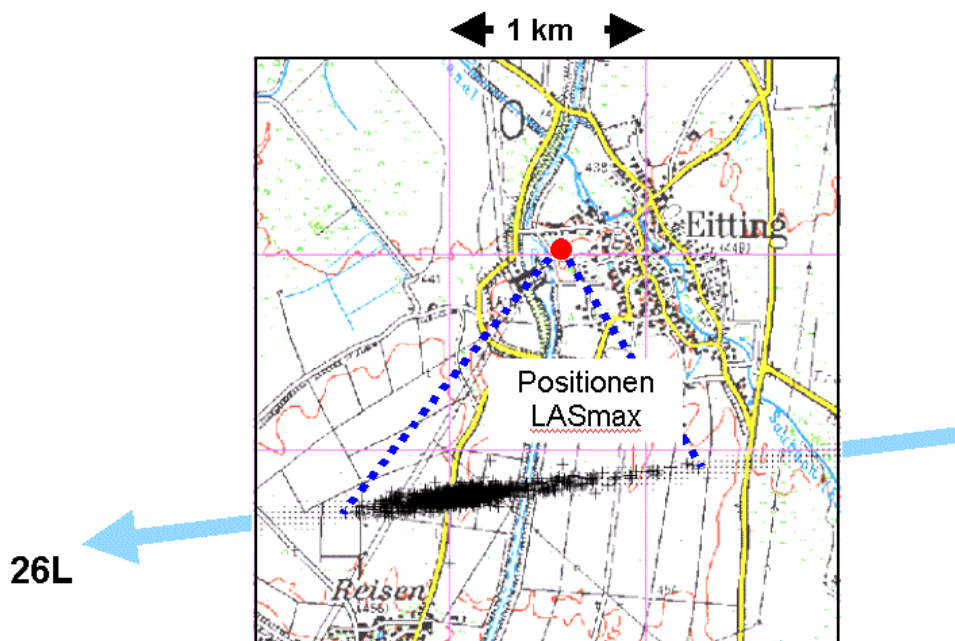


Abb. 14: Streuung der Flugzeugpositionen zum Zeitpunkt der L_{ASmax} -Registrierung an der Messstation Eitting unter Berücksichtigung der Laufzeit für die Schallausbreitung.

Die Zufälligkeit der Flugposition auf Grund der mehr oder weniger willkürlichen zeitlichen Lage des Emissionsortes hat auch erhebliche Auswirkung auf den Unsicherheit

bezüglich des Azimutwinkels und auf Grund der Richtcharakteristik auch auf die Emission.

1.2.4 Isolation des Brechungseffekts

Um den Brechungseffekt in den Lärmdaten zu isolieren, müssen die übrigen Einflüsse weitestgehend eliminiert werden. Hierbei handelt es sich um:

a) Einfluss der Emission

Bezüglich der Emission müssen pauschale Annahmen getroffen werden, d.h. es muss davon ausgegangen werden, dass Flugzeuge gleichen Typs bei gleicher Geschwindigkeit und gleicher Flugoperation (Anflug oder Abflug) eine vergleichbare Schallemission aufweisen. Zugleich müssen Ausreißer in den Daten ausgeschlossen werden.

Die Auswertung bezieht sich daher auf Kollektive mit jeweils folgenden Eigenschaften:

- gleicher Flugzeugtyp
- gleiche Flugbewegung (Start oder Landung)
- Schwankung im Abstand zwischen Flugzeug und Messstelle kleiner $\pm 3\sigma$
- Schwankung im Azimutwinkel kleiner $\pm 2\sigma$ (siehe Abb. 12 links)
- Schwankung im Elevationswinkel kleiner $\pm 2\sigma$ (siehe Abb. 12 rechts)
- Schwankung in Betrag der Kurvenrate kleiner 0.2 Grad/s

b) Einfluss des Abstandes zwischen Flugzeug und Messstelle

Wegen des geometrischen Ausbreitungseffekts hat der Abstand r zwischen Flugzeug und Messstelle eine große Bedeutung für den Schallpegel. Um diesen Einfluss auszuschließen wurden die Lärmindikatoren L_{ASmax} und L_{AX} auf eine einheitliche Entfernung von $r_o = 1000$ m bezogen. Dabei wurde L_{ASmax} entsprechend der Kugelwellenausbreitung (Amplitude proportional zu r^{-1}) und L_{AX} entsprechend der Zylinderwellenausbreitung (Amplitude proportional zu $r^{-1/2}$) korrigiert.

c) Einfluss der Luftabsorption

Die Luftabsorption trägt ebenfalls zur Entfernungsabhängigkeit des Pegels bei, wobei sie überdies auch von der aktuellen Temperatur und Feuchte abhängt. Die Luftabsorption wurde mit Hilfe der nach ISO 9613-1 berechneten Dämpfungskoeffizienten eliminiert, wobei Annahmen bezüglich des Frequenzspektrums der Quelle gemäß AzB (Anleitung zur Berechnung nach Fluglärngesetz) getroffen wurden.

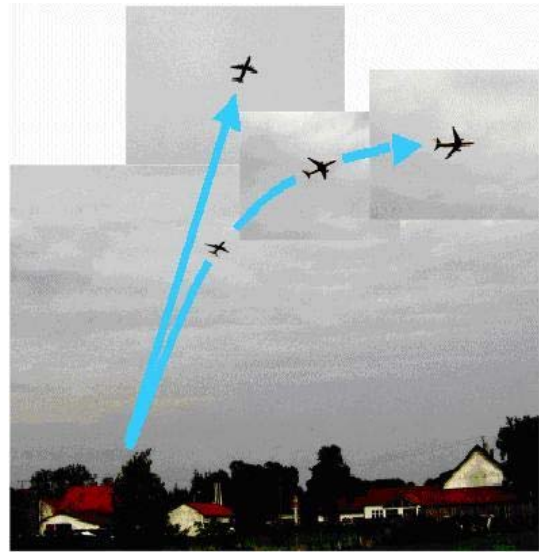
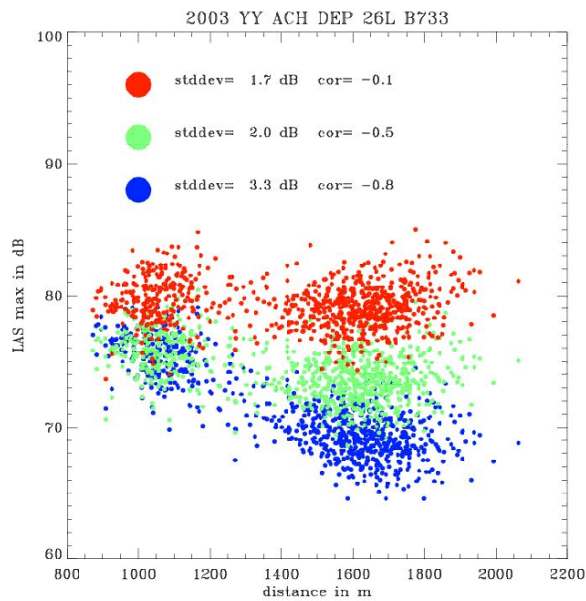


Abb. 15: links: Maximalpegel L_{ASmax} in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Flugzeug und Messstelle vor der Korrektur (blau), nach Abstandskorrektur (grün) und nach zusätzlicher Absorptionskorrektur (rot). Rechts: Abflüge (Startbahn 26L) aus der Perspektive der Messstation Acherling.

Die Abb. 15 zeigt exemplarisch das Ergebnis der Eliminierung des Abstands- bzw. Absorptionseinfluss für Lärmereignisse an der Station Acherling (Abflüge, Startbahn 26L, B737-300). Die Häufung der Ereignisse in den beiden Abstandsbereichen 900-1100 m und 1500-1800 m liegt an den unterschiedlichen Abflugrouten (Geradausabflüge haben einen geringeren Abstand). Während die L_{ASmax} - Originaldaten mit einem Korrelationskoeffizienten von -0.8 stark vom Abstand Flugzeug-Messstelle abhängen, reduziert sich der Zusammenhang nach der Abstandskorrektur auf eine Korrelation von -0.5 und nach zusätzlicher Eliminierung der Absorption auf -0.1 . Die Standardabweichung der L_{ASmax} - Werte reduziert sich dabei von 3.3 dB auf 2.0 bzw. 1.7 dB.

1.3 Statistische Auswertung

Zunächst werden die Zusammenhänge zwischen den **meteorologischen Parametern** und den **Flugbahndaten** untersucht (Abb. 16). Der größte Zusammenhang besteht dabei zwischen der Gegenwindkomponente des Windes (bezogen auf die Flugrichtung) und der Geschwindigkeit gegenüber der Luft (*air speed*). Letztere wurde auf Grund der aus den Positionsdaten abgeleiteten Fluggeschwindigkeit über Grund (*ground speed*) und der auf die Höhe des Flugniveaus extrapolierten Gegenwindkomponente bestimmt. Zwischen der *ground speed* und der Gegenwindkomponente ist eine hohe Korrelation zu erwarten. Die hier gefundene starke Abhängigkeit der *air speed* von der Gegenwindkomponente kann zwei Ursachen haben. Entweder ist die Extrapolation der in Bodennähe gemessenen Windgeschwindigkeit auf das Flugniveau mit einem systematischen Fehler behaftet oder die *air speed* ist tatsächlich von Gegenwindkomponente abhängig. Vermutlich trifft beides zu. Zu mindestens wird bei hoher Windgeschwindigkeit wegen der damit auch erhöhter Turbulenz und Windscherung her auch mit erhöhter *air speed* geflogen um ein Abreißen der Strömung (*stall*) aufgrund plötzlicher Änderungen der Windgeschwindigkeit zu vermeiden.

2003

	hdwd air	crwd air	hdwd gnd	crwd gnd	temp gnd
elev	16	21	16	21	18
azim	18	21	13	18	35
aspd	94	59	89	64	54
clim	56	29	48	32	37
turn	16	5	18	10	13

Fig. 16: Prozentualer Anteil der signifikant von Null verschiedenen partiellen Korrelationen zwischen der Gegenwindkomponente im Flugniveau ‚hdwd air‘, der Querwindkomponente im Flugniveau ‚crwd air‘, der Gegenwindkomponente am Boden ‚hdwd gnd‘, der Querwindkomponente am Boden ‚crwd gnd‘ und der Temperatur am Boden ‚temp gnd‘ mit dem Elevationswinkel ‚elev‘, dem Azimutwinkel ‚azim‘, der Fluggeschwindigkeit gegenüber der Luft (*air speed*) ‚aspd‘, der Steig- bzw. Sinkrate ‚clim‘ und der Kurvenrate (*rate of turn*) ‚turn‘.

Die nachfolgend diskutierte Auswertung bezieht sich auf die beiden häufigsten am Flughafen München verkehrenden Flugzeugtypen: A320 und B737 (Abb. 17).



Abb. 17: Airbus A320 (links) und Boeing 737 (rechts).

Zunächst werden die prinzipiellen Zusammenhänge zwischen den meteorologischen Einflussparametern G_{MIM} , $G_{DWD,gnd}$, $G_{DWD,air}$ und den Fluglärmindikatoren $L_{AS\max}$, L_{AX} , t_{10} am Beispiel von **Abflügen** des Flugzeugtyps B737-300 von der Startbahn 26L an der westlich des Flughafens gelegenen Station Acherling (Abb. 18) erläutert, danach werden die übrigen Ergebnisse (An- und Abflüge, beide Typen, andere Stationen) in die Diskussion mit einbezogen.

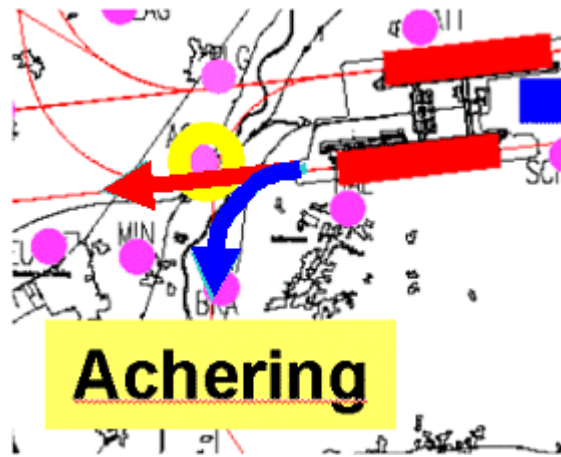


Abb. 18: Lage der Station Achering mit den beiden Abflugrouten ausgehend von der Startbahn 26L.

Die Streudiagramme der Lärmindikatoren in Abhängigkeit von den meteorologischen Einflussparametern (Abb. 19) für Abflüge der B737-300 von der Startbahn 26L über Achering zeigen keine oder nur eine schwache Abhängigkeit. Im Falle der Abflüge nach Süden ist grundsätzlich keine signifikant von Null verschiedene Korrelation zu finden. Bei den Abflügen nach Westen finden sich signifikant von Null verschiedene Korrelationen vor allem bezüglich der t_{10} Zeitspanne und des L_{ASmax} , doch auch diese sind eher gering. Die Signifikanz bezieht sich auf eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 1%.

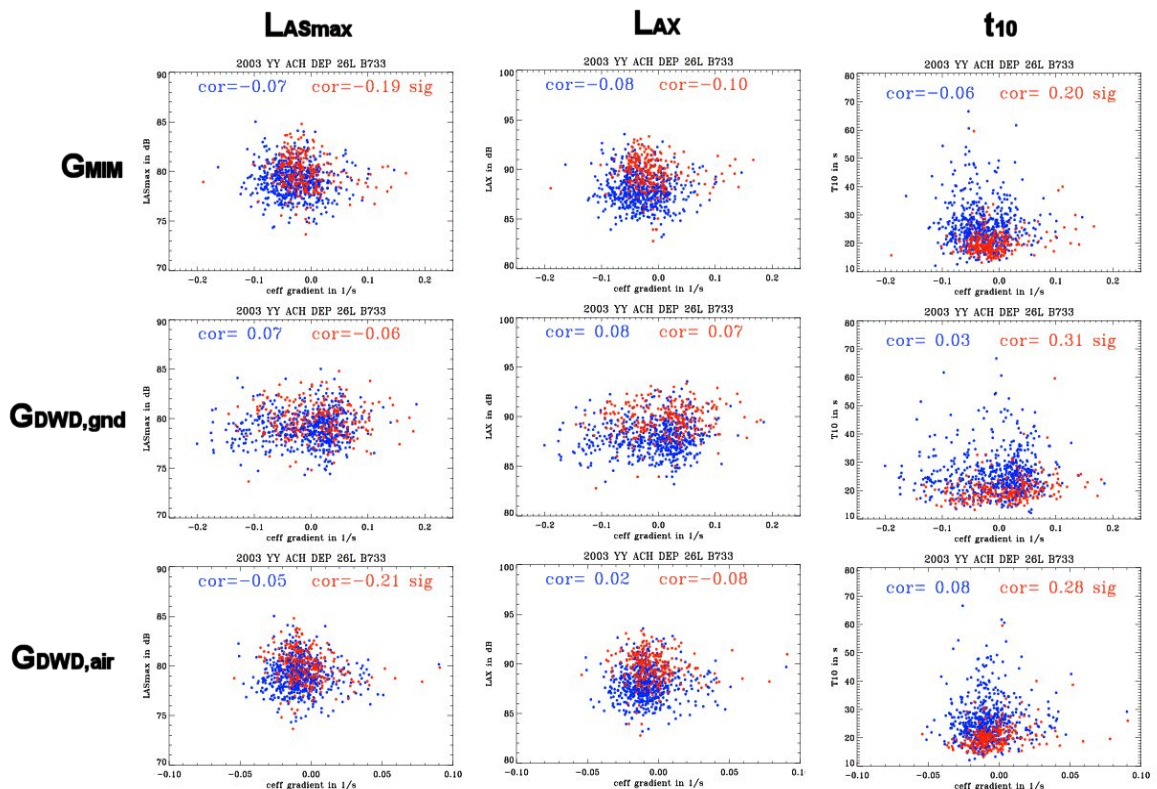


Abb. 19: Streudiagramm der Lärmindikatoren (Ordinate) in Abhängigkeit von den meteorologischen Einflussparametern (Abszisse) für Abflüge der B737-300 von der Startbahn 26L über Achering (rot: Abflüge nach Westen, blau: Abflüge nach Süden).

2003 YY ACH DEP 26L B733

	MIM	DWD gnd	DWD air
elev	0.84	0.83	0.84
azim	0.07	0.07	0.08
aspd	0.06	0.09	0.13
clim	0.13	0.14	0.17
turn	0.13	0.11	0.11
meteo	0.20	0.05	0.26

partial correlation LAS max

Abb. 20: Partieller Korrelationskoeffizient zwischen dem Maximalpegel L_{ASmax} an der Station Achering, den meteorologischen Einflussparametern G_{MIM} , $G_{DWD,gnd}$, $G_{DWD,air}$ (Zeile ‚meteo‘, Spalten ‚MIM‘, ‚DWD gnd‘, ‚DWD air‘) und anderen emissionsrelevanten Flugparametern (Elevationswinkel ‚elev‘, Azimutwinkel ‚azim‘, Fluggeschwindigkeit gegenüber der Luft (*air speed*) ‚aspd‘, Steig/Sinkrate ‚clim‘ und Kurvenrate (*rate of turn*) ‚turn‘) für Abflüge von B737-300 Flugzeugen von Startbahn 26L (nur Abflüge nach Westen). Schwarz eingerahmte Felder deuten an, dass die partielle Korrelation signifikant von Null verschieden ist (Irrtumswahrscheinlichkeit 1%).

Mit Hilfe der partiellen Korrelation wurde untersucht, ob die Lärmindikatoren eher von emissionsrelevanten Flugparametern abhängen. Der partielle Korrelationskoeffizient ist ein Maß für den linearen Zusammenhang zwischen einer abhängigen Größe (hier L_{ASmax}) und einer unabhängigen Größe, wobei jeweils der Einfluss der übrigen unabhängigen Größen eliminiert ist. Die partiellen Korrelationskoeffizienten sind stets positiv (0: kein Zusammenhang, 1: exakte lineare Abhängigkeit). Als unabhängige Größen wurden neben jeweils einer der meteorologischen Einflussgrößen G_{MIM} , $G_{DWD,gnd}$, $G_{DWD,air}$ noch der Elevationswinkel, der Azimutwinkel, die Fluggeschwindigkeit gegenüber der Luft (*air speed*), die Steig- bzw. Sinkrate (*climb rate*) und die Kurvenrate (*rate of turn*) herangezogen. Das Ergebnis ist in der Abb. 20 für Abflüge nach Westen (Kurvenrate < 0.2 Grad/s) dargestellt. Der größte statistische Zusammenhang ergibt sich für den Elevationswinkel, d.h. dem Höhenwinkel unter dem man von der Messstelle aus das Flugzeug sieht. Zwar steht die Abhängigkeit des Maximalpegels von den meteorologischen Einflussgrößen an zweiter Stelle, allerdings ist der Einfluss des Elevationswinkels um ein Vielfaches größer.

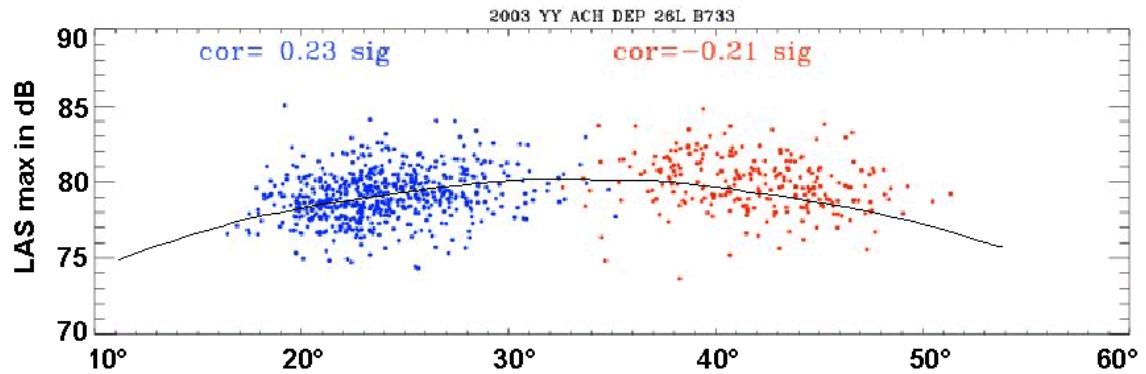


Abb. 21: Maximalpegel in Achering (B737-300 von Startbahn 26L) in Abhängigkeit vom Elevationswinkel für Abflüge nach Süden (blau) und nach Westen (rot).

Der direkte Zusammenhang zwischen L_{ASmax} an der Station Achering und dem Elevationswinkel, unter dem startende B737-300 Flugzeuge bei Abflügen nach Süden (blau) bzw. nach Westen (rot) gesehen werden (Abb. 21) zeigt, dass offensichtlich ein starker nicht-linearer Zusammenhang besteht. Getrennt für die beiden Abflugrichtungen ist die lineare Korrelation mit 0.23 bzw. -0.21 jeweils signifikant von Null verschieden. Es kann vermutet werden, dass der statistische Zusammenhang kausal auf die vertikale Richtcharakteristik zurückzuführen ist.

In einem nächsten Schritt wurden **Anflüge** auf die Landebahn 26R an der Messstelle Eitting (Abb. 22) statistisch ausgewertet.



Abb. 22: Lage der Station Eitting (links) mit der Anflugroute auf die Landebahn 26R (blauer Pfeil) und visueller Eindruck (rechts) eines auf dieser Route an der Station (Aufnahmestandort) vorbei fliegenden Flugzeugs.

Die an dieser Station ausgewerteten partiellen Korrelationskoeffizienten zwischen L_{ASmax} und den meteorologischen Einflussparametern sind grundsätzlich nicht signifikant von Null verschieden (Abb. 23). Wieder sind es Flugparameter, mit denen der Maximalpegel den größten Zusammenhang aufweist. Dabei zeigen die beiden Flugzeugtypen (A320 und B737-300) unterschiedliche Eigenschaften. Während beim A320 der Elevations- und Azimutwinkel und somit vermutlich die akustische Richtcharakteristik den größten Einfluss haben, treten bei der B737-300 neben dem Elevationswinkel auch die Fluggeschwindigkeit (*air speed*) und die Sinkrate als schwache, aber signifikante Einflussgrößen hervor. Da die Landeanflüge auf einem einheitlichen Gleitpfad (Neigung 3°) erfolgen, ist die Sinkrate allerdings von der Fluggeschwindigkeit nicht unabhängig,

sodass letztlich die Fluggeschwindigkeit und somit vermutlich die von der Geschwindigkeit abhängige aerodynamische Geräuschemission (Umströmungsgeräusche) den Maximalpegel L_{ASmax} beeinflusst.

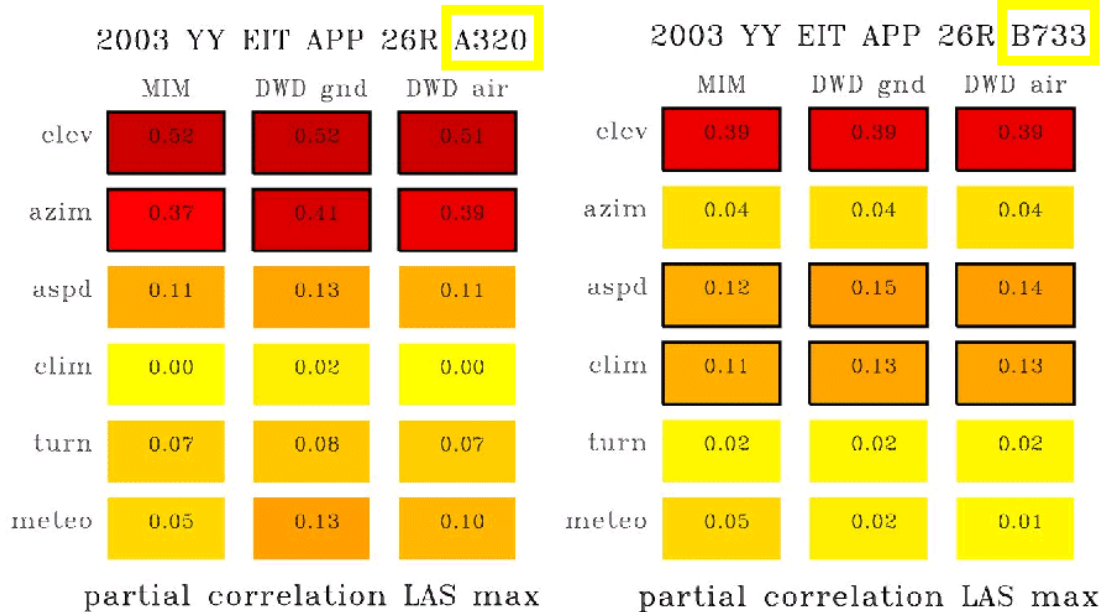


Abb. 23: Partielle Korrelationskoeffizienten (nähere Erläuterung siehe Abb. 20) für Abflüge auf die Landebahn 26R (links: Flugzeugtyp A320, rechts Flugzeugtyp B737-300) an der Messstelle Eitting.

Die folgenden Auswertungen beziehen sich auf **alle betrachteten Lärmereignisse** aus dem Jahr 2003. Es handelt sich um insgesamt 39 Datenkollektive, d.h. Kombinationen von Messstelle, Flugzeugtyp, Betriebsart (Anflug oder Abflug) und Landebahn, bei denen nach der Datenreduktion gemäß Abschnitt 1.2.4 a) noch mindestens 100 Lärmereignisse übrig geblieben sind. Die ausgewählten Messstellen sind in der Abb. 24 getrennt nach An- und Abflügen eingetragen.

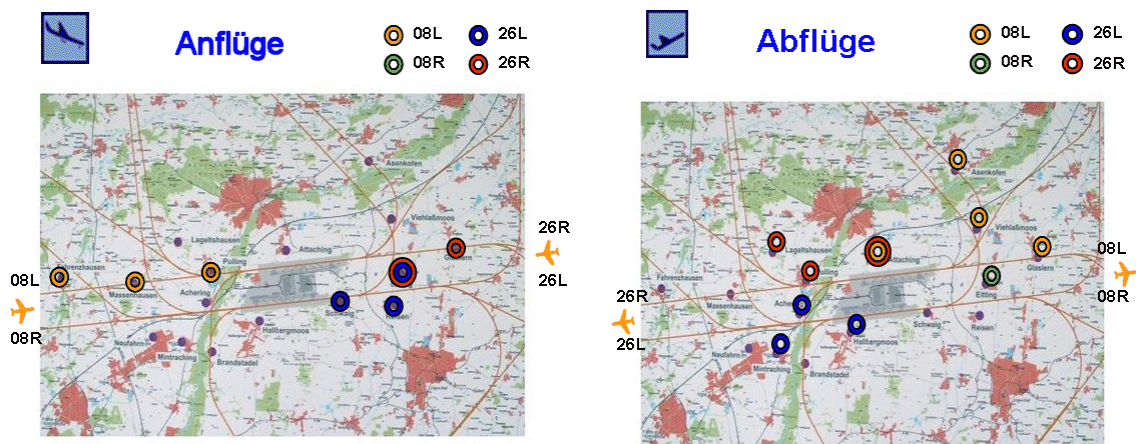


Abb. 24: Messstationen, an denen statistische Auswertungen durchgeführt wurden (links: Anflüge, rechts: Abflüge).

2003

	MIM	DWD gnd	DWD air
elev	75	75	75
azim	29	35	32
aspd	35	40	40
clim	40	35	43
turn	5	8	8
meteo	32	37	43

percentage of significant correlation LAS max

2003

	MIM	DWD gnd	DWD air
elev	78	81	81
azim	29	32	27
aspd	43	43	43
clim	29	27	29
turn	2	5	5
meteo	32	24	27

percentage of significant correlation LAX

2003

	MIM	DWD gnd	DWD air
elev	21	21	21
azim	21	18	24
aspd	32	37	29
clim	27	29	21
turn	5	5	5
meteo	29	35	35

percentage of significant correlation T10

Abb. 25: Prozentsatz der jeweils statistisch signifikant von Null verschiedenen partiellen Korrelationskoeffizienten aller ausgewerteten Fälle des Jahres 2003 für die abhängigen Parameter (Lärmindikatoren) L_{ASmax} (oben), L_{AX} (Mitte) und t_{10} (unten). Die unabhängigen Parameter (Zeilen) sind in Abb. 20 erläutert.

Die Abb. 25 zeigt das Gesamtergebnis dieser Auswertung in Form des Prozentsatzes der jeweils statistisch signifikant von Null verschiedenen partiellen Korrelationskoeffizienten zwischen den Lärmindikatoren L_{ASmax} (oben), L_{AX} (mittig) und t_{10} (unten) als abhängige Parameter und dem Elevationswinkel, dem Azimutwinkel, der Fluggeschwindigkeit (*air speed*), der Steig- bzw. Sinkrate (*climb rate*), der Kurvenrate (*rate of turn*) und den drei meteorologischen Einflussgrößen G_{MIM} , $G_{DWD, gnd}$, $G_{DWD, air}$ als unabhängige Parameter.

Bei dem Maximalpegel L_{ASmax} und dem zeitgemittelten Ereignispegel L_{AX} erweist sich wiederum der Elevationswinkel als die bedeutendste Einflussgröße (in mehr als 75% der Kollektive wurden statistische signifikant von Null verschiedene partielle Korrelationen festgestellt). Alle übrigen unabhängigen Parameter, einschließlich der meteorologischen Einflussparameter G_{MIM} , $G_{DWD, gnd}$, $G_{DWD, air}$ sind bezüglich ihres Zusammenhangs mit den Lärmindikatoren in etwa gleichwertig und weisen zwischen statistisch signifikant von Null verschiedene partielle Korrelationen nur in 25 bis 45 Prozent der Kollektive auf. Lediglich die Kurvenrate fällt durch eine sehr geringe Korrelation auf. Dies liegt daran, dass nur Geradeaus- und keine Kurvenflüge betrachtet wurden.

Den relativ größten Einfluss weisen die meteorologischen Parameter bezüglich der Zeitspanne t_{10} auf, obwohl die absolute Anzahl der signifikant von Null abweichenden Fälle auch bei diesem Lärmindikator nicht größer ist als bei den anderen beiden Lärmindikatoren.

1.4 Bewertung

1.4.1 Meteorologisch-akustische Interpretation

Alles in allem erweist sich der meteorologische Einfluss in dem hier ausgewerteten Datenmaterial als sehr gering und gegenüber den Einflüssen der datenmäßig fassbaren Flugparameter auf die Lärmemission als vernachlässigbar. Hinzu kommen weitere nicht fassbare Einflüsse auf die Emission, die die meteorologischen Einflüsse zusätzlich verschleiern. Es sind dies im Wesentlichen der unbekannte Schub, die unbekanntes Klappenstellungen und die unbekanntes Fahrwerkklage (ein- oder ausgefahren). Eine weitere Unsicherheit besteht im Turbulenzeinfluss, der als Zufallsprozess nicht nur den Zeitpunkt des Maximalpegels L_{ASmax} , sondern auch dessen Höhe und damit auch die des L_{AX} mit bestimmt, während die Zeitspanne t_{10} eher nicht von der Turbulenz beeinflusst wird. All diese Unsicherheiten führen dazu, dass der Zusammenhang der Lärmindikatoren mit den bekannten meteorologischen Einflussparametern relativ gering ist.

Im Folgenden wird untersucht, inwieweit in den Daten überhaupt Situationen enthalten sind, in denen die Position der Messstelle bezüglich der Emission eines Flugzeuges in den akustischen Schatten fällt, d.h. Situationen, bei denen von einem sehr starken meteorologischen Einfluss ausgegangen werden kann.

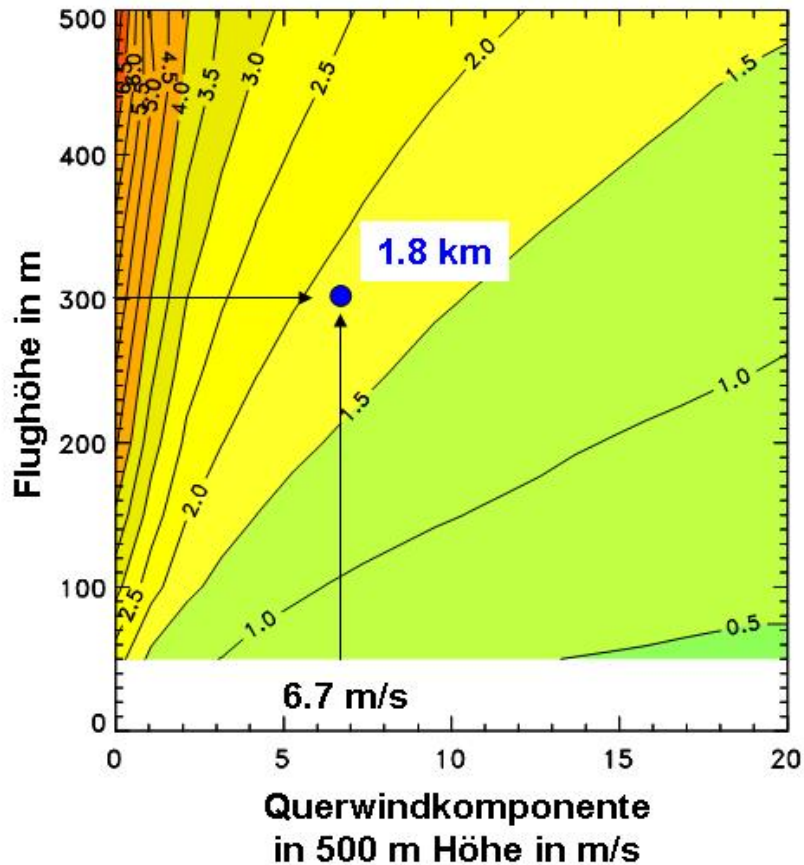


Abb. 26: Abstand des Beginns der refraktiven Schattenzone von der Bodenspurlinie der Flugbahn in Abhängigkeit von der Querwindkomponente des Windes in 500 m über Grund.

Die Abb. 26 zeigt den Abstand des Beginns der refraktiven Schattenzone (vgl. Abb. 1 und 11) von der senkrechten Projektion der Flugbahn auf den Boden (Bodenspur) in Abhängigkeit von der Querwindkomponente des Windes in 500 m über Grund unter der Annahme eines Ekman-Grenzschichtprofils. Die Schattenzone liegt umso näher am Fußpunkt des Flugzeugs, je stärker der Wind weht und je niedriger sich die Schallquelle (Flugzeug) befindet. Das Beispiel zeigt, dass für eine Flughöhe von 300 m und bei einem Querwind von 6,7 m/s der akustische Schatten in 1,8 km Entfernung von der Flugbahn beginnt. Das heißt, dass erst in einem größeren Abstand von der Bodenspur der Flugbahn gegen die Richtung der Querwindkomponente der akustische Schatten und somit die deutliche Pegelreduzierung beginnt.

Wie die Abb. 27 zeigt, liegen die meisten Lärmmessstellen entweder zu nahe an den Flugbahnen oder so weit vom Flughafen entfernt, dass die Flughöhe zu groß ist, um selbst bei hohen Windgeschwindigkeiten nicht in die akustische Schattenzone zu fallen. Lediglich die Messstelle Eitting (bei Anflügen von Osten her) und die Messstelle Attaching (bei Starts und Landungen auf der Nordbahn) können bei entsprechendem Querwind in der Schattenzone liegen, da hier die Flugzeuge relativ niedrig fliegen. Aus der Auswertung von Messungen an der Station Attaching bei Abflügen von B737-300 Flugzeugen von der Nordbahn (Abb. 28) zeigt sich in der Tat eine relativ hohe und signifikant von Null verschiedene Korrelation mit den meteorologischen Einflussparametern.

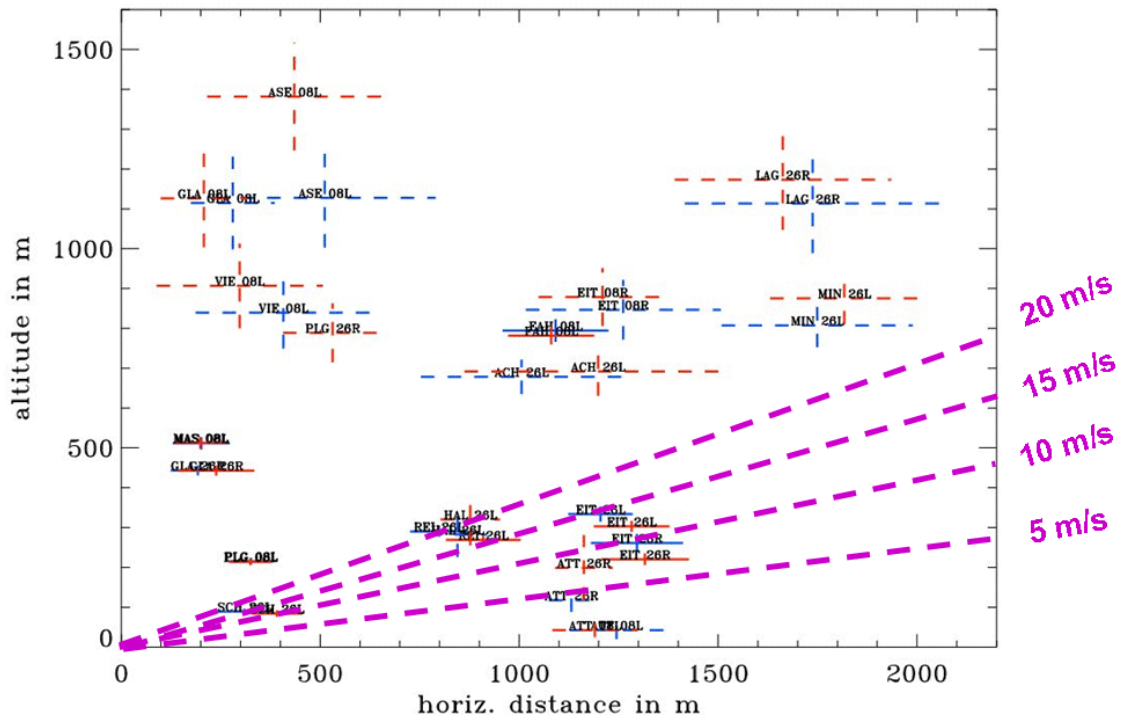


Abb. 27: Verteilung der betrachteten Lärmdatenkollektive bezüglich der Flughöhe und dem horizontalen Abstand zwischen dem Fußpunkt des Flugzeugs und der Messstelle. Die Kreuze (rot: B737, blau: A320) geben den Mittelwert und die Standardabweichung der Einzel-Lärmereignisse an. Die violetten Linien zeigen den jeweiligen Beginn der akustischen Schattenzone für verschiedene Werte der Querwindkomponente in 500 m über Grund an.

2003 YY ATT DEP 08L B733

	MIM	DWD gnd	DWD air
elev	0.04	0.02	0.08
azim	0.29	0.32	0.29
aspd	0.09	0.02	0.08
clim	0.27	0.31	0.29
turn	0.02	0.03	0.04
meteo	0.20	0.26	0.14

partial correlation LAS max

Abb. 28: Partielle Korrelationskoeffizienten (Erläuterung siehe Abb. 20) für das Datenkollektiv der Abflüge von B737-300 Flugzeugen auf der Startbahn 08L bezogen auf die Station Attaching.

Fälle mit hoher Querwindkomponente sind bei An- bzw. Abflügen am Flughafen München sehr selten, zu mindestens solange die Flugrichtung parallel zu den nahezu in West-Ost-Richtung orientierten Start-/Landebahnen verläuft. Dies liegt an der hohen klimatologischen Häufigkeit von West- bzw. Ostwinden im Münchner Raum. Windrichtungen quer zur An- bzw. Abflugrichtung, also Süd- oder Nordwinde, treten eher

selten auf (Abb. 29). Größere Querwindkomponenten haben in München eine akustische Relevanz für Flüge in Nord-Süd- bzw. Süd-Nord-Richtung, d.h. Flüge die nach dem Start noch in relativ niedriger Flughöhe nach Norden bzw. Süden abbiegen.

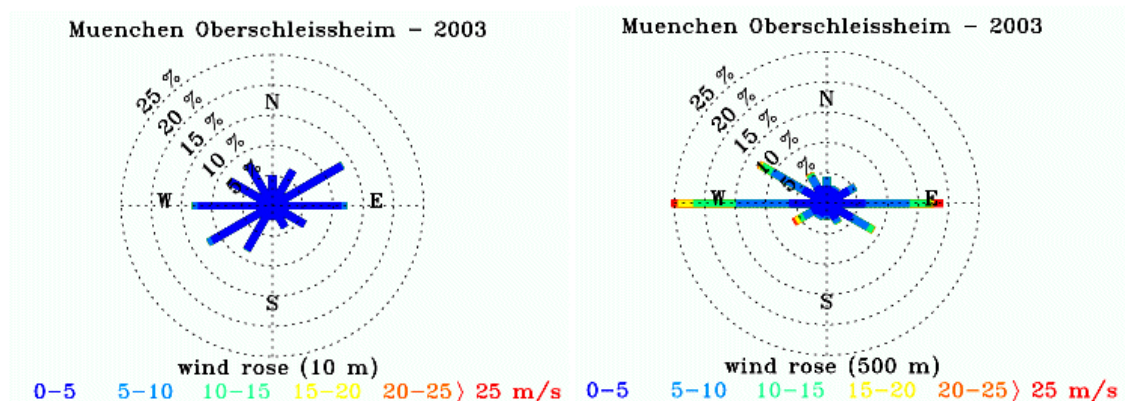


Abb. 29: Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitshäufigkeitsverteilung im Jahr 2003 an der aerologischen Station Oberschleißheim des DWD (links: 10 m über Grund, rechts: 500 m über Grund).

1.4.2 Relevanz für die Lärminderung durch wetterabhängige Flugrouten

Ein Potenzial für die Lärminderung durch wetterabhängige Flugrouten ist nur dann gegeben, wenn

- a) eine hohe Querwindkomponente in Flughöhe besteht,
- b) die hohe Querwindkomponente in Flughöhe aber nicht mit einer hohen Windgeschwindigkeit am Boden verbunden ist, da hierdurch die Fluggeräusche leicht durch Windgeräusche (z.B. Laub) überdeckt sein können,
- c) die Flugzeuge noch relativ niedrig fliegen, aber hoch genug um Flugbahnmodifikationen noch zu zulassen,
- d) der Empfänger (z.B. lärmsensibles Wohngebiet) relativ weit von der Bodenspurlinie der Flugbahn entfernt liegt, aber nicht so weit, dass die Fluggeräusche ohnehin nicht mehr gehört werden können.

ad a)

Im Falle von München spielen hohe Querwindkomponenten nur im Falle von Flügen in Nord-Süd- bzw. Süd-Nord-Richtung eine Rolle.

ad b)

Wie die Abb. 30 zeigt, gibt es im Münchener Raum durchaus Fälle mit einer hohen Windgeschwindigkeit in 500 m (≥ 12 m/s) und einem relativ schwachen Wind (≤ 3 m/s) in Bodennähe. Diese Situationen traten im Jahr 2003 in München an 3.7% der Beobachtungstermine 00, 06, 12 und 18 UTC auf. Hiervon entfielen 43% auf den 00 UTC - Termin, 31% auf den 06 UTC - Termin, 8% auf den 12 UTC - Termin und 18% auf den 18 UTC - Termin, d.h. die Kombination aus starkem Höhenwind bei gleichzeitig schwachem Bodenwind treten bevorzugt abends, nachts und morgens auf.

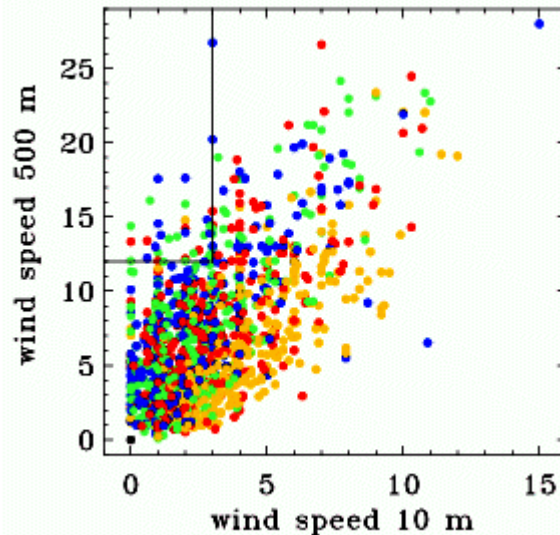


Abb. 30: Zusammenhang zwischen der Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund am Flughafen München und der Windgeschwindigkeit in 500 m über Grund an der aerologischen Station Oberschleißheim. Blau: 00 UTC, grün: 06 UTC, orange: 12 UTC, rot: 18 UTC).

ad c)

Da die Flugbahn bei Anflügen wegen des einzuhaltenden Landekurses und Gleitpfades nicht verlegt werden können, kommen für wetterabhängige Routen nur Abflüge in Frage.

ad d)

Orte, die relativ weit von der Flugbahn entfernt liegen, profitieren natürlich von der geometrischen Dämpfung, d.h. der Pegelabnahme mit dem Abstand von der Schallquelle. Eine Lärminderung kann daher nur erzielt werden, wenn der Hintergrundpegel an diesen Orten so gering ist, dass die Fluggeräusche noch störend sind.

Bezogen auf den Flughafen München lässt sich ein Lärminderungspotenzial nur vermuten, aber auf Grund der vorhandenen Messungen (bedingt durch die gegebene Lage der Messstellen und dem Schwellwert von $L_{ASmax} > 60$ dB) nicht nachweisen.

Ein mögliches Lärminderungspotenzial besteht für abfliegende Flugzeuge, die bereits kurz nach dem Abheben von der Startrichtung abweichen und senkrecht zur Hauptwindrichtung also entweder nach Norden oder nach Süden weiterfliegen. Dieses Potenzial besteht vor allem nachts und bei hohen Windgeschwindigkeiten in der Höhe, die mit niedrigen Windgeschwindigkeiten am Boden einhergehen. Da diese vor allem abends, nachts und morgens auftreten, könnten solche Situationen eine wetterabhängige Verlegung von Routen (z.B. längerer Geradeausflug) zur Lärminderung sinnvoll machen. Da die Hauptwirkung aber erst in größerer Entfernung von der Bodenspurlinie der Flugbahn auftritt (mehr als etwa 1500 m) und somit der Schallpegel auf Grund des großen Abstands von der Quelle ohnehin schon reduziert ist, sind Effekte nur spürbar, wenn ein geringer Hintergrundpegel besteht. Da die Datenlage eine Quantifizierung des Effekts nicht hergibt, können genauere Informationen über die erzielbare Lärminderung und die Definition von Abflugrouten nur mit Hilfe von Schallausbreitungssimulationen durchgeführt werden.

Eine Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse auf andere Flughäfen ist natürlich nur bedingt möglich. Ein Lärminderungspotenzial durch wetterabhängige Flugrouten besteht vor allem dann, wenn die häufigsten Abflugrouten in einem relativ großen Winkel zur lokalen Hauptwindrichtung verlaufen. Ein erhöhtes Lärminderungspotenzial besteht in Fällen,

in denen die Abflüge über ansteigendem Gelände stattfinden und die Flughöhe über Grund nach dem Start weniger steil ansteigt als über flachem Gelände. Ein solches Lärminderungspotenzial wäre allerdings nur nutzbar, wenn die topografischen Gegebenheiten Modifikationen in den Flugrouten zulassen.

In jedem Fall erfordert die genaue Erschließung eines Lärminderungspotenzials durch wetterabhängige Flugrouten zusätzliche Untersuchungen, bei denen die jeweilige topografische und klimatologische Situation berücksichtigt werden. Fehlen (wie in München) Messungen in den potentiell von einer derartigen Lärmierungsmaßnahme profitierenden Gebieten, so sind die Untersuchungen mit Hilfe von Schallausbreitungsmodellen durchzuführen.

Danksagung

Spezieller Dank geht an Herrn Dr. Frank-Thomas Winter und Herrn Matthias Bosse von der Umweltabteilung der Flughafen München GmbH für die Bereitstellung der Fluglärmdaten und technische Hilfestellungen und an Herrn Dipl. Met. Heinz Lößlein von der "Meteorologie in München" im Department Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München für die unkomplizierte Bereitstellung der meteorologischen Daten des Messmastes Garching. Maßgeblich zur Durchführung des Projekts waren auch die Bereitschaft der Deutschen Flugsicherung GmbH zur Nutzung der Flugbahndaten und die Abgabe der aerologischen und synoptischen Daten seitens des Deutschen Wetterdienstes.

Liste der Abbildungen

Abb. 1: Beispiel der Wahl einer lärmarmen Flugroute (blau) unter Berücksichtigung natürlicher Schalldämpfung in der Atmosphäre.

Abb. 2: Synchronisation verschiedener Datensätze von FMG, DFS, LMU-MIM und DWD.

Abb. 3: Lage (links) und Luftaufnahme des Flughafens Münchens (rechts).

Abb. 4: Flugweg einer B733 von NW beim Landeanflug von Osten, \times = Minutenmarken.

Abb. 5: Wind- und Temperaturprofile vom 01.01.2003 vom Garchinger Messturm, UTC-Stundenmittel (farbcodiert).

Abb. 6: FMG-Messstellen (violett) und Flugrouten am Flughafen München.

Abb. 7: Typische Fluglärmessstellen: Eitting (links) und Schwaig (rechts).

Abb. 8: Häufigkeit der Lärmereignisse in % (100% = 180.054) für 2003.

Abb. 9: Emission – Transmission – Immission.

Abb. 10: Horizontalwinkel zwischen Wind, Flugzeug und Messstation. Der hellblaue Pfeil deutet die Windkomponente in Schallausbreitungsrichtung u an.

Abb. 11: Schallstrahlkrümmung (Refraktion) in Abhängigkeit von der Änderung der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} mit der Höhe.

Abb. 12: Winkel zwischen Flugzeug und Messstelle (links: Azimut bzw. Seitenwinkel, rechts: Elevations- bzw. Höhenwinkel).

Abb. 13: Pegelverlauf eines Vorbeifluges (Landung) mit zeitlicher Lage und Betrag des Maximalpegels L_{ASmax} (rot) und der Zeitspanne t_{10} (rosa Linie). Der violette Punkt kennzeichnet ein sekundäres Pegelmaximum.

Abb. 14: Streuung der Flugzeugpositionen zum Zeitpunkt der L_{ASmax} -Registrierung an der Messstation Eitting unter Berücksichtigung der Laufzeit für die Schallausbreitung.

Abb. 15: links: Maximalpegel L_{ASmax} in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Flugzeug und Messstelle vor der Korrektur (blau), nach Abstandskorrektur (grün) und nach zusätzlicher Absorptionskorrektur (rot). Rechts: Abflüge (Startbahn 26L) aus der Perspektive der Messstation Acherding.

Fig. 16: Prozentualer Anteil der signifikant von Null verschiedenen partiellen Korrelationen zwischen der Gegenwindkomponente im Flugniveau ‚hdwd air‘, der Querwindkomponente im Flugniveau ‚crwd air‘, der Gegenwindkomponente am Boden ‚hdwd gnd‘, der Querwindkomponente am Boden ‚crwd gnd‘ und der Temperatur am Boden ‚temp gnd‘ mit dem Elevationswinkel ‚elev‘, dem Azimutwinkel ‚azim‘, der Fluggeschwindigkeit gegenüber der Luft (*air speed*) ‚aspd‘, der Steig- bzw. Sinkrate ‚clim‘ und der Kurvenrate (*rate of turn*) ‚turn‘.

Abb. 17: Airbus A320 (links) und Boeing 737 (rechts).

Abb. 18: Lage der Station Acherding mit den beiden Abflugrouten ausgehend von der Startbahn 26L.

Abb. 19: Streudiagramm der Lärmindikatoren (Ordinate) in Abhängigkeit von den meteorologischen Einflussparametern (Abszisse) für Abflüge der B737-300 von der Startbahn 26L über Acherding (rot: Abflüge nach Westen, blau: Abflüge nach Süden).

Abb. 20: Partieller Korrelationskoeffizient zwischen dem Maximalpegel L_{ASmax} an der Station Acherding, den meteorologischen Einflussparametern G_{MIM} , $G_{DWD,gnd}$, $G_{DWD,air}$ (Zeile ‚meteo‘, Spalten ‚MIM‘, ‚DWD gnd‘, ‚DWD air‘) und anderen emissionsrelevanten Flugparametern (Elevationswinkel ‚elev‘,

Azimutwinkel ,azim', Fluggeschwindigkeit gegenüber der Luft (*air speed*) ,aspd', Steig/Sinkrate ,clim' und Kurvenrate (*rate of turn*) ,turn' für Abflüge von B737-300 Flugzeugen von Startbahn 26L (nur Abflüge nach Westen). Schwarz eingerahmte Felder deuten an, dass die partielle Korrelation signifikant von Null verschieden ist (Irrtumswahrscheinlichkeit 1%).

Abb. 21: Maximalpegel in Achering (B737-300 von Startbahn 26L) in Abhängigkeit vom Elevationswinkel für Abflüge nach Süden (blau) und nach Westen (rot).

Abb. 22: Lage der Station Eitting (links) mit der Anflugroute auf die Landebahn 26R (blauer Pfeil) und visueller Eindruck (rechts) eines auf dieser Route an der Station (Aufnahmestandort) vorbei fliegenden Flugzeugs.

Abb. 23: Partielle Korrelationskoeffizienten (nähere Erläuterung siehe Abb. 20) für Abflüge auf die Landebahn 26R (links: Flugzeugtyp A320, rechts Flugzeugtyp B737-300) an der Messstelle Eitting.

Abb. 24: Messstationen, an denen statistische Auswertungen durchgeführt wurden (links: Anflüge, rechts: Abflüge).

Abb. 25: Prozentsatz der jeweils statistisch signifikant von Null verschiedenen partiellen Korrelationskoeffizienten aller ausgewerteten Fälle des Jahres 2003 für die abhängigen Parameter (Lärmindikatoren) L_{ASmax} (oben), L_{AX} (Mitte) und t_{10} (unten). Die unabhängigen Parameter (Zeilen) sind in Abb. 20 erläutert.

Abb. 26: Abstand des Beginns der refraktiven Schattenzone von der Bodenspurlinie der Flugbahn in Abhängigkeit von der Querwindkomponente des Windes in 500 m über Grund.

Abb. 27: Verteilung der betrachteten Lärmdatenkollektive bezüglich der Flughöhe und dem horizontalen Abstand zwischen dem Fußpunkt des Flugzeugs und der Messstelle. Die Kreuze (rot: B737, blau: A320) geben den Mittelwert und die Standardabweichung der Einzel-Lärmereignisse an. Die violetten Linien zeigen den jeweiligen Beginn der akustischen Schattenzone für verschiedene Werte der Querwindkomponente in 500 m über Grund an.

Abb. 28: Partielle Korrelationskoeffizienten (Erläuterung siehe Abb. 20) für das Datenkollektiv der Abflüge von B737-300 Flugzeugen auf der Startbahn 08L bezogen auf die Station Attaching.

Abb. 29: Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitshäufigkeitsverteilung im Jahr 2003 an der aerologischen Station Oberschleißheim des DWD (links: 10 m über Grund, rechts: 500 m über Grund).

Abb. 30: Zusammenhang zwischen der Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund am Flughafen München und der Windgeschwindigkeit in 500 m über Grund an der aerologischen Station Oberschleißheim. Blau: 00 UTC, grün: 06 UTC, orange: 12 UTC, rot: 18 UTC).