

Fluglärm - eine anspruchsvolle und interdisziplinäre Aufgabe für die Akustik

Georg Thomann, Kurt Eggenschwiler
Abteilung Akustik/Lärmbekämpfung, EMPA Dübendorf

Zusammenfassung

Die Behandlung von Fluglärmproblemen erfordert ein breites akustisches Grundwissen, welches von der Messung und Modellbildung über die Erfassung der Aussenlärmsituation bis hin zur Realisierung von Schallschutzmassnahmen reicht. Mit zu berücksichtigen sind dabei andere Fachgebiete wie z.B. die Lärmwirkungsforschung und die Raumplanung. Fluglärm ist eine anspruchsvolle Aufgabe mit interdisziplinärem Charakter und damit eine Herausforderung für die Akustik.

Einleitung

Wer ist nicht fasziniert vom Anblick eines startenden oder landenden Flugzeuges? Fliegen steht für Freiheit und Ungebundenheit und - seit die Flugpreise ins Bodenlose purzeln - für den Billigurlaub unter Palmen am Strand des tiefblauen Meeres. Das Fliegen hat aber auch seine Schattenseiten: Die Umweltbelastung durch Verbrennungsrückstände und Lärm.



Abbildung 1 Start einer MD-11 in Zürich Kloten bei Sonnenschein und prächtigem Wetter.

Flugzeuge sind ausserordentlich starke technische Schallquellen. Auf dem Boden breitet sich ein Lärmteppich aus, der in Flughafennähe während mehrerer Sekunden die sprachliche Kommunikation beeinträchtigt oder gar verunmöglicht. Fluglärm enthält einen bedeutenden Anteil tiefer Frequenzen. Sie werden durch leichte Bauteile nur schwach gedämpft. Deshalb stören Flugzeuge auch bei geschlossenem Fenster sehr stark. Im Gegensatz zu Schallquellen am Boden, wie Strassen und Eisenbahnen, erfolgt die Lärmausbreitung von Flugzeugen beinahe ungehindert. Eine Abschirmung der Emissionen auf dem Ausbreitungsweg durch die Topografie, durch Gebäude oder in Form von Schallschutzwänden ist nicht möglich. Einzig mit Schallschutzfenstern lässt sich die Lärmbelastung einigermaßen reduzieren - aber auch nur im Innern von Gebäuden und bei geschlossenen Fenstern.

Die Flugbewegungen haben in den letzten Jahren rasant zugenommen. Gleichzeitig erhöht sich der Siedlungsdruck rund um die Landesflughäfen, womit immer mehr Leute in den Nahbereich von Flughäfen ziehen, meist aus wirtschaftlichen Gründen. Diese beiden Entwicklungen führen dazu, dass immer mehr Menschen durch Fluglärm betroffen sind.

Fluglärmsimulation mit dem Programm FLULA der EMPA

Messung oder Berechnung?

Schon in den Sechzigerjahren versuchte man an der EMPA mit Messungen und einfachen Berechnungen die Fluglärmbelastung rund um Fluganlagen zu erfassen und zu beschreiben. Fluglärmmessungen und damit die Beschreibung verschiedener Belastungssituationen erfordern jedoch einen enormen Aufwand an Zeit, Personal und Geräten. Zudem sind Aussagen über den Jahresmittelwert für eine Vielzahl von Messpunkten in der Umgebung von Flughäfen gar nicht realisierbar. Deshalb entschied man sich Anfang der Achtzigerjahre auf Immissionsmessungen zu verzichten und die Fluglärmbelastung mit einer Simulation zu berechnen.

Grundprinzip des Programms FLULA

Das an der Abteilung Akustik/Lärmbekämpfung entwickelte Berechnungsverfahren als Grundlage für das Programm FLULA wurde in den Arbeiten [1,2,3,4] vorgestellt. Es basiert auf folgender Idee:

Die Flugzeuge fliegen im Modell auf vorgegebene Routen welche den tatsächlichen entsprechen. Für jeden Punkt eines gitterförmigen Bodenrasters wird der Schalldruckpegelverlauf des Vorbeifluges berechnet (siehe Abbildung 2).

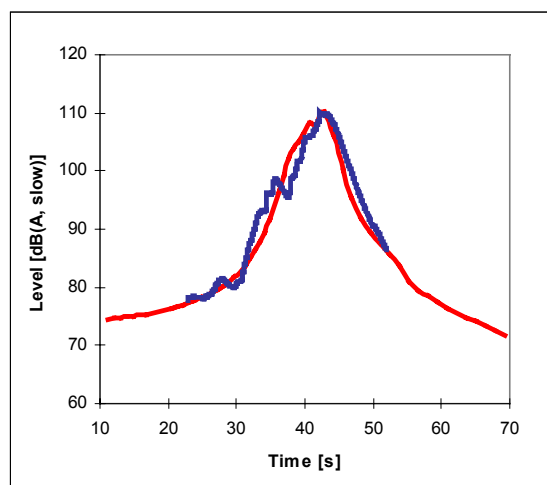


Abbildung 2 Berechneter (längere Linie) und gemessener Schalldruckpegel-Zeit-Verlauf des Starts einer F/A-18; ermittelt 1997 in Meiringen während Demonstrationsflügen. Start ohne Nachbrenner ca. 200 Meter nach Pistenende in Flugrichtung.

Aus dem berechneten Pegel-Zeit-Verlauf lässt sich eine Vielzahl verschiedenster akustischen Lärmmasse bestimmen, wie beispielsweise der Maximalpegel L_{max} , der Energiepegel SEL, der Mittelungspegel L_{eq} und auch die deutschen und französischen gesetzlichen Lärmmasse, also der Störindex Q und der Indice Psophique IP.

Entscheidend für eine realitätsnahe Simulation - namentlich des Kurvenfluges - ist eine präzise Beschreibung der akustischen Eigenschaften des Flugzeuges. Sie bildet denn auch den eigentlichen akustischen Kern des Berechnungsverfahrens FLULA.

Beschreibung der akustischen Quelle

Das Flugzeug als Schallquelle ist erst dann ausreichend beschrieben, wenn sein Abstrahlverhalten in alle Raumrichtungen bekannt ist. Anfangs der Achtzigerjahre, als man an der EMPA mit der Entwicklung von FLULA begann, standen von den Herstellern oder anderen akustischen Institutionen keine entsprechenden Daten zur Verfügung. Auch heute noch ist die EMPA die einzige Stelle weltweit, wo entsprechende Datensätze in Form von parametrisierten Abstrahldiagrammen in dieser Ausführlichkeit verfügbar sind.

Dieser akustische Schatz der EMPA ist das Resultat fünfzehnjähriger Anstrengungen, die unterschiedlichsten Flugzeugtypen akustisch zu erfassen und deren Abstrahlverhalten (Bsp. siehe Abbildung 3) in Form von Richtcharakteristiken mathematisch zu beschreiben [1,2].

Die ersten Vermessungsflüge fanden 1985 auf dem Militärflugplatz Emmen im Zusammenhang mit der Evaluation eines neuen Trainingsflugzeuges für die Jetpiloten der Schweizer Luftwaffe statt. Die Messungen der folgenden Jahren wurden alle nach dem gleichen Prinzip durchgeführt wie die erste Serie in Emmen, aber selbstverständlich mit stets verbesserter Messtechnik und damit auch immer aussagekräftigeren Resultaten. (siehe Abbildung 4)

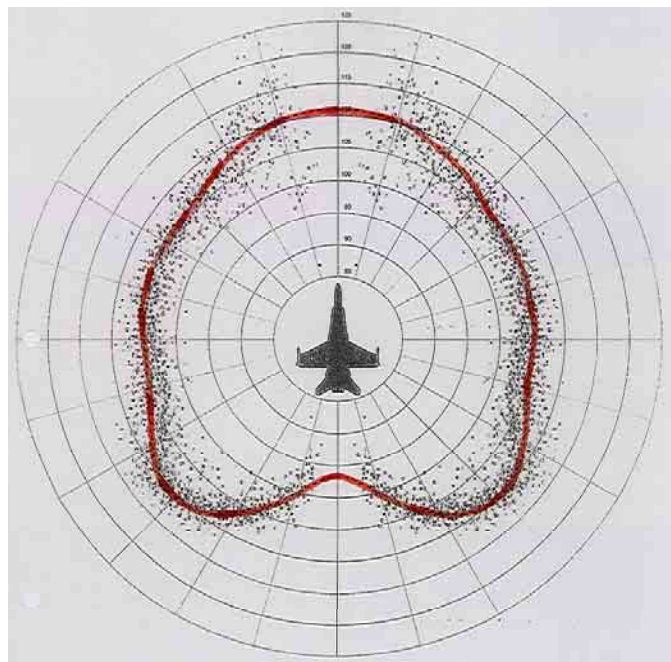


Abbildung 3 Abstrahldiagramme (Richtcharakteristik in 305 Meter) einer F/A-18 mit Nachbrenner. Die Punktwolke im abgebildeten Polardiagramm entspricht den gemessenen Pegeln, die ausgezogene Linie der berechneten, richtungsabhängigen Schallabstrahlung.

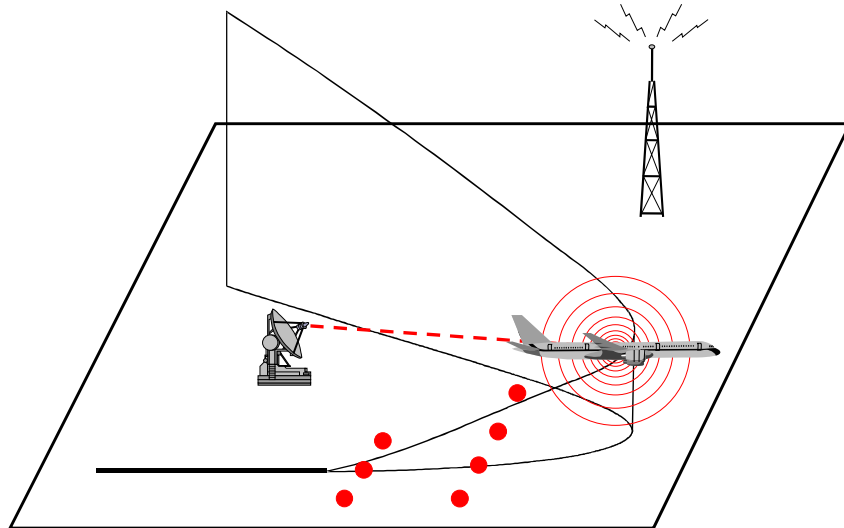


Abbildung 4 *Prinzipieller Ablauf der Quellenvermessung: Startende oder landende Flugzeuge werden von den Mikrofonen akustisch erfasst und die Geräusche auf digitalen Tonbandgeräten aufgezeichnet. Gleichzeitig werden die Positionen der Flugzeuge mit einem Präzisionsradar (Pulsdoppler-Folge-Radar der Armee Typ Skyguard) vermessen. Damit Ton- und Radaraufzeichnungen miteinander verknüpft werden können, müssen sie synchronisiert werden. Dies geschieht mit dem Zeit-Signal des Langwellensenders DCF-77 in Frankfurt. Aus statistischen Gründen werden pro Flugzeugtyp eine grössere Anzahl Flüge erfasst. Im Labor folgen anschliessend zeitaufwändige Auswertungen.*

1988 und 1989 wurden im Auftrag des damaligen Bundesamts für Militärflugplätze der Hunter und 1989 in Payerne die anderen Militärjets inkl. einer kanadischen Version der F/A-18 gemessen. In den Jahren 1991 und 1996 folgten in Eigenregie die wichtigen Messungen zur akustischen Erfassung der zivilen Grossraumflugzeuge beim Flughafen Zürich Kloten. Zu den zivilen Flugzeugen liegen damit für rund 50 Typen die Richtcharakteristika für Start- und Landungen vor.

Im Zusammenhang mit der Erstellung der Lärmbelastungskataster für die Militärflugplätze folgten ab 1997 weitere Vermessungen von Militärflugzeugen, wobei besonders der aufwändige und technisch anspruchsvollen Einsatz von 1998 zu erwähnen ist. Es wurden in Turtmann (VS) Messungen an den Helikoptern Super-Puma, Alouette III und Agusta A109K2 durchgeführt.

Die Beschreibung der Schallabstrahlung als akustischer Kern des Fluglärmprogrammes FLULA beruht somit auf einem umfangreichen Datensatz von Messungen, womit die Simulation mit eigenen, von Herstellerangaben unabhängigen akustischen Daten durchgeführt werden kann.

Genauigkeit der Simulation

Gegenwärtig werden im Rahmen einer Dissertation Arbeiten zur Frage der Genauigkeit der Fluglärmsimulation durchgeführt. Es bestätigt sich dabei, dass die Berechnungsergebnisse sehr gut mit den Messdaten von Monitoringstationen übereinstimmen, wenn man die gesetzlich geforderten Jahresmittelwerte vergleicht. Es stellt sich nun die Frage, wo eine Verbesserung der Genauigkeit noch erforderlich ist. Dazu sind die Auswirkungen von Prognosefehlern - z.B. bei Entschädigungsfragen - zu untersuchen. (siehe auch Tabelle 1)



Abbildung 5 Messanordnung für die Vermessung von Helikoptern in Turtmann: Helikopter haben eine grundsätzlich andere Schallabstrahlung als Flächenflugzeuge. Entsprechend musste die Anordnung der Messmikrofone angepasst werden. Das Bundesamt für die Betriebe der Luftwaffe (BABLW) stellte zur Vermessung der Helikopter zwei Autokrane mit Auslegern von je ca. 50 Metern zur Verfügung. An die Ausleger wurden je fünf Mikrofone gehängt. Die Krane wurden in einem Abstand von ca. 150 Metern einander gegenüber aufgestellt. Dazwischen standen fünf Masten mit je einem Mikrofon am Boden und einem in fünf Metern Höhe. Insgesamt wurden 20 synchron geschaltete Mikrofone eingesetzt. Die Helikopter flogen wiederholt zwischen den Kranmasten hindurch. Auf diese Weise lässt sich ein dreidimensionales Bild der Schallabstrahlung erzeugen.

Beispiele für den Einsatz von FLULA

Das heute in einer überarbeiteten Version als FLULA2 zur Verfügung stehende Programm wird bei zahlreichen Projekten mit Erfolg eingesetzt.

Die Aufgaben gehen oft weit über das reine Berechnen der in der Öffentlichkeit bekannten Belastungskurven hinaus. Die Fragestellungen rund um den Fluglärm werden zusehends komplexer. Die politischen Entscheidungsgremien müssen mit ausreichenden Entscheidungsgrundlagen versorgt werden. Die Berechnungen umfassen teilweise die ganze Palette der Akustik (von der Messung und Modellbildung über die Erfassung der Aussenlärmsituation und deren Auswirkungen bis hin zur Bauakustik). Dazu kommen die Projekte stark in Berührung mit juristischen, soziologischen, sozio-psychologischen, raumplanerischen, ökologischen und ökonomischen Elementen. Einige der spannenden Projekte welche die EMPA interdisziplinär mit verschiedenen Partner abwickelte sind im folgenden kurz beschrieben.

Nationalfondstudie NFP26

Um den Zusammenhang zwischen der Lärmbelastung von Flug- und Strassenlärm in einem bestimmten Wohnquartier und der subjektiv wahrgenommenen Störung der Wohnqualität zu bestimmen, wurden in den Flughafenregionen Zürich und Genf im Herbst 1991 Befragungen durchgeführt. Die vom Nationalfonds finanzierte Studie [5] wurde von der Abteilung Akustik / Lärmbekämpfung der EMPA wesentlich mit geprägt. Schliesslich lieferte die Abteilung die akustischen Kenndaten. Die Fluglärmbelastung wurde für die Befragungsorte mit FLULA2 berechnet, während die Belastung durch Strassenlärm aufwändig gemessen werden musste.

Die Befragungsergebnisse und Belastungen wurden u.a. zu einer Wahrscheinlichkeitsfunktion für starke Störung durch Fluglärm korreliert. Die Funktion erwies sich als nützliches Instrument zur

Analyse von Fluglärmbelastungen. Sie wird seit 1995 in den Untersuchungen über die Auswirkungen des Flugverkehrs auf die Wohnbevölkerung angewendet.

Abklärungen für die Eidgenössische Expertenkommission

Die Hauptaussagen der Lärmstudie '90 dienten der Eidgenössischen Kommission für die Beurteilung von Lärm-Immissionsgrenzwerten zur Festlegung der Belastungsgrenzwerte für den Lärm von Landesflughäfen. Die Kommission unternahm detaillierte Abklärungen bezüglich der Auswirkungen und Konsequenzen verschiedener Grenzwertvarianten auf die Wohnbevölkerung und die Raumnutzung.

Mit der Quantifizierung der Auswirkungen des Fluglärms auf den Menschen, seinen (Wohn-) Raum und seine Umwelt wurde Neuland betreten. Es mussten Instrumente entwickelt werden, welche eine Überlagerung und Verschneidung der Bevölkerungs- und Raumplanungsdaten mit den Fluglärmbelastungskurven ermöglichten. Auf diese Weise liessen sich die Nutzung und Empfindlichkeit der lärmbelasteten Gebiete erfassen, die Wirkung des Fluglärms auf den Menschen (Störung durch Fluglärm, Aufwachhäufigkeiten) abschätzen und die Personen und Flächen über den Grenzwerten berechnen. Die Untersuchung umfasste rund 40 Gemeinden rund um die Landesflughäfen Genf Cointrin und Zürich Kloten. Ihre wichtigsten Resultate wurden im September 1997 veröffentlicht [6].

Umweltverträglichkeitsprüfung Flughafen Kloten

Bei der oben erwähnten Untersuchung handelte es sich im Prinzip um eine klassische Aufgabe von Geografischen Informationssystem GIS. Hier hat die Abteilung Akustik/Lärmbekämpfung Standards in der Darstellung und Auswertung von Fluglärmbelastungen gesetzt (Abbildung 6) [7]. Dieselben Methoden und Instrumente kamen auch im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung zur 5. Ausbautetappe des Flughafens Zürich Kloten zur Anwendung. Es mussten acht verschiedene Belastungsszenarien miteinander verglichen und deren Auswirkungen auf rund 45 Gemeinden im Umfeld des Flughafens untersucht werden. Auf der Basis der mit FLULA2 berechneten Fluglärmbelastungen und verschiedener von der EMPA entwickelter methodischer Ansätze zur Quantifizierung und Darstellung wurde vom GIS-Zentrum des Kantons Zürich eine Kartenmappe mit rund 50 Belastungs- und Grenzwertkarten erstellt und gedruckt, die Teil des von der EMPA verfassten Fachberichts waren.

Schallschutzkonzept Flughafen Kloten

Ebenfalls in Zusammenarbeit mit dem GIS-Zentrum wurden im Zusammenhang mit der 5. Ausbautetappe ein sogenanntes Schallschutzkonzept entwickelt, welches mit dem Baukonzessionsgesuch für das Dock Midfield in Zürich Kloten dem UVEK eingereicht wurde. Dabei war für jede Gemeinde mit Überschreitungen des Immissionsgrenzwertes ein Satz von Katasterplänen im Massstab 1:2500 und die dazugehörigen Datenblätter zu erstellen. Sämtliche Angaben und Darstellungen waren und sind parzellenscharf ausgestaltet, so dass für jeden Grundeigentümer ersichtlich wird, mit welchen Auswirkungen er wegen des Fluglärms zu rechnen hat (siehe Abbildung 7).

Das heutige Schallschutzkonzept wird nicht mehr durch die EMPA bearbeitet, sondern auf Grundlage des von ihr entwickelten Konzepts von einem grösseren Ingenieurbüro aus dem Raum Zürich.

Lärmbelastungskataster Militärflugplätze

Ein weiteres gutes Beispiel für die interdisziplinäre Arbeit der Abteilung im Bereich Fluglärm ist das Projekt "Lärmbelastungskataster Militärflugplätze".

Vor fünf Jahren beauftragte das Bundesamt für die Betriebe der Luftwaffe (BABLW) das Ingenieurbüro Bächtold AG in Bern und die Abteilung Akustik / Lärmbekämpfung der EMPA mit der

Erstellung der Lärmbelastungskataster (LBK) sämtlicher Militärflugplätze der Schweiz. Dabei war das Ingenieurbüro für die Erstellung der Kataster in Form von Karte und Text, die EMPA für die Fluglärmrechnungen verantwortlich. Das Projekt wurde im Sommer 2000 abgeschlossen.

Während der fünf Jahre dauernden Projektbearbeitung gingen die Fragestellungen weit über das reine Berechnen und Darstellen von Fluglärmbelastungen hinaus. So rückte die Frage der Beurteilung und Umsetzung der Kataster zusehends in den Vordergrund. Hier erwiesen sich die gemachten Erfahrungen im Zusammenhang mit der Bearbeitung des Schallschutzkonzeptes in Zürich Kloten als sehr wertvoll.

Neben den juristischen Fragen, wie z.B. die einzelnen Vorschriften der Lärmschutzverordnung zu interpretieren sind, kam auch die akustische Messtechnik nicht zu kurz:

- In den weiter oben bereits erwähnten Messkampagnen 1997 und 1998 wurden die Quelldaten der Militärjets und Militärhelikopter aktualisiert.
- 1997 wurden in Meiringen während Demonstrationsflügen mit der F/A-18, der Mirage und dem Tiger berechnete und gemessene Pegel einander gegenüber gestellt. Dabei wurden am Vortag der Demonstrationsflüge mit FLULA2 für zwei ausgewählte Standorte die Maximal- und Energiepegel einzelner Flüge berechnet. Während der Demonstrationsflüge wurden an denselben Standorten die entsprechenden Pegel gemessen und mit den berechneten verglichen (siehe Tabelle 1).
- Ebenfalls in Meiringen wurden mit Hilfe bauakustischer Messungen die Möglichkeiten der lärmtechnischen Sanierung von Holzhäusern untersucht und in einem Gutachten festgehalten.

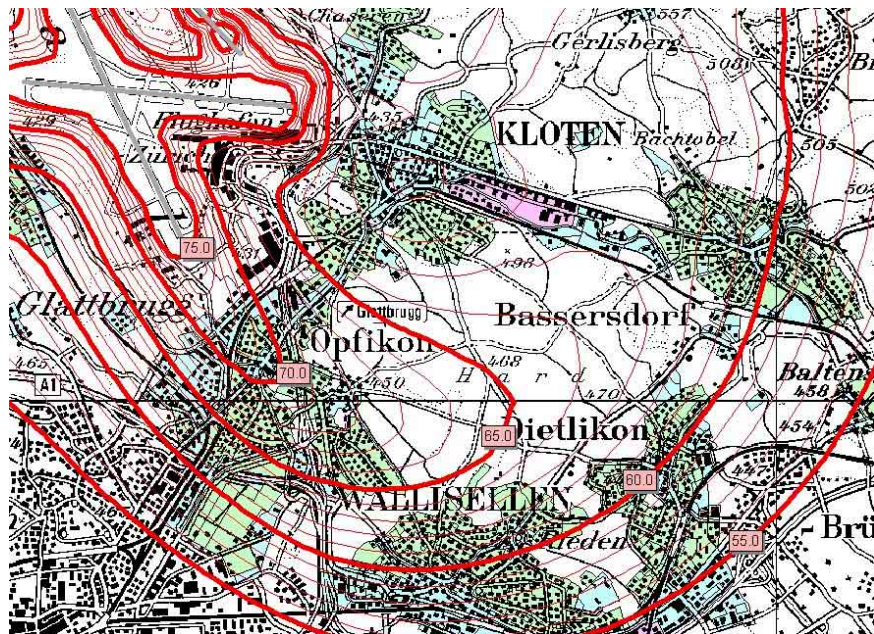
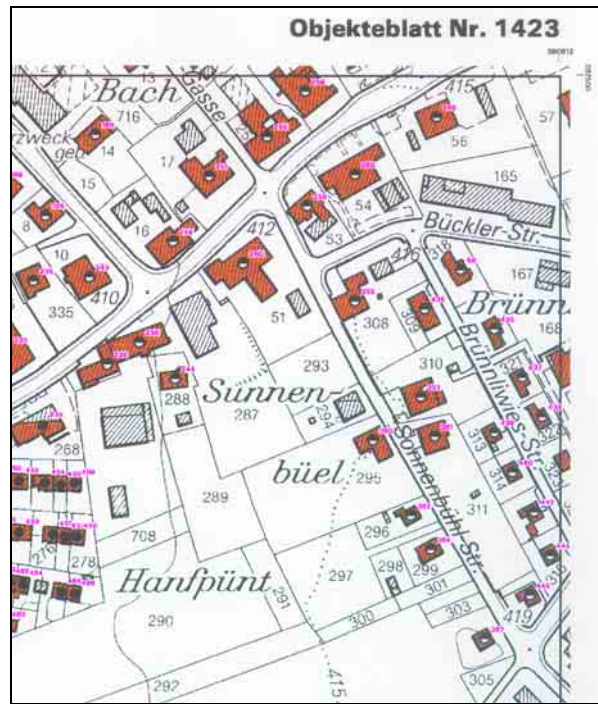


Abbildung 6 Ausschnitt einer Fluglärmbelastungskarte: Dargestellt ist die Tagesbelastung als 16-Stunden-Mittelungspegel für 1997 im Süden des Flughafens Zürich Kloten (die Äquidistanzen der Belastungskurven betragen 1 Dezibel). Die Darstellung ist mit den Nutzungen der Bauzonen ergänzt.



LBKprov: Flughafen Zürich-Kloten Gemeinde Hori

EMPA   Objektedatenblatt Nr. 1423

GVZ-Nr.	Objektbeschreibung	Adresse	Nutzungszone	ES	Fluglärmbelastung		
					Tag 16h Leq	Nacht 8h Leq	> IGW
442	Brünliwies 10		W2	2	65	57	●
364	Sonnenbühlstr. 10		W2	2	65	57	●
362	Sonnenbühlstr. 8		W2	2	65	57	●
439	Brünliwies 9		W2	2	64	57	●
440	Brünliwies 8		W2	2	65	57	●

Abbildung 7 Vorarbeiten zum Schallschutzkonzept des Flughafens Zürich Kloten; Beispiel eines Objekteblattes (oben) mit zugehörigem Objektedatenblatt (unten).

Der Fluglärm hat viele Facetten

Die bisherigen Ausführungen zeigen die vielen Facetten des Fluglärms. Die EMPA wird nicht nur in den klassischen Fragen der Simulation der Lärmbelastung gefordert. Die breiten akustischen Kenntnisse helfen, verschiedene Probleme anzugehen. Dies erweist sich heute als nützlich, wo in den stark durch Fluglärm belasteten Gebieten bauakustische Fragestellungen immer häufiger werden. Dabei reicht die Palette von Anfragen und Abklärungen von den Anforderungen an die Schalldämmung neuer Bauten innerhalb und in der Nähe des Flughafenareals über Möglichkeiten der nachträglichen Sanierung von Aussenfassaden und Holzbauten in unmittelbarer Nähe einer Fluganlage bis hin zu den Arbeiten im Rahmen der Revision der Fachnorm SIA181, welche die bautechnischen Anforderungen an den Schallschutz regelt.

Ein spannendes und zukunftsweisendes Projekt der Abteilung Akustik/Lärmbekämpfung steht ebenfalls im Zusammenhang mit dem Schallschutz in Gebieten mit hohen Immissionen. Es wurde weiter oben bereits erwähnt, dass der Fluglärm starke Anteile im Tieftonbereich aufweist, also genau dort, wo heute die Schallschutzfenster ihre schwächste Wirkung haben. Mit konventionellen Methoden ist es nicht mehr möglich, die Schalldämmung in diesem Bereich zu verbessern. Es bestehen aber Hoffnungen, dass durch den Einsatz von Sensoren und einem intelligenten Regelsystem die innere Scheibe eines Fensters mit Aktoren derart in Schwingungen versetzt werden kann, dass die von aussen eindringenden Schallwellen zu einem guten Teil kompensiert werden [8]. Diese Entwicklung steht am Anfang des neuen EMPA-Programms "Adaptive Werkstoffsysteme".

Empfangspunkt seitlich zur Piste, Pistenmitte

Flugzeug	SEL [dB(A)]			Lmax [dB(A)]		
	Simul.	Mess.	Δ	Simul.	Mess.	Δ
Tiger NB	107.4	108.1	-0.7	100.4	101.2	-0.8
Mirage NB	108.5	107.0	1.5	102.1	99.9	2.2
F/A-18 VG	112.0	111.9	0.1	103.1	104.7	-1.6
F/A-18	117.6	117.5	0.1	111.0	112.4	-1.4

Empfangspunkt in Verlängerung der Piste

Flugzeug	SEL [dB(A)]			Lmax [dB(A)]		
	Simul.	Mess.	Δ	Simul.	Mess.	Δ
Tiger NB	112.6	112.7	-0.1	108.9	107.4	1.5
Mirage NB	116.9	118.1	-1.2	114.8	114.5	0.3
F/A-18 VG	116.3	116.2	0.1	110.1	109.8	0.3
F/A-18	113.5	112.1	1.4	105.9	105.2	0.7

Tabelle 1 Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Maximal- ($L_{A,max}$) und Energiepegeln (SEL). Gemessen und berechnet während Demonstrationsflügen 1997 in Meiringen (vgl. auch Abbildung 2).

Literatur

- [1] Pietrzko S.J., Eine auf Simulationsverfahren basierende Fluglärmprognose, 4. Symposium Simulationstechnik, Informatik-Fachberichte 150, Springer-Verlag Zürich, S.649-656, 1987
- [2] Pietrzko S.J., Hofman R.F., Prediction of A-Weighted Aircraft Noise Based on Measured Directivity Patterns. Journal of Applied Acoustics 23 (1988), pp. 29-44, UK
- [3] Pietrzko S.J., R. Hofmann, R.F., Bütikofer, A. Rosenheck, The Swiss Aircraft Noise Simulation Model. NATO Symposium on Aircraft Noise Abatement Receiver Technology, Baltimore, 1994, USA
- [4] Pietrzko S.J., Hofmann R.F., Mathematical Modelling of Aircraft Noise Based on Identified Directivity Patterns, American Institute of Aeronautics and Astronautics-AIAA paper No: 96-1768, 2nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, May 6-8, 1996, State College, PA, USA
- [5] Oliva C., Lärmstudie 90, Belastung und Betroffenheit der Bevölkerung durch Flug- und Strassenlärm in der Umgebung der internationalen Flughäfen der Schweiz, Schlussbericht, Schweizer Nationalfonds, 1995
- [6] BUWAL, Belastungsgrenzwerte für den Lärm von Landesflughäfen. 6. Teilbericht der Eidgenössischen Kommission für die Beurteilung von Lärm-Immissionsgrenzwerten. September 1997.
- [7] Thomann, G., Lärmbelastung bei Flugplätzen und Flughäfen in der Schweiz – Anwendungsbeispiele für Geo-Informationssysteme. VLP-ASPAN, GEO-Informationssysteme in der Raumplanung, Schriftenfolge der Schweizerischen Vereinigung für Landesplanung Nr. 70 und Vermessung / Photogrammetrie / Kulturtechnik Nr. 4-00.
- [8] Pietrzko S.J., Vibroacoustical modelling for active control of sound transmission through a double-glazed panel. In: 4th Int. conference on motion and vibration control (MOVIC'98), ETH Zürich, 25.–28. August 1998, 5 S.