

# TGZ-These 9

## Fluglärmbekämpfung: Was leistet der Zürcher Fluglärm-Index ZFI?

### 1. Einleitung: Schalldruck und Schallausbreitung

Als *Schall* bezeichnet man Schwingungen, die sich in der Luft ausbreiten und die vom Ohr als Sinnesorgan wahrgenommen werden. Dabei unterscheidet man den einfachen *Ton*, den *Klang* und das *Geräusch* bzw. den *Lärm* [2]. Der einfache Ton ist eine sinusförmige Schwingung, die durch eine Amplitude und eine Frequenz gekennzeichnet ist. Als Klang bezeichnet man eine zeitlich periodische, aber nicht sinusförmige Schwingung, die durch eine Ueberlagerung harmonischer Schwingungen dargestellt werden kann, deren Frequenzen in einem ganzzahligen Verhältnis zur Frequenz des Grundtones stehen (*Linienspektrum*). Ein Geräusch ist Schall, der durch nicht periodische Vorgänge in der Luft entsteht. Er kann als Ueberlagerung einer unendlich grossen Zahl von Schwingungen mit infinitesimaler Amplitude und in bestimmten Frequenzintervallen kontinuierlich verteilten Frequenzen interpretiert werden (*kontinuierliches Spektrum*).

Der Schall breitet sich in der Luft bei 20°C mit einer Geschwindigkeit von 344 m/s aus. Die Empfindung des Ohres wird durch *Schwankungen des Druckes*  $p(t)$  ausgelöst. Das Ohr ist in der Lage, als untere Grenze eine sinusförmige Schallwelle mit einer Druckamplitude  $p_0$  von gerade noch etwa  $2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$  ( $1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$ ) wahrzunehmen. Nach oben bewältigt das Ohr eine enorme Dynamik von  $1:10^{13}$ . Dies ist nur deshalb möglich, weil die mit einer Druckänderung des Schalles verbundene Empfindungsänderung nicht der absoluten, sondern der *relativen Druckänderung* entspricht (Weber-Fechnersches Gesetz). Es bietet sich deshalb an, den *Schalldruckpegel* in einer logarithmischen Skala, d.h. in Dezibel (dB) anzugeben:

$$L_p = 10 \log \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right) \text{ [dB]}$$

mit  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$

Bei *Schallmessungen* kann man mit einem Frequenzfilter der Eigenschaft des Gehörs Rechnung tragen, dass die Lautstärke bei gegebenem Schalldruckpegel für unterschiedliche Frequenzen nicht gleich stark empfunden wird. Man bezeichnet diese Filterung als *A-Bewertung* und führt die Dezibel-Skala dB(A) ein.

Es ergibt sich die nachstehend festgehaltene Zuordnung der Schalldruckpegel zur Empfindung des Ohres:

<u>Schalldruckpegel [dB]</u>	<u>Empfindung</u>
130	Schmerzgrenze
110	Autohupe (in 6m Abstand)
90	Fahrender Zug
70	Unterhaltungssprache
50	Ruhiges Büro
30	Flüstern
0	Hörschwelle

Bei zeitlich variabler Beschallung verwendet man den *Mittelungspegel*

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \left\langle \frac{p^2(t)}{p_0^2} \right\rangle,$$

wobei  $\langle \cdot \rangle$  die Bildung des Mittelwerts über die Dauer der Geräuschemission bedeutet. Die Schallausbreitung von einem Flugzeug aus, das als bewegte Punktquelle modelliert werden kann, erfährt mit wachsender Distanz eine „geometrische Verdünnung“ [1]. Es gelten folgende Anhaltspunkte für die *Schallreduktion* bei Verdoppelung des Abstandes:

$$\begin{aligned} L_p: & \quad -6 \text{ dB (Reduktionsfaktor 2)} \\ L_{eq}: & \quad -3 \text{ dB (Reduktionsfaktor 1.414)} \end{aligned}$$

Die *Luftdämpfung*, die von der Temperatur und Luftfeuchtigkeit beeinflusst wird, ist erst bei Frequenzen ab 1 kHz zu berücksichtigen, kann dann aber rasch Werte von einigen 10 dB pro Kilometer annehmen. Hindernisse am Boden, Wind, Temperaturgradienten sowie Reflexionen haben in der Regel untergeordnete Bedeutung. Hingegen bieten die Häuser für die Bewohner einen gewissen Schutz gegen den zumeist von oben einfallenden Fluglärm. So bewirkt ein geschlossenes oder nur gekipptes Fenster im Durchschnitt eine Dämpfung von -25 bzw. -15 dB [6].

## 2. Lärmquellen bei Flugzeugen

Es sollen hier nur Grossflugzeuge mit Düsentriebwerken betrachtet werden, die an den Flughäfen den weitaus grössten Lärm erzeugen [1].

### 2.1 *Triebwerke*

Wenn der heisse Kernstrahl - bei heutigen Triebwerken mit dem kalten Nebenstrom - das Triebwerk verlässt, erzeugt die *Verwirbelung* an den Strahlgrenzen einen enormen Lärm, der einen breiten Frequenzbereich abdeckt.

Bis Ende der 1950er Jahre hatte man *reine Strahltriebwerke* bzw. *Einstrahltriebwerke*, die heute nur noch bei Militärflugzeugen eingesetzt werden. Sie erzeugen direkt am Düsenausgang den sog. „Jet-Noise“ mit einem Frequenzschwerpunkt oberhalb 1 kHz und im Abstand von einigen wenigen Metern den sog. „Mixing-Noise“ mit einem Frequenzschwerpunkt unterhalb 1 kHz. Seit 1960 werden nur noch *Nebenstromtriebwerke* eingesetzt, bei denen der heisse Kernstrahl beim Austritt aus der Düse mit einem kalten Luftstrom, dem Nebenstrom ummantelt wird und dadurch die Wirbelzone des Kernstrahls eine „Abschirmung“ erfährt. Diese abschirmende Wirkung wächst mit dem Verhältnis BPV (Bypass-Verhältnis) zwischen dem Nebenstrom-Luftdurchsatz und dem Kernstrahl-Luftdurchsatz. Anfänglich war BPV = 1, heute gibt es Nebenstromtriebwerke mit BPV = 6 und höher. Die mit dieser Massnahme erreichte Dämpfung lässt sich sehen: in den vergangenen 50 Jahren konnte man den Lärm um - 23 dB vermindern! Dies bedeutet eine Reduktion der normierten Schalleistung (proportional des Schalldrucks im Quadrat) um den Faktor 200, d.h. man hat heute nur noch 0.5% der Schalleistung, welche die vor 1960 eingesetzte Boeing 707-100 abstrahlte.

Allerdings lässt sich das BPV nicht beliebig vergrössern. Die Abmessungen der Triebwerke werden grösser bzw. der Schub nimmt ab, falls die Dimensionen der Triebwerke beibehalten werden sollen. Ganz allgemein kann man sagen, dass auch der Betrieb von „leisen“ Flugzeugen teurer ist.

Abschliessend sei noch erwähnt, dass der Triebwerkslärm beim Start vor allem durch den Fan (Eingangsgebläse) und den Kernstrahl sowie bei der Landung durch den Verdichter, die Brennkammern und die nachfolgende Turbine bedingt ist.

## 2.2 Umströmungslärm

Nicht zu vernachlässigen sind die lärm erzeugenden Wirbel, die sich am ausgefahrenen Fahrwerk, an den Flügeln und Klappen sowie an offenen Hohlräumen von Flügeln und Fahrwerkschächten bilden. Der Lärm des dadurch bedingten Rauschens und Heulens ist bei Landeanflügen ebenso gross wie der Triebwerkslärm.

## 2.3 Das Potenzial technischer Neuerungen zur Reduktion des Fluglärms

Bei den Triebwerken denkt man an verschiedene *konstruktive Aenderungen*, die den Rotor und Stator (Anordnung, Schaufelzahl und –form) sowie die Düse (Zahnung) betreffen. Ebenso sieht man Verbesserungsmöglichkeiten bei der Führung des Nebenluftstromes. Ferner werden neue Triebwerkskonzepte untersucht, bei denen am Triebwerkseingang offene, gegenläufig rotierende Doppelfans vorgesehen sind. Dabei müssen natürlich neben der Lärmreduktion angemessene Grenzen des Treibstoffverbrauchs eingehalten werden.

Schliesslich stehen *neuartige Flugzeugkonzepte* zur Diskussion, bei denen durch geeignete Anordnung der Triebwerke, z.B. oberhalb der Flügel, eine geringere Lärmabstrahlung nach unten erfolgt.

Die EU hat Ziele zur Reduktion der Emissionen gesetzt, die bezogen auf 2010 nochmals eine Lärminderung von -10 dB verlangen. Man rechnet damit, dass entsprechende Technologien bis 2020 entwickelt und bis etwa 2040 umgesetzt sein könnten.

## 3. Optimierung der Start- und Landeverfahren

Die Fluglärmemission führt vor allem im näheren Umkreis von Flughäfen zu einer Belästigung der Bevölkerung. Deshalb hat die Optimierung der Start- und Landeverfahren grosse Bedeutung.

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass eine bestimmte *Flughafenanlage* mit einem System von Pisten und Rollwegen vorgegeben ist. Als feste Randbedingungen

gelten auch die Beschaffenheit des Geländes und dessen Bebauung sowie die durchschnittlichen Wetterverhältnisse. Ferner existieren *Auflagen* in Form von Verträgen mit Anstössern und Nachbarländern, die eingehalten werden müssen.

Unter Berücksichtigung dieser Gegebenheiten sowie unter Einbezug des Flugverkehrsaufkommens sind nun die Start- und Landeverfahren so zu optimieren, dass die Lärmbelastung der Bevölkerung möglichst gering bleibt. Hierzu ist es notwendig, den Fluglärm in der Flughafenregion *flächendeckend* ermitteln zu können. Als Nebenbedingung sind die Flugwege so zu wählen, dass die Sicherheit in der Luft und am Boden (Schadensbegrenzung bei Abstürzen) möglichst gross ist. Ferner muss der Treibstoffverbrauch in Grenzen gehalten werden, was z.B. rasche Steigflüge beim Start, die im Hinblick auf die Lärmbelastung am Boden wünschbar wären, einschränkt.

Eine derart komplexe Aufgabe kann nur mit *Simulationsverfahren* gelöst werden. Dazu sind Computer mit angemessener Rechenleistung notwendig.

Es gibt seit einigen Jahren weltweit verschiedene computergestützte Verfahren zur Berechnung des Fluglärms. Hier soll nur kurz auf das von der Empa entwickelte Simulationsverfahren FLULA2 eingegangen werden [3]. Eingegeben werden die Topographie, die Bewegungsdaten, eine Modellierung der Flugzeugtypen (Richtcharakteristik, Leistungssetzung) und die räumlichen Verläufe der Flugbahnen. Als Resultat ergibt sich die Fluglärmbelastung am Boden in Form von Mittelungspegel [dB], Beurteilungspegel [dB(A)], Umhüllende (Orte gleicher Beschallung) usw. Akustische Messungen vor Ort zeigen eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Schalldruckpegeln. Die Unsicherheit liegt zwischen 0.5 dB bei Langzeit-Mittelwerten und mehreren dB bei Messungen von Einzelflügen. Mit FLULA2 werden am Flughafen Kloten die Jahresbelastungen berechnet sowie Varianten- und Lärmwirkungsstudien durchgeführt.

#### 4. Erfassung der Fluglärmwirkung auf die Bevölkerung

Man unterscheidet vier Arten von Lärmwirkungen [1]:

1. Psychologische Lärmwirkung
2. Physiologische Lärmwirkung
3. Soziale Lärmwirkung
4. Oekonomische Lärmwirkung

Jede dieser vier Wirkungsarten lässt sich in 5 – 7 Unterarten aufteilen. Unter Berücksichtigung der individuellen Sensibilität des Menschen auf diese Vielzahl von möglichen Einflüssen ergibt sich ein komplexes *Belästigungs- und Schädigungspotenzial*, das sich kaum quantifizieren lässt. Es stellt sich damit die Frage nach einer möglichen Vereinfachung. Gemäss Art. 15 des in der Schweiz geltenden Umweltschutzgesetzes soll der Lärm so eingeschränkt werden, dass „die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden nicht erheblich gestört wird“. Somit haben die Lärmwirkungen 3 und 4 untergeordnete Bedeutung und können im Folgenden vernachlässigt werden. Bei den Lärmwirkungen

1 und 2 liegt es nahe, nur gerade diejenigen Unterarten herauszugreifen, die eine *unmittelbare Beeinträchtigung* des „Wohlbefindens“ zur Folge haben. Es sind dies am Tag (6 – 22 Uhr) die *starke Lärmbelästigung* (Ruhestörung bei konzentrierter Tätigkeit, Störung der Sprachkommunikation etc.) sowie in der Nacht (22 – 6 Uhr) der *stark gestörte Schlaf* (Verringerung der Schlaftiefe, Aufwachreaktionen). Die Quantifizierung dieser beiden Wirkungen ist Gegenstand einer Vielzahl von Feldstudien im In- und Ausland [4].

Die „Starke Lärmbelästigung“ (Highly Annoyed, HA) ist eine *statistische Grösse*, deren *Auftrittswahrscheinlichkeit*  $P_{HA}$  als Funktion des mittleren, bewerteten Schalldruckpegels  $L_{eq}$  [dB(A)] angegeben werden kann. Sie resultiert aus der Befragung einer grösseren Personengruppe in Zonen gleicher Beschallung. Dieselbe Aussage gilt für die dem „Stark gestörten Schlaf“ (Highly Sleep Disturbed, HSD) zugeordnete *Auftrittswahrscheinlichkeit*  $P_{HSD}$ , die aber im Gegensatz zur Wahrscheinlichkeit  $P_{HA}$  nicht einfach direkt vom Mittelwert  $L_{eq}$  abhängt, sondern aus einer Anzahl  $n$  aufeinanderfolgender Maximallärmpegel bestimmt werden muss [5]. Es handelt sich dabei um Einzelwirkungen, die durch Starts, Ueberflüge etc. bedingt sind.

Zu erwähnen bleibt noch der Umstand, dass der „benötigte Lärmpegel“, z.B. für  $P_{HA} = 25\%$ , in den letzten drei Jahrzehnten kontinuierlich um rund 10 dB(A) gesunken ist, d.h. die Bevölkerung reagiert empfindlicher [1]. Dies verschlechtert leider die positive Wirkung der durch technische Massnahmen erzielten Minderung des Fluglärms. Die Ursache ist nicht bekannt, könnte aber mit einer allgemein zu beobachtenden geringeren Belastungstoleranz unserer heutigen Gesellschaft verbunden sein.

## 5. Zürcher Fluglärm-Index ZFI

Aufgrund der durch Simulation gewonnenen Wahrscheinlichkeiten  $P_{HA}$  und  $P_{HSD}$  für jedes Flächenelement im Umfeld eines Flughafens - hier des Flughafens Kloten - kann nun die Zahl der Personen, die dort wohnen bzw. arbeiten und einer starken Lärmbelästigung bzw. einer starken Schlafstörung ausgesetzt sind, ermittelt werden. Dazu ist die Zahl der im Flächenelement anwesenden Personen mit der Wahrscheinlichkeit  $P_{HA}$  bzw.  $P_{HSD}$  entsprechend der dort herrschenden Beschallung zu multiplizieren. Eine Integration über die Fläche des Flughafen-Umfeldes liefert dann die gesamte Anzahl  $N_{HA}$  der stark lärmbelästigten und die gesamte Anzahl  $N_{HSD}$  der stark schlafgestörten Personen. Die Summe  $N_{HA}$  und  $N_{HSD}$  beschreibt somit die Bevölkerungszahl in der Flughafenregion, die durch den Fluglärm – statistisch gesehen - real beeinträchtigt wird. Sie stellt als sog. *Zürcher Fluglärm-Index*  $ZFI = N_{HA} + N_{HSD}$  ein *Beurteilungsmass* für die Weiterentwicklung der Lärmeinwirkung dar und schafft Entscheidungsgrundlagen für Massnahmen zum Schutz der Bevölkerung. Der ZFI betrug 2012 rund 59000 und weist zur Zeit eine ansteigende Tendenz auf [7]. Dies betrifft vorwiegend den Anteil  $N_{HSD}$ , der Anteil  $N_{HA}$  scheint geringeren Schwankungen unterworfen zu sein [6].

Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass die für die Berechnung verwendeten Flächenelemente 100m x 100m betragen (Hektarelemente) und dass die Anzahl der

darin vorhandenen Personen recht genau ermittelt werden können. Ferner setzt man einen Grenzwert für die Wahrscheinlichkeiten  $P_{HA}$  bei 25% und für  $P_{HSD}$  bei etwa 5% und wertet Flächenelemente, die diese Grenze unterschreiten, nicht aus. Die entsprechenden, bewerteten Schalldruckpegel, die dann unberücksichtigt bleiben, liegen in den Bereichen  $L_{eq} < 62$  dB(A) bzw.  $L_{eq} < 52$  dB(A). Eine solche Begrenzung ist natürlich willkürlich, aber von den praktischen Erfahrungen her vertretbar, und sie erlaubt eine erhebliche Reduktion der Anzahl Flächenelemente, die eine bedeutende Verkürzung der Rechenzeiten zur Folge hat. Für weitere Einzelheiten zu den Berechnungsverfahren sei auf [3] und [5] verwiesen.

## 6. Fazit

Der Lärm, der beim Betrieb eines Grossflughafens in einem dicht besiedelten Gebiet entsteht, muss zum Schutz der betroffenen Bevölkerung in annehmbaren Grenzen gehalten werden. Damit stellt sich die Frage nach einem *Mass*, das die Beeinträchtigung der Lebensqualität durch Fluglärm *quantitativ* erfassen kann.

Eine absolute Bestimmung der Lärmeinwirkung auf den Menschen ist kaum möglich, weil es sich letztendlich um eine *subjektive Empfindung* handelt. Wohl aber lassen sich aufgrund von technisch-physikalischen Gegebenheiten des Flugbetriebes, der räumlichen Situation der Flughafenanlage und des Umfeldes sowie der psychologisch-physiologischen Auswirkungen des Fluglärms auf den Menschen als statistisches Phänomen (erfassbar durch Feldstudien) *Messgrössen* herleiten, mit denen *Veränderungen* der Beeinträchtigung der Lebensqualität der Bevölkerung in der Flughafenregion verfolgt werden können.

Der *Zürcher Fluglärm-Index* ZFI ist eine solche Messgrösse, die aufgrund ihrer Definition die Zahl der Personen in der Flughafenregion angibt, welche durch Fluglärm *stark belästigt* und/oder *im Schlaf stark gestört* sind. Der ZFI macht aber keine Aussage darüber, ob diese Beeinträchtigung in annehmbaren und damit langfristig tolerierbaren Grenzen liegt. Die Festsetzung eines *Grenz- oder Richtwertes des ZFI* (2007: ZFI = 47000) ist deshalb *willkürlich*. Wohl aber handelt es sich beim ZFI um ein einigermaßen *transparentes* und mit angemessenem Aufwand *handhabbares Beurteilungsmass*, um die weitere *Entwicklung* bzw. *Veränderung* der Lärmverhältnisse und deren Wirkung auf die Bevölkerung zu verfolgen.

Im Gegensatz zur simplen Forderung, den Fluglärm durch Einschränkungen des Flugverkehrs zu vermindern, schafft der ZFI *Entscheidungsgrundlagen* für die Reduktion der Lärmeinwirkung mittels technischer Massnahmen. So erlaubt er längerfristig eine Aussage, welche Verbesserungen die in Kap. 2 erwähnten *technologischen Neuerungen* zur Fluglärmreduktion erbringen können und welchen Beitrag eine *Optimierung der Start- und Landeverfahren* leistet (Kap. 3). Ebenso werden Auswirkungen allfälliger *Aenderungen des Flughafenregimes* (Südanflüge und –starts, gekröpfter Anflug etc.) erkannt. Ferner spielt der ZFI eine wichtige Rolle, um das Verbesserungspotenzial durch *bauliche Massnahmen* an den Wohnhäusern (Fenster, Ersatzbauten etc.) zu erfassen. Bei allen diesen Betrachtungen müssen natürlich die

*Bevölkerungsmigration* in der Flughafenregion sowie die *Zu- oder Abnahme des Flugverkehrs* im Auge behalten werden [7].

Was die Definition des ZFI anbelangt, könnte man versuchen, noch weitere Einflüsse der Lärmeinwirkungen auf den Menschen einzubeziehen (Kap. 4) oder auch Sicherheitsrisiken am Boden zu berücksichtigen. Aber die wachsende Komplexität, verbunden mit einem entsprechenden Mehraufwand bei der Simulation (Rechenzeit) und einer Abnahme der Transparenz würde wohl die Aussagekraft des ZFI nur unwesentlich verbessern. Der ZFI in der vorliegenden Form stellt deshalb für die Bevölkerung, Wirtschaft und Politik ein *zweckmässiges Beurteilungsmass* im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung der Flughafenregion Zürich dar.

### Referenzen

[1] K. Eggenschwiler, „Fluglärm – eine komplexe technische und gesellschaftliche Herausforderung“. TGZ-Vortrag, ETH Zürich, 4. Nov. 2013

[2] P. Frauenfelder, P. Huber, „Einführung in die Physik“, Band II. E. Reinhardt Verlag AG, Basel 1958, Akustik, p. 310 -332

[3] EMPA: „FLULA2, ein Verfahren zur Berechnung und Darstellung der Fluglärmbelastung“. Technische Programmdokumentation (Version 4), Dübendorf, 4. Sept. 2010

[www.empa.ch/plugin/template/empa/\\*/99854](http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/99854)

[4] Deutsches Umweltbundesamt: „Lärmwirkungen, Dosis-Wirkungsrelationen.“ D-06813 Dessau-Rossau, 27. Nov. 2008

[www.bundesumweltamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3917\\_0.pdf](http://www.bundesumweltamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3917_0.pdf)

[5] EMPA: „Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2010“, Bericht zu Händen des Verkehrsamtes des Kantons Zürich. Dübendorf, 25. Okt. 2011

[http://pro-flughafen.ch/wp-content/uploads/pdf/9\\_Be\\_EMPA\\_ZFI\\_111025.pdf](http://pro-flughafen.ch/wp-content/uploads/pdf/9_Be_EMPA_ZFI_111025.pdf)

[6] Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Zürich, Amt für Verkehr, „Der Zürcher-Fluglärm-Index (ZFI) im Jahr 2012“. Bericht (800 Expl., 52 Seiten), Zürich, 06. Nov. 2013

<http://www.afv.zh.ch/zfi> → Aktuelle ZFI Dokumente

[7] A. Schürer „Hoffen auf leisere Flugzeuge“. NZZ, 29. Nov. 2013, Nr. 278, p. 17

Stand: 24.03.2014. Geändert am: