

SEMINARARBEIT

Fluglärm



**Wir wecken Sie täglich.
Versprochen!***



*Wind Nord/Ost Startbahn null drei,
Bis hier hör' ich die Motoren.
Wie ein Pfeil zieht sie vorbei,
Und es dröhnt in meinen Ohren ...*

Reinhard Mey – Über den Wolken

Meike Dünnweber
St.-Anna-Gymnasium
10. November 2015

S E M I N A R A R B E I T

Rahmenthema des Wissenschaftspropädeutischen Seminars:

Faszination Fliegen – von Ikarus zur Marsmission

Leitfach: Physik

Thema der Arbeit:

Fluglärm

Verfasserin:

Meike Dünneweber

Kursleiterin:

Frau Wagner

Abgabetermin:

10. November 2015

Inhalt

1	Einleitung.....	4
2	Physikalische und physiologische Aspekte	5
2.1	Charakteristische Größen des Schalls.....	5
2.1.1	Schallwellen.....	5
2.1.2	Schallintensität und Lautstärke	5
2.2	Begriffsklärung Geräusch – Lärm	8
2.3	Schallentstehung im und am Flugzeug	9
2.3.1	Triebwerkslärm.....	9
2.3.2	Aerodynamischer Lärm.....	10
2.4	Entstehung des Überschallknalls	11
2.5	Ausbreitung des Schalls	12
3	Technische Maßnahmen zur Verringerung der Lärmbelästigung.....	15
3.1	Minderung des Triebwerkslärms am Flugzeug	15
3.2	Minderung des aerodynamischen Lärms am Flugzeug	17
3.3	Lärmindernde Flugverfahren	18
3.3.1	Auswirkungen von verschieden steilen Steigkurven beim Abflugverfahren.....	18
3.3.2	Anflugverfahren.....	20
3.4	Passiver Schallschutz	22
4	Rechtliche Grundlagen in Deutschland	22
5	Zusammenfassung	24
	Anhang.....	a
	A Abbildungsverzeichnis	a
	B Literaturverzeichnis	b

1 Einleitung

Geschäftsreisende, Urlauber und der Luftfrachtverkehr tragen dazu bei, dass der Luftverkehr immer mehr zunimmt. Fluglärm ist ein anhaltend aktuelles Thema, das nicht nur Flughafenanrainer betrifft. Während die Passagiere per Flugzeug möglichst schnell und bequem am Zielort ankommen möchten, sind sie sich der dadurch für die Umgebung entstehenden Nachteile oft wenig bewusst. Der beim Fliegen entstehende Lärm ist meist das Hauptargument der Anwohner gegen den Bau neuer oder Erweiterungen bestehender Flughäfen, wie die Diskussion um den Bau einer dritten Startbahn beim Münchner Flughafen und die große Anzahl von Bürgerinitiativen gegen Fluglärm zeigt.

Die stete Zunahme des Flugverkehrs und ein Wandel in der Wahrnehmung des Lärms machen Fluglärm zu einem aktuellem Forschungsgebiet, das stark im Interesse der Bevölkerung steht. Zwar wurden seit den Anfängen der Verkehrsluftfahrt bereits große Fortschritte in der Lärm-minderung erzielt, doch gibt es noch vielzählige Möglichkeiten, den Lärm weiter zu reduzieren.

Diese Arbeit konzentriert sich auf Fluglärm, der von Flugzeugen als den wichtigsten Luftverkehrsmitteln erzeugt wird. Es werden zunächst die physikalischen und physiologischen Grundlagen des Schalls erklärt, die für die Wahrnehmung des Lärms entscheidend sind. Im Detail wird auf die Entstehung und die Ausbreitung des Fluglärms eingegangen. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit liegt auf den Möglichkeiten zur Verringerung von Fluglärm; hierbei können sowohl die Aerodynamik und die Triebwerke des Flugzeuges als auch die Flugverfahren optimiert werden. Dazu werden neuere Forschungsergebnisse dargestellt, wie sie beispielsweise von der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt gewonnen wurden. Abschließend geht die Arbeit auf die Gesetzeslage in Deutschland ein, die ausschlaggebend für die Erforschung des Fluglärms ist.

2 Physikalische und physiologische Aspekte

Bei der Betrachtung akustischer Phänomene spielen sowohl die physikalischen Grundlagen der Schallentstehung und Schallausbreitung als auch die physiologische Schallempfindung eine Rolle.

2.1 Charakteristische Größen des Schalls

2.1.1 Schallwellen

Schallwellen sind longitudinale Materialwellen. Eine Störung (Druckschwankung) breitet sich in einem bestimmten Material in alle Raumrichtungen aus. Diese kurzzeitige Änderung des Drucks überlagert sich dem Normaldruck und ist im Vergleich zu diesem sehr gering (weit unter Promille)¹. Die Teilchen schwingen dabei entlang der Ausbreitungsrichtung der Welle.

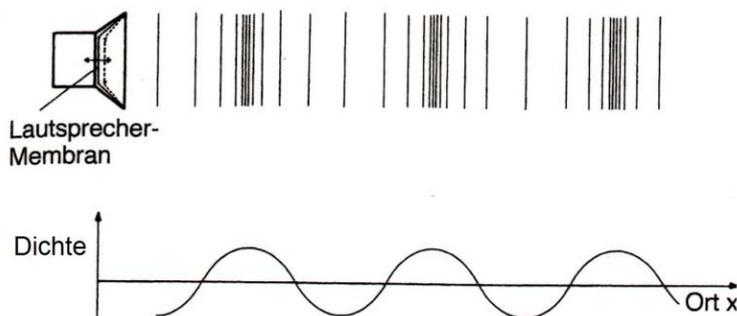


Abbildung 1 Sinusschwingung; [2], S. 89

Hierbei kann man die Dichte ρ in Abhängigkeit des Ortes x und der Zeit t aufzeichnen. Es ergeben sich Sinusschwingungen (Abbildung 1)

$$\rho(x) = \rho(0 \text{ tiefgestellt}) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right)$$

$$\rho(t) = \rho(0 \text{ tiefgestellt}) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$$

mit der Wellenlänge λ und der Schwingungsdauer $T = 1/f$ (f = Frequenz).

Über diese beiden Größen lässt sich auch die Schallgeschwindigkeit berechnen, also die Geschwindigkeit, mit der sich der Schall ausbreitet:

$$c = \lambda / T = \lambda \cdot f.$$

In Luft bei 20° C beträgt die Schallgeschwindigkeit c beispielsweise ca. 340 m/s.²

2.1.2 Schallintensität und Lautstärke

Eine Schallquelle gibt Energie ab. Wird in der Zeit t die Energie E von der Quelle wegtransportiert, so lässt sich die Leistung P zur Beschreibung einer Schallquelle verwenden:

$$P = E/t.$$

Unter der Annahme einer isotropen Ausstrahlung, erhält man die Schallintensität I an einem Ort im Schallfeld, indem man diese Größen mit der Fläche A , über die die Leistung abgegeben wird, in Bezug setzt:

¹ [1], S. 11-12

² [2], S. 87-91

$$I = E / (t \cdot A).$$

Diese Definition kann auch für nicht isotrope Ausstrahlung verwendet werden, wobei $P = E/t$ die Energiemenge pro Zeit am Ort im Schallfeld bezeichnet.

Für das menschliche Schallempfinden – wie auch für das Empfinden anderer Sinneseindrücke – ist es wichtig, dass eine große Skala abgedeckt wird. Laut dem Weber-Fechnerschen Gesetz ist die empfundene Lautstärke proportional zum Logarithmus der Intensität³. Daher wird die (physiologische) Lautstärke L wie folgt definiert:

$$L = 10 \log (I_{\text{ref}} / I_0);$$

$$[L] = 1 \text{ Phon (dimensionslos)};$$

I_{ref} entspricht der Intensität eines als gleich laut empfundenen Tones mit $f = 1 \text{ kHz}$;

$$I_0 = 10^{-12} \text{ J/s m}^2.$$

Der Referenzwert für die Schallintensität I_{ref} wird zur Anpassung an die vom menschlichen Gehör empfundene Lautstärke verwendet. Die empfundene Lautstärke hängt nicht nur von der Intensität, sondern auch von der Frequenz eines Tones ab.

Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 2 verdeutlicht: Aufgetragen ist die (physikalische) Intensität gegen die Frequenz. Die beiden blau eingezeichneten Kurven verbinden Töne gleicher empfundener Lautstärke. Der durchschnittliche Hörbereich des Menschen liegt zwischen 16 und 20 000 Hz⁴ (grün eingezeichnet).

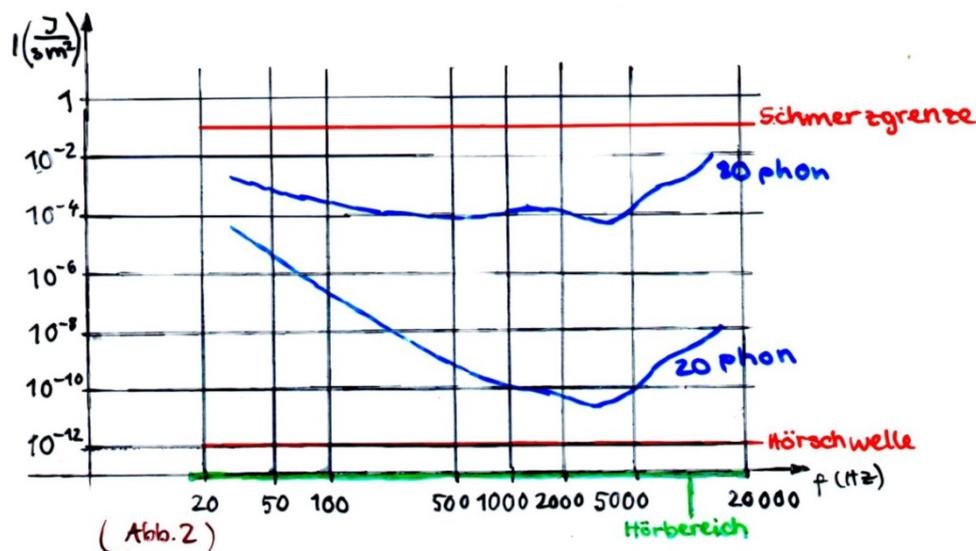


Abbildung 2 Intensität und empfundene Lautstärke als Funktion der Frequenz nach [2], S. 94

Erkennbar ist, dass für Töne niedriger und sehr hoher Frequenzen eine wesentlich höhere Intensität nötig ist, um die gleiche empfundene Lautstärke von 20 Phon zu erreichen als für einen Ton mittlerer Frequenz, beispielsweise bei $f = 3000 \text{ Hz}$. Dagegen verläuft die Kurve für $L = 80$

³ [1], S. 52

⁴ [2], S. 89

Phon deutlich flacher, das heißt bei großer Lautstärke ist die Frequenzabhängigkeit des Sinnesindrucks weniger stark ausgeprägt.

Die Referenzintensität I_0 in obigen Formeln wurde so gewählt, dass eine Lautstärke von 0 Phon der Hörschwelle entspricht. Der Faktor 10 bewirkt, dass Unterschiede von 1 Phon für den Menschen gerade noch hörbar sind.⁵

In der folgenden Tabelle sind Schallquellen mit der jeweiligen Lautstärke eingetragen⁶.

Schallquelle	Lautstärke
Schmetterlingsgeräusch nahe dem Ohr	0 Phon
Taschenuhr, 1 m entfernt	20 Phon
Lautsprechermusik im Zimmer	60 Phon
Gesundheitsschäden bei dauerhafter Beschallung	70 Phon
Flugzeugmotor in 4 m Abstand	120 Phon
Irreversible Ohrschädigung nach $\frac{1}{2}$ min	120 Phon

Neben diesen Größen wird in der Literatur auch das Pegelmaß verwendet, das wie folgt definiert ist:

$$Z = 10 \log (P / P_0);$$

$$[Z] = 1 \text{ dB (dimensionslos);}$$

$$P_0 = 10^{-12} \text{ Watt;}$$

Diese Größe wird sowohl für die Beschreibung der Quelle als auch des Schallfeldes verwendet. Sie wird oft mit Bewertungsfiltren gewichtet.

Diese dienen ebenfalls der Anpassung an das Lautstärkeempfinden des menschlichen Gehörs durch frequenzabhängige Korrekturbeträge, wie sie in Abbildung 3 dargestellt sind. Da sich die Frequenzabhängigkeit mit steigender Lautstärke verringert, sind die Filter zur Bewertung verschieden großer Lautstärken gedacht: Filter A ist für geringe und Filter C für hohe Lautstärken optimiert, wobei Filter A am häufigsten verwendet wird⁷.

Der verwendete Filter wird meist in Klammern oder als Fußnote nach der Einheit Dezibel angegeben (beispielsweise dB (A)).

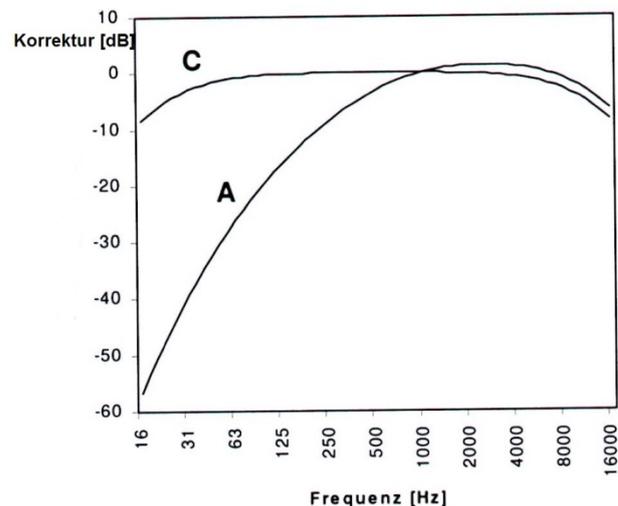


Abbildung 3 Bewertungsfiltren; [1], S. 71

⁵ [2], S. 93 f

⁶ nach [2], S. 93 und [3], S. 278

⁷ [1], S. 70-71

2.2 Begriffsklärung Geräusch – Lärm

Als Ton wird der Schall mit genau einer Frequenz bezeichnet, als Klang der durch Überlagerung von mehreren Frequenzen entstehende Schall. Im Gegensatz dazu entsteht ein Geräusch bei der nicht periodischen Überlagerung von vielen Frequenzen. In Abbildung 4 werden die Frequenzspektren eines Klanges (links) und eines Geräusches (rechts) gegenübergestellt. Während der Klang durch ein Spektrum einzelner Frequenzen charakterisiert wird, zeigt sich beim Geräusch ein kontinuierliches Spektrum⁸.

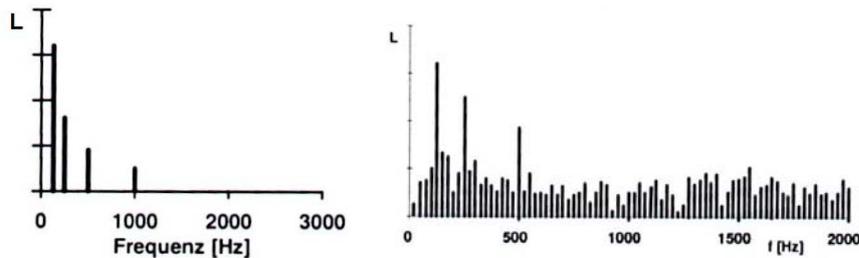


Abbildung 4 Frequenzspektren: Lautstärke in Abhängigkeit der Frequenz, Gegenüberstellung Klang – Geräusch; [1], S. 34

Ob Klänge oder Geräusche als Lärm empfunden werden, hängt bekanntlich von psychologischen Faktoren ab.⁹ So werden verschiedene Geräusche gleicher Lautstärke oft als unterschiedlich störend empfunden. Beispielsweise wird das Vogelzwitschern am Sonntagvormittag kaum eine Belästigung darstellen, bereits das leise Ticken einer Uhr kann hingegen als sehr nervend empfunden werden.

Eine eindeutige Definition von Lärm ist daher schwierig. So wird Lärm im Duden als „als störend und unangenehm empfundene laute, durchdringende Geräusche“ umschrieben, wobei es vom Empfinden des Einzelnen abhängt, ob ein Geräusch als störend empfunden wird. Die Verwaltungsvorschrift „Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm“ dient dem „Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Geräusche“¹⁰. Schädliche Geräusche sind hier „Geräuschmissionen, die nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen“¹¹ – eine sehr weitgefasste Definition.

⁸ [1], S. 31-35

⁹ [1], S. 140-141

¹⁰ [4], 1

¹¹ [4], 2.1

2.3 Schallentstehung im und am Flugzeug

Beim Betrieb eines Flugzeuges entsteht der Großteil des Schalls an Fahrwerk, Flugwerk und Triebwerk (siehe Abbildung 5). Allgemein unterscheidet man zwischen aerodynamischen Lärm und Triebwerkslärm.

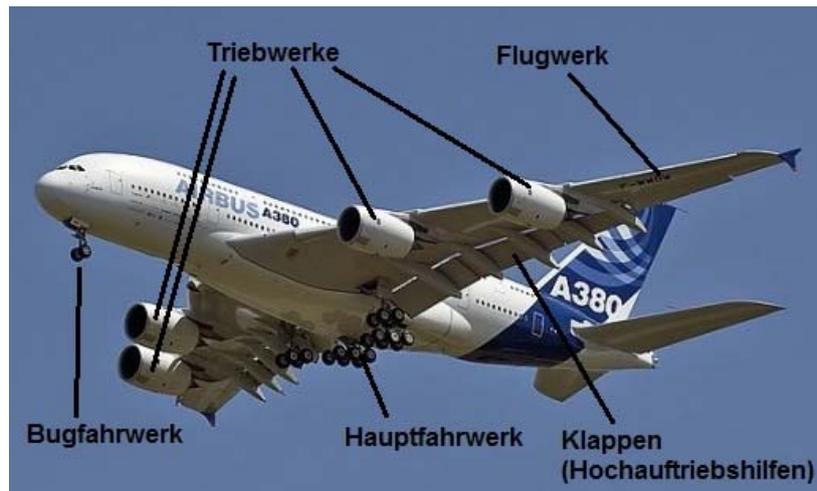


Abbildung 5 Fahrwerk, Flugwerk, Triebwerk am Airbus A380 nach http://www.aerospaceweb.org/aircraft/jetliner/a380/a380_16.jpg

2.3.1 Triebwerkslärm

Beim Starten eines Flugzeuges stammt ein Großteil des Lärms vom Triebwerk¹². Üblicherweise werden in Verkehrsflugzeugen Zweistrom-Turbo-Luftstrahltriebwerke (ZTL) verwendet (Aufbau siehe Abbildung 6).

Der Luftstrom wird bei diesen Triebwerken in einen kalten Bypassluftstrom und einen warmen Luftstrom aufgeteilt. Das Verhältnis von Warm- und Kaltluftstrom wird als Bypassverhältnis bezeichnet¹³.

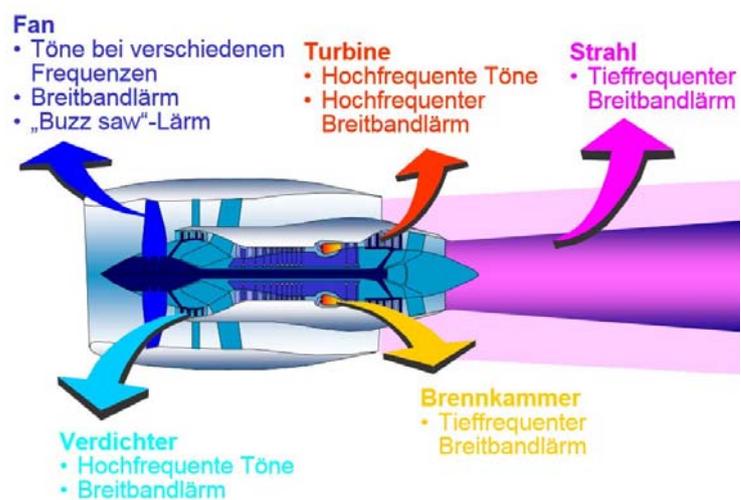


Abbildung 6 Schallquellen eines Zweistromturbostrahltriebwerks, der Luftstrom fließt von links nach rechts; http://elib.dlr.de/70339/1/Laermminderung_Flugzeuge.pdf

Im Triebwerk entsteht der Lärm am Fan (Gebläse), am Verdichter, an der Turbine, an der Brennkammer, und am Strahl, bzw. beim Vermischen der beschleunigten warmen und kalten Luft aus dem Triebwerk mit der umgebenden Luft. Die einzelnen Bauteile emittieren Schall in unterschiedlichen Frequenzbereichen (siehe Abbildung 6). Als Schallverursacher zu erwähnen sind hierbei insbesondere der Fan, der ein störendes „Kreissägengeräusch“ („buzz saw noise“)

¹² [5], S. 947

¹³ [5], S. 950

emittiert, und der Strahl, der auch hinter dem Flugzeug lästige tieffrequente Töne erzeugt¹⁴. Beim Fan lassen sich einige Frequenzen auf die regelmäßigen Luftverdichtungen aufgrund der rotierenden Schaufeln zurückführen.

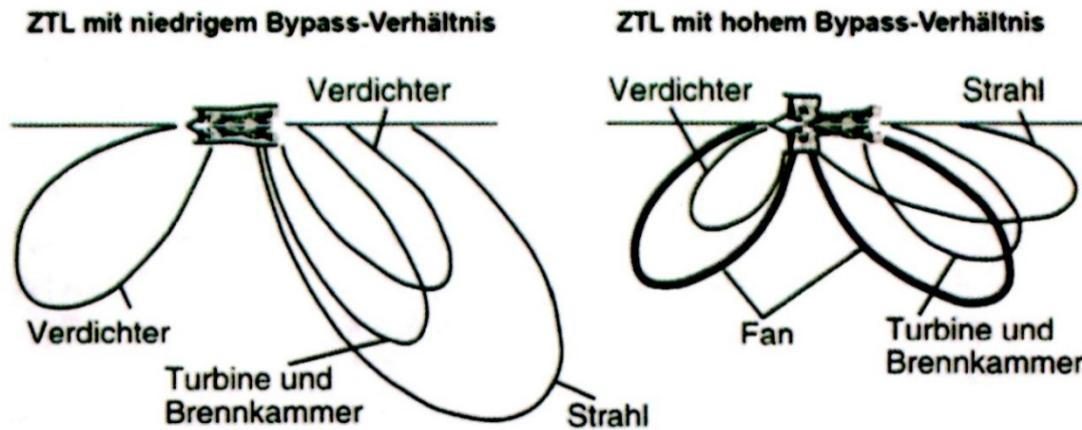


Abbildung 7 Vergleich niedriges vs. hohes Bypass-Verhältnis, schematische Darstellung des Schallpegels und der Abstrahlrichtung; [5], S. 951

In modernen Verkehrsflugzeugen wird aufgrund einer höheren Effizienz (das heißt weniger Treibstoffverbrauch für gleiche Leistung) das Bypassverhältnis zunehmend erhöht¹³. Dies führt dazu, dass der Fanlärm stärker über die anderen Lärmquellen im Flugzeug dominiert, wie in Abbildung 7 erkennbar. Außerdem sind jeweils die Abstrahlrichtungen der einzelnen Bauteile dargestellt.

2.3.2 Aerodynamischer Lärm

Als aerodynamischen Lärm bezeichnet man den Anteil des Lärms, der durch die Umströmung der Luft um bestimmte Bauteile des Flugzeugs entsteht.¹⁵ Luftwirbel erzeugen hier Druckwellen, also Lärm.

Lärmentstehung am Fahrwerk

Das Fahrwerk eines Flugzeugs mit den Rädern, auf denen das Flugzeug beim Starten und Landen rollt, besteht üblicherweise aus einem Haupt- und einem Bugfahrwerk. Während des Starts verursacht es Lärm, der jedoch vom Triebwerkslärm übertönt wird. Während des restlichen Fluges bleibt das Fahrwerk eingezogen und kann als Lärmquelle vernachlässigt werden, bei der Landung hingegen ist das Fahrwerk einer der Hauptlärmverursacher¹⁶.

Am Fahrwerk entsteht der Lärm unter anderem am Drehgestell, an den Bremsen, den Felgenhohlräumen, den Gelenkverbindungen und der Schachttür-Bein-Kombination. Der Lärm kommt

¹⁴ [1], S. 233-234

¹⁵ [5], S. 946 ff

¹⁶ [5], S. 947

vor allem durch Luftverwirbelungen an den vielen Kanten, Schlitzten und Hohlräumen zustande¹⁷.

Lärmentstehung am Flugwerk

Das Flugwerk erzeugt besonders in bestimmten Phasen des Landeanflugs aerodynamischen Lärm. Dieser entsteht vor allem bei der Umströmung der Hochauftriebshilfen, also der Vorderflügel und der Klappen, die ausgefahren werden können, um die Lenkung bei niedrigen Geschwindigkeiten zu erleichtern und den Treibstoffverbrauch des Flugzeugs zu reduzieren. Auch während des Starts entsteht an den Hochauftriebshilfen Lärm, in dieser Phase überwiegt allerdings der Triebwerkslärm¹⁶. An Kanten, Schlitzten, Hohlräumen und Löchern am Flügel selber entsteht ein weiterer Teil des Lärms¹⁸.

Interaktionslärm

Während der Landung sind meist sowohl die Hochauftriebshilfen als auch das Fahrwerk ausgefahren. Durch das Auftreffen der am Fahrwerk entstandenen Verwirbelungen auf die Klappen und allgemein die Flügel und durch das Vermischen der Wirbel entsteht zusätzlicher Lärm, der als Interaktionslärm bezeichnet wird¹⁹.

2.4 Entstehung des Überschallknalls

Bei sehr hohen Fluggeschwindigkeiten kommt es zu einem besonderen akustischen Phänomen, dem Überschallknall. Wir betrachten eine sich mit der Geschwindigkeit v bewegende Schallquelle P .

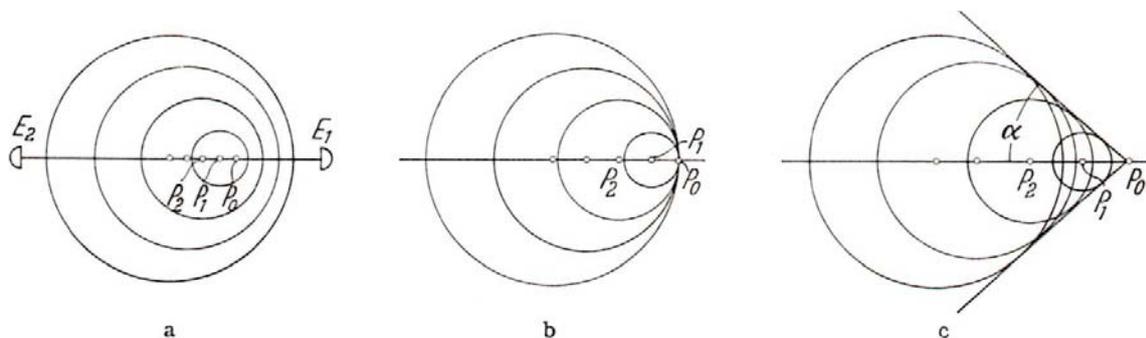


Abbildung 8 Doppler-Effekt und Machscher Kegel. Schematische Darstellung der Schallwellen bei von links nach rechts zunehmender Fluggeschwindigkeit; [8], S. 115

Zunächst ist die Geschwindigkeit v kleiner als die Schallgeschwindigkeit c (Abbildung 8 a). Bewegt sich das Objekt auf einen zu (in der Abbildung in Richtung des Empfängers E_1), so werden die Wellenlängen verkürzt, das heißt der Ton hört sich höher an; wenn sich das Objekt dagegen von einem weg bewegt (in der Abbildung in Richtung des Empfängers E_2), so werden die Ab-

¹⁷ [6], S. 5-2

¹⁸ [6], S. 5-3 f

¹⁹ [7], S. 17

stände der Wellenberge länger, das heißt der Ton hört sich tiefer an. Dieses Phänomen ist als Dopplereffekt bekannt.

Sobald die Geschwindigkeit gleich der Schallgeschwindigkeit ist (Abbildung b: $v = c$), bewegt sich die Schallquelle P mit der gleichen Geschwindigkeit wie die von ihr ausgesandten Töne. Dabei treffen die vorher ausgesandten Wellenberge in dem Punkt P zusammen und diese Schallmauer läuft mit P mit.

Wenn die Geschwindigkeit die Schallgeschwindigkeit überschreitet (Abbildung c: $v > c$), überschneiden sich die Wellenberge. Es entsteht ein Kegel, der auf dem Kegelmantel als Überschallknall zu hören ist. Der Öffnungswinkel dieses „Machschen Kegels“ ist von der Geschwindigkeit abhängig.²⁰

2.5 Ausbreitung des Schalls

Bei der Ausbreitung von Schalldruckpegeln spielen die lokalen geographischen und besonders die meteorologischen Gegebenheiten eine Rolle.

Zunächst gehen wir von einer Kugelwelle um eine punktförmige Schallquelle aus. Die Intensität auf der Kugel nimmt aufgrund der räumlichen Verteilung mit $1/r^2$ ab.

Generell geht bei der Ausbreitung in einem Medium ein Teil der Schallenergie in Wärme über. Die resultierende Schalldämpfung hängt von der Temperatur und der Luftfeuchte ab. Höhere Frequenzen erfahren jedoch eine wesentlich stärkere Dämpfung als tiefe (Abbildung 9). Zu beachten sind allerdings die unterschiedlichen Skalen der y-Achse in Abb. a und b.

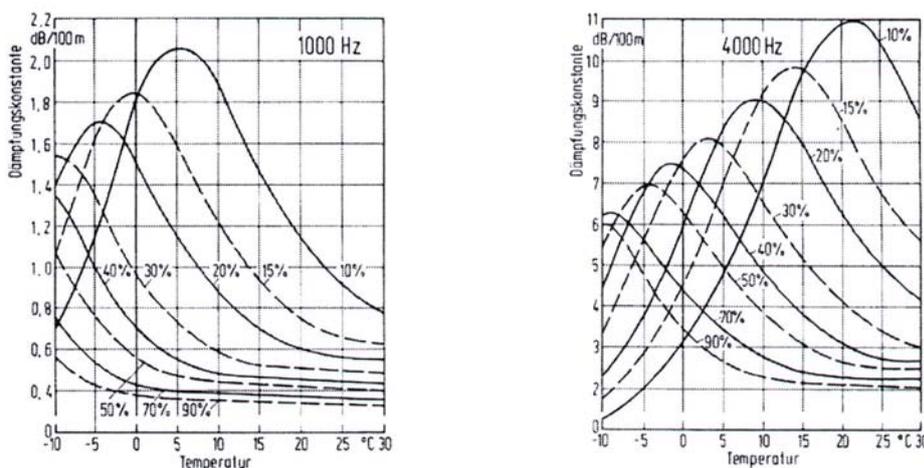


Abbildung 9 Schallabsorption (Verringerung des Schallpegels auf 100 m) bei verschiedenen Luftfeuchtigkeiten (Angaben in %), Frequenz links 1000 Hz, rechts 4000 Hz; [1], S. 187

²⁰ [8], S. 115

In Abbildung 9 ist zudem erkennbar, dass die Dämpfung mit steigender Luftfeuchte abnimmt und bei unterschiedlichen Temperaturen die Frequenzen (bspw. 1000 Hz in Abbildung 9 a und 4000 Hz in Abbildung 9 b) unterschiedlich stark gedämpft werden. So werden beispielsweise bei niedrigen (relativ zu hohen) Temperaturen und feuchter Luft tiefe Frequenzen stark gedämpft.²¹

Ebenfalls frequenzabhängig ist der sogenannte Bodeneffekt durch eine Reflektion vom Boden. Die Reflektion durch den Boden ist stark von der Beschaffenheit der Oberfläche abhängig. Neben Absorptionseffekten kommt es aufgrund der Welleneigenschaft von Schall auch zu Interferenzerscheinungen, die zu Pegelerhöhungen oder -minderungen führen. Der Bodeneffekt führt im Beispiel von Schnee (Abbildung 10 links) besonders bei größeren Entfernungen (> 200 m) zu deutlich größeren Pegelminderungen als z.B. bei Rasen (rechts). Aufgetragen sind hier die Frequenz (x-Achse) und die jeweilige Pegelerhöhung (positive Werte auf y-Achse) bzw. Pegelminderung (negative Werte auf y-Achse) in Dezibel.²² Die Schwankungen am rechten Bildrand weisen auf Interferenzen hin.

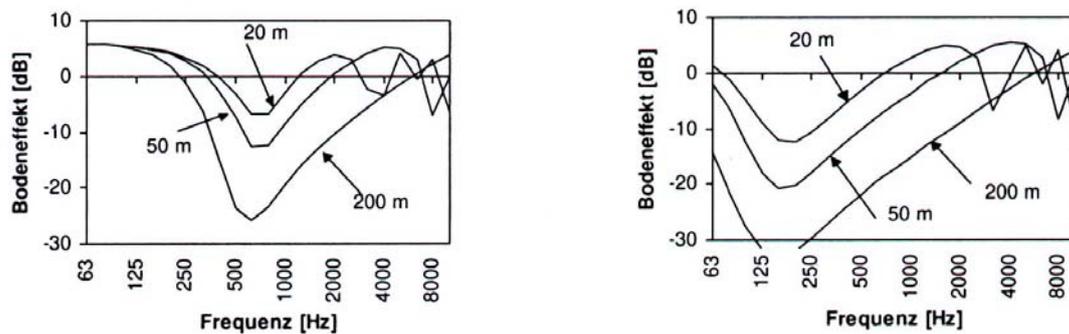


Abbildung 10 Gerechnete Pegelreduktion durch den Bodeneffekt für Rasen (links), Schnee (rechts) für Schallquelle und -empfänger, die sich bei den verschiedenen angegebenen Abständen 1 m über dem Boden befinden; [1], S. 187

Außerdem ergibt sich eine temperaturabhängige Ausbreitung dadurch, dass die Schallgeschwindigkeit proportional der Wurzel der Temperatur ist²³. Dadurch kommt eine wetterabhängige Krümmung der Schallwege zum Boden hin bzw. vom Boden weg zustande. Bei sonnigem Wetter heizt sich der Boden auf, der Schall wird vom Boden weggelenkt. Bei kalten Bodentemperaturen, also beispielsweise in der Nacht, ist der Boden kälter als die oberen Luftschichten, der Schall

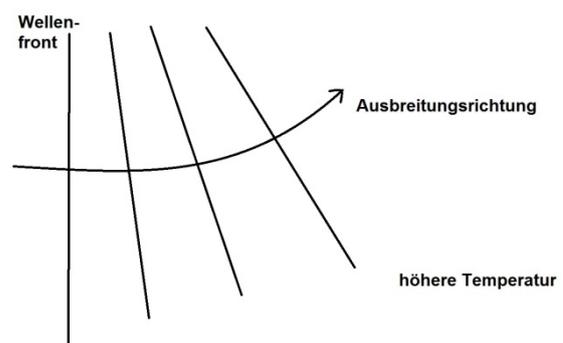


Abbildung 11 Schematische Darstellung der Wellenfronten bei sonnigem Wetter

²¹ [1], S. 186-187

²² [1], S. 30-31, S. 186-187

²³ [1], S. 18

wird zum Boden hin gelenkt und dort als lauter empfunden²⁴.

Neben der Temperatur und der Luftfeuchte hat auch der Wind einen starken Einfluss auf die Schallausbreitung. Die Windrichtung ist unter anderem deswegen von Bedeutung, weil die Betriebsrichtung des Flughafens dem Wind angepasst wird, so dass die Flugzeuge in den allermeisten Fällen gegen den Wind starten und landen. Auch steigen die Flugzeuge bei stärkerem Gegenwind steiler auf.²⁵ Als Folge ergeben sich deutlich unterschiedliche Lärmkonturen für die verschiedenen Windrichtungen (Abbildung 12).

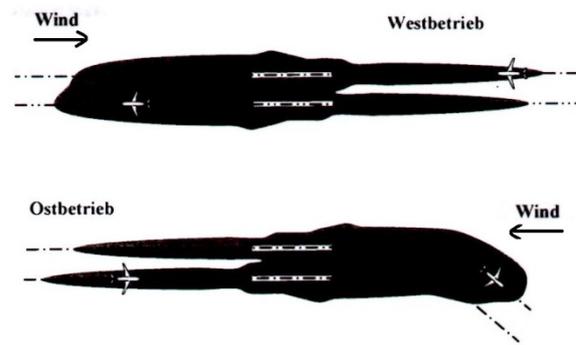


Abbildung 12 Einfluss des Windes auf die Betriebsrichtung, Konturen oberhalb gleichen Lärmpegels für Lande- und Startvorgang bei unterschiedlichen Windrichtungen; [9], S. 40

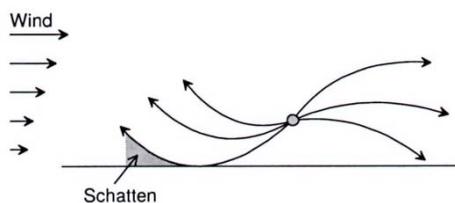


Abbildung 13 Krümmung der Schallwege durch einen Windgradienten; [1], S. 191

Zusätzlich ist die Richtung, in der sich der Schall ausbreitet, von dem Gradienten der Windgeschwindigkeit abhängig (Abbildung 13). In der Regel nimmt die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zu. Dann werden die Schallwege in Windrichtung zum Boden hin, in der Gegenrichtung vom Boden weg abgelenkt.

Turbulenzen an Hindernissen (wie z.B. Gebäuden) oder besonderen topographischen Gegebenheiten (wie z.B. Bergen) sowie an Luftblasen unterschiedlicher Temperatur führen zu einer weniger homogenen Verteilung des Schalldrucks. Zuweilen wird der Schall auch in Bereiche gelenkt, die eigentliche akustischen Schattenraum darstellen²⁶. Auch die Vegetation hat einen Effekt auf die Schallausbreitung (siehe Kapitel 3.4).

In Städten kommen häufig Reflektionseffekte an Gebäuden hinzu, absorbiert wird hier nur ein sehr kleiner Teil des Schalls. Ähnlich dem Bodeneffekt führt die Reflektion aufgrund der Interferenzerscheinungen zu Pegelminderungen- bzw. Pegelerhöhungen, allerdings treten an Gebäuden auch teilweise diffuse Reflektionen, also Streuungen, auf²⁷.

²⁴ [1], S. 190

²⁵ [9], S. 40

²⁶ [1], S. 190-191

²⁷ [1], S. 196-197

3 Technische Maßnahmen zur Verringerung der Lärmbelästigung

Maßnahmen zur Lärminderung kann man am Flugzeug selber, durch Optimierung der Flugverfahren oder in der Umgebung des Flughafens vornehmen.

3.1 Minderung des Triebwerkslärms am Flugzeug

Sehr sinnvoll ist es offensichtlich, den Lärm direkt an der Quelle zu mindern. Dazu ist eine genaue Erforschung der Lärmquellen nötig. Der Optimierungsprozess ist allerdings aufwendig, da außer dem Lärm viele weitere Faktoren wie Gewicht, Aufwand, Treibstoffverbrauch, berücksichtigt werden müssen. Die optimierten Triebwerke lassen sich erst bei zukünftigen Flugzeugtypen umsetzen und erst nach mehreren Jahrzehnten ist der Großteil der Flugzeuge mit den Neuerungen ausgestattet²⁸.

Erhöhung des Bypassverhältnisses

Moderne Flugzeuge werden mit Triebwerken mit immer höheren Bypassverhältnissen ausgestattet (siehe Kapitel 2.3.1). Diese erhöhen nicht nur die Effizienz, sondern tragen auch zur Lärminderung bei, sie machen einen großen Teil des Lärminderungspotenzials aus. Allerdings ist bei diesen Triebwerken der Anteil des Fanlärms am Gesamtlärm größer, sodass die Forschung vor allem versucht, einen leiseren Fan zu entwickeln (siehe unten).

Bei einer Erhöhung des Bypassverhältnisses muss der Fandurchmesser und damit das gesamte Triebwerk wesentlich vergrößert werden, sodass die Triebwerke ein höheres Gewicht haben. Der Entwurf neuer Flugzeuge muss das Gewicht und die Größe zukünftiger Triebwerke berücksichtigen.²⁹

Neigung der Statoren

Ein großer Teil des Fanlärms entsteht bei der Wechselwirkung Rotor - Stator. Abbildung 14 zeigt das Strömungsbild an dieser Stelle des Triebwerks. In weiß sind links die Rotoren und rechts die Statoren zu erkennen. Rechts im Bild sind Verwirbelungen angedeutet, die Lärm verursachen.

Um diese Geräusche zu vermindern, wurde ein Triebwerk mit geneigtem statt geradem Stator entworfen. Es zeigt sich, dass eine Neigung des Stators in Strömungsrichtung eine Lärminderung von bis zu 3 dB ermöglicht³⁰. Durch den geneigten

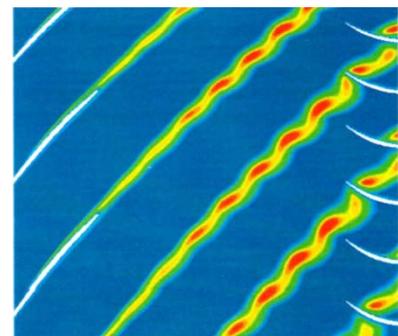


Abbildung 14 Strömungsbild zwischen Rotor und Stator; [6], S. 4-5

²⁸ [10], S. 9

²⁹ [5], S. 978

³⁰ [6], 4-7 f

tor entstehen erheblich weniger Wirbel beim Auftreffen auf die Statorschaufeln. Dadurch wird der Lärm gemindert.

Entwicklung einer langsam drehenden Fanstufe

Je schneller die Luft auf die Schaufelblätter trifft, desto mehr Lärm entsteht. Das gilt insbesondere dann, wenn die Geschwindigkeit die Schallgeschwindigkeit überschreitet. Das ist in den Triebwerken durchaus häufig der Fall, auch wenn sich das Flugzeug mit einer deutlich niedrigeren Geschwindigkeit bewegt.³¹ Um den Lärm zu mindern, werden die Geschwindigkeiten innerhalb der Triebwerke gesenkt. Dabei kommt es entscheidend auf die Entwicklung einer langsam drehenden Fanstufe an, da ein großer Teil der Luft ausschließlich durch den Fan beschleunigt wird. Da sich die anderen Bauteile mit deutlich höherer Geschwindigkeit bewegen, müssen ein oder mehrere Getriebe zwischengeschaltet werden. Solche Triebwerke wurden bereits von mehreren namhaften Triebwerksherstellern vorgestellt³² und Flugzeuge der nächsten Generation(-en) sollen mit ihnen ausgestattet werden.

Chevron-Düsen

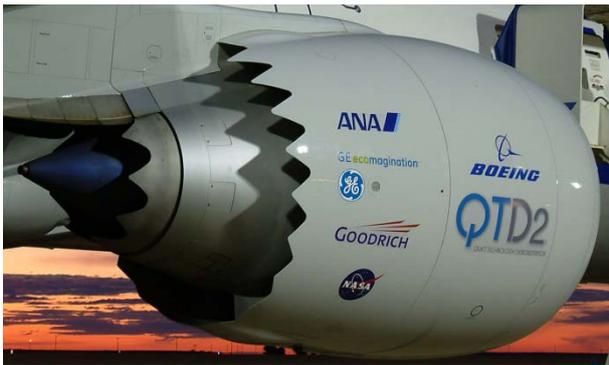


Abbildung 15 Chevron-Düse (die Luft strömt von rechts nach links); [12]

Der Einsatz von gezackten Düsen (Chevron-Düsen) ist eine besonders praktische Maßnahme, da sich die Düsenaufsätze einfach nachrüsten lassen. So sind die Düsen bereits am Airbus 319 und an der Boeing 787 im Einsatz³³. In der Abbildung ist erkennbar, dass sowohl Haupt- als auch Nebenstromdüse modifiziert werden (Abbildung 15). Durch die Zacken entstehen bei der Vermischung des Freistrahls mit der umgebenden Luft weniger Wirbel und damit bis zu 3 dB weniger Lärm³⁴. Bei diesem bionischen Ansatz diente als Vorbild die Eule, deren besonders leiser Flug dadurch gewährleistet wird, dass die einzelnen Schwanzfedern einen gezackten Rand darstellen.

Entwicklung neuer Flugzeugentwürfe, „design to noise“

Bei Flugzeugen werden die Triebwerke üblicherweise unterhalb der Tragflächen montiert. Ein „design to noise“ – Flugzeugentwurf der DLR, also ein Entwurf, der ganz auf die Lärminderung ausgerichtet ist, sieht die Umplatzierung der Triebwerke auf die Oberseite der Tragflächen

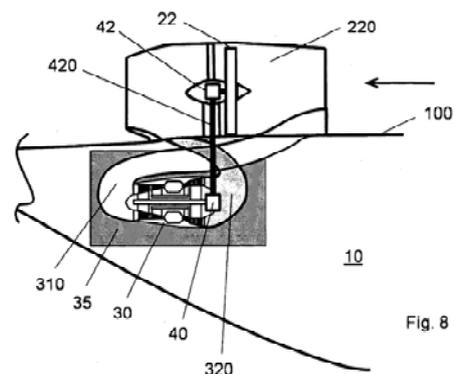


Abbildung 16 Patent der Bauhaus Luftfahrt, bei dem der untere Teil des Triebwerks im Flügel untergebracht ist; [13]

³¹ [7], S. 16 f

³² [11]

³³ [12]

³⁴ [6], 4-2

vor³⁵. An den Tragflächen wird der Schall weitgehend reflektiert, sodass die Tragflächen bei diesem Flugzeugentwurf eine Abschattungswirkung, vor allem des Strahlärms, erzielen. Auch bei anderen futuristischen Flugzeugentwürfen wird die Lärminderung als ein Hauptkriterium berücksichtigt. Beispielsweise hat die Bauhaus Luftfahrt einen Flugzeugentwurf patentieren lassen, bei dem das Triebwerk sich zu Teilen innerhalb des Flügels befindet, wodurch der Lärm gedämpft wird (siehe Abbildung 16).

Einsatz von Gegenschall

Sehr aufwendig ist der Einsatz von Gegenschall im Triebwerk. Dabei wird das Schallfeld mit Mikrofonen vermessen. Den Schallwellen werden Schallwellen mit genau entgegengesetzt gerichteter Amplitude überlagert, sodass sie sich gegenseitig auslöschen. Da das Schallfeld sehr komplex ist, muss das Triebwerk mit vielen Mikrofonen ausgestattet werden. Aus den Daten dieser müssen dann in Echtzeit Signale errechnet werden. Während der Gegenschall in früheren Forschungsarbeiten meist durch Lautsprecher erzeugt wurde³⁶, werden heute auch Druckluftdüsen zur Erzeugung von Gegenschall eingesetzt. Diese Methode ist praktikabler, da die Anlage wesentlich leichter ist und weniger Platz verbraucht. Gegenschall wird derzeit in der Praxis noch nicht eingesetzt, da es noch Wissenslücken gibt und der Aufwand sehr groß ist.³⁷

3.2 Minderung des aerodynamischen Lärms am Flugzeug

Tragflächen

Der Lärm, der an der Hinterkante der Flügel entsteht, kann durch einen bürsten- oder kammartigen Aufsatz um bis zu 10 dB gemindert werden.

Wenn die verwendeten Fasern der Bürste eine ausreichende Länge und einen minimalen Faserabstand haben, wird durch die Bürste vermieden, dass sich an der Abströmkante periodisch Wirbel ablösen, die Lärm erzeugen. Ein ähnliches, vom Eulenflug her bekanntes Konzept wurde bereits auf die Triebwerksdüsen angewendet

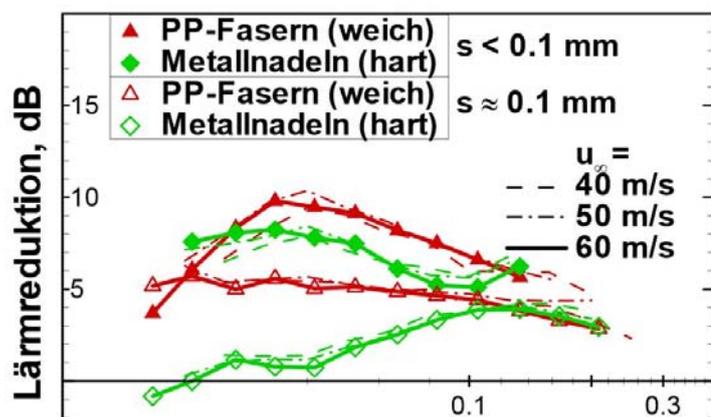


Abbildung 17 Im Windkanal mit Mikrofon gemessene Lärmreduktion durch bürstenartige Endkanten mit Faser- oder Nadelabstand s bei verschiedenen Abständen von der Hinterkante (logarithmischer Metermaßstab) für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten u ; [7], S. 34

³⁵ [7], S. 34 ff

³⁶ [5], S. 978

³⁷ [7], S. 26-28

(siehe Kapitel 3.1).

Kommen statt starren Kämmen, Nadeln und geschlitzten Hinterkanten flexible Fasern zum Einsatz, so lässt sich der Lärm weiter vermindern³⁸. In Abbildung 17 ist die jeweilige Lärmreduktion für verschiedene Triebwerkendkanten dargestellt: Es wurden Fasern verschiedener Materialien und Faserabstände verwendet; die größte Lärmreduktion wurde mit Hilfe von weichen Fasern und sehr kleinen Faserabständen erreicht.

Fahrwerke

Während des Landeanflugs entsteht ein großer Teil des Lärms bei der Umströmung der Fahrwerke. Es gibt zwei Maßnahmen, die zur Minderung des Fahrwerkklärrs beitragen: erstens eine Verkleidung des Fahrwerks und zweitens ein möglichst spätes (Anflug) beziehungsweise möglichst frühes (Abflug) Einfahren der Fahrwerke.



Im Gegensatz zu einer Vollverkleidung ist eine Teilverkleidung des Fahrwerks (Abbildung 18) ökonomisch realisierbar, sie mindert den Lärm um bis zu 5 dB.³⁹

Abbildung 18 Teilverkleidung Fahrwerk (schwarzer Kunststoff); [6], S. 5-3

3.3 Lärmindernde Flugverfahren

Die Optimierung von Flugverfahren hat den Vorteil, dass sich diese häufig leicht und sofort umsetzen lassen. Bei der Umsetzung muss neben Sicherheitsaspekten und gesetzlichen Vorgaben auch die jeweilige Bevölkerungsstruktur im Umfeld des Flughafens beachtet werden.

3.3.1 Auswirkungen von verschieden steilen Steigkurven beim Abflugverfahren

Bei der Optimierung von Abflugverfahren wird meist nur eine geringe Lärminderung, im Wesentlichen aber eine Lärmumverteilung erreicht. Beim Abflug wird üblicherweise bis zu einem bestimmten Punkt, dem sogenannten Cutback, mit gleichbleibender Geschwindigkeit geflogen, dann wird die Schubkraft (kurz: der Schub) verringert. Nach dem Cutback wird der reduzierte Schub in Beschleunigung oder in Steigleistung umgesetzt⁴⁰.

Eine weniger steile Kurve kann man erzielen, indem der Cutback bei einer niedrigeren Flughöhe erfolgt oder dadurch, dass der Schub nach dem Cutback vorrangig in Beschleunigung statt in Steigleistung umgesetzt wird⁴⁰. Für eine geringere Cutback-Höhe wird weniger Triebwerksleistung benötigt, was den Lärm verringert, allerdings ist die Entfernung zum Boden geringer. Mes-

³⁸ [7], S. 32-34

³⁹ [5], S. 947-948

⁴⁰ [14], S. 8

sungen ergeben, dass im Bereich direkt unter der Flugbahn eine geringere Cutback-Höhe zu größeren Lautstärken, seitlich der Flugbahn jedoch zu Pegelsenkungen führt (Abbildung 19).

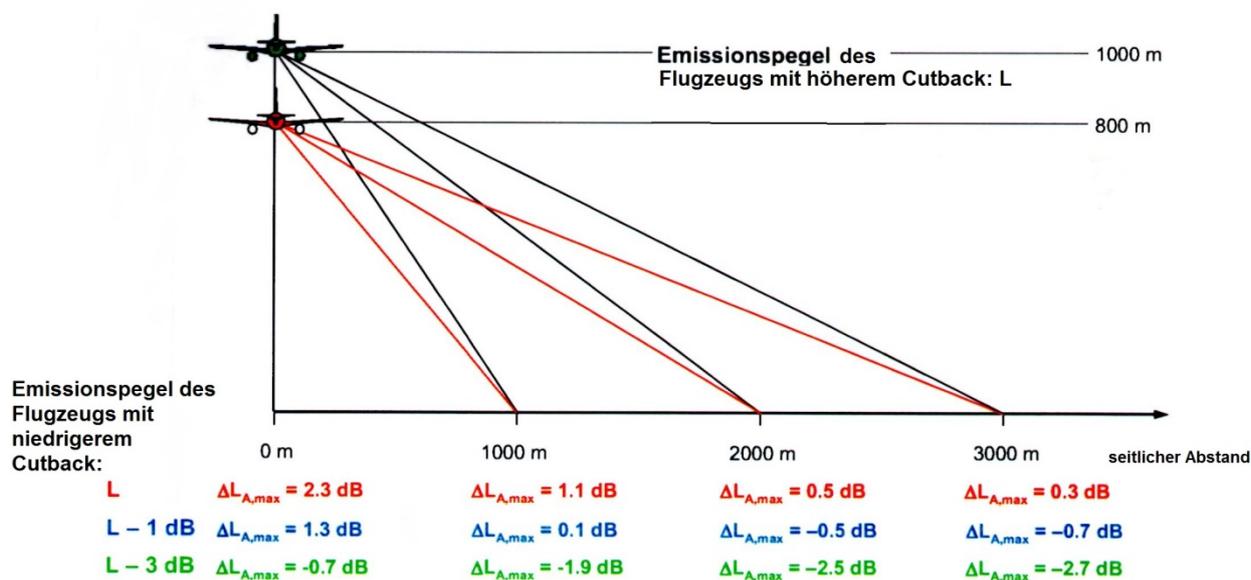


Abbildung 19 Errechnetes seitliches Abfallverhalten von Maximalpegeln nach [14], S. 21

Die in der Tabelle angegebenen Werte $\Delta L_{A,max}$ stellen jeweils die Differenz der Lautstärken des Flugzeugs mit dem niedrigeren Cutback und des Flugzeugs mit höherem Cutback, ermittelt für Punkte am Boden (0 m, 1000 m, 2000 m, 3000 m seitlicher Abstand) dar. In der Tabelle wird einmal von gleichen Triebwerksleistungen, also gleichen Emissionspegeln (rot), einmal von einem um 1 dB (blau) bzw. 3 dB (grün) niedrigeren Emissionspegel bei niedrigerem Cutback ausgegangen. Positive Differenzwerte bedeuten, dass die Immissionswerte des höherfliegenden Flugzeugs geringer sind als die des niedriger fliegenden und umgekehrt. Bei gleichen Emissionswerten führt in allen aufgetragenen Bereichen (rote Werte) die größere Cutback-Höhe zu niedrigeren Pegeln am Boden, während bei um 3 dB niedrigeren Emissionswerten in allen Bereichen die geringere Cutback-Höhe zu niedrigeren Pegeln am Boden führt.

Eine realistische Herabsetzung der Emissionswerte liegt bei ca. 1 dB. Hier erzielt ab einem seitlichen Abstand von ca. 1000 m die niedrigere Cutback-Höhe leisere Pegel am Boden (wie an den negativen Werten (blau) in der Tabelle zu erkennen). Direkt unter der Flugbahn ist die Weglänge vom niedrigerem Flugzeug zum Immissionsort deutlich geringer, sodass die Pegel dort höher sind, obwohl durch die geringere Cutback-Höhe weniger Triebwerksleistung benötigt wird. Mit zunehmendem seitlichen Abstand nähern sich die Weglängen vom hohen und vom niedrigen Flugzeug zum Immissionsort an (vgl. Abbildung 19).

Es ist somit meist sinnvoller, eine niedrigere Cutback-Höhe zu wählen.⁴¹

⁴¹ [14], S. 15-22

Durch die Umsetzung des anfangs benötigten Schubs in Beschleunigung statt in Steigleistung, können die Klappen an den Flügeln früher eingefahren werden: das Flugzeug fliegt schneller und die Dauer des Lärms verkürzt sich. Allerdings wird in niedrigerer Höhe geflogen. Auch hier zeigt sich, dass die steilere Abflugkurve direkt unterhalb der Flugbahn leisere Pegel verursacht, das weniger steile, aber dafür schnellere Verfahren führt hingegen zu Pegelminderungen in den seitlichen Bereichen.⁴² Bei der Festlegung der Abflugverfahren sind weitere Parameter wie die Besiedlungsstruktur oder auch das aktuelle Wetter zu berücksichtigen.

3.3.2 Anflugverfahren

Im Gegensatz zu den Abflugverfahren ist bei den Anflugverfahren neben einer Umverteilung, auch eine wesentliche Lärminderung möglich.

In der Abbildung 20 werden verschiedene Anflugverfahren dargestellt. Das am häufigsten geflogene Verfahren ist das Low-

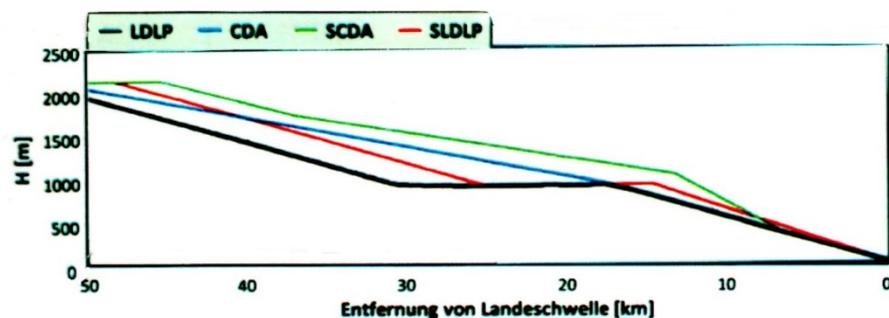


Abbildung 20 Verschiedene Anflugverfahren nach [15], S. 17

Drag-Low-Power – Verfahren (LDLP, schwarz)⁴³.

Im Gegensatz zum Continuous Descent Approach - Verfahren (CDA, blau), das an einigen Flughäfen vor allem nachts geflogen wird und bei dem das Flugzeug fast gleichmäßig an Flughöhe verliert, verläuft dieses Verfahren in mehreren Phasen, in denen unterschiedlich steil geflogen wird. Beim CDA-Verfahren verliert das Flugzeug vor allem anfangs langsamer an Höhe, sodass der Abstand zur Besiedlung größer und damit die Lautstärke am Boden in dieser Anflugsphase geringer ist. Zusätzlich dargestellt sind ein optimiertes LDLP-Verfahren (SLDLP, rot), bei dem der Endanflug wesentlich steiler verläuft, sowie ein optimiertes CDA-Verfahren (SCDA, grün).

Anders als beim Abflug ist beim Anflug eine spätere Verminderung der Flughöhe nicht unbedingt mit höheren Triebwerksleistungen verbunden. Neben einem größeren Abstand zum Boden und einer geringeren Triebwerksleistung führt auch ein möglichst spätes Einnehmen der Landekonfiguration (Ausfahren der Fahrwerke, Einsatz der Hochauftriebshilfen) zu einer Lärminderung. Bei Anflügen mit einer hohen Geschwindigkeit dauert der Lärm zwar kürzer an, allerdings muss bei diesen vor dem Landen die Geschwindigkeit durch Ausfahren der Klappen und Vorderflügel deutlich verringert werden, was wiederum Lärm verursacht.

⁴² [14], S. 9-14

⁴³ [15], S. 16

3.4 Passiver Schallschutz

Unter passivem Schallschutz versteht man Schallminderungsmaßnahmen am Boden oder in der direkten Umgebung der Immissionsorte. Dazu gehören unter anderem bauliche Maßnahmen wie Schallschutzfenster und Dämmungen als auch Schallschutzmauern am Flughafen und die auf Lärminderung optimierte Raum- und Städteplanung, beispielsweise schalldämmende Vegetation⁴⁵.

Bewuchs dämpft Schall allerdings wesentlich schwächer als meist angenommen. Erst ab einem vom Schall zurückgelegten Weg von ungefähr 10 m Vegetation macht sich eine Pegelminderung bemerkbar⁴⁶. Zu einer bemerkbaren Minderung von Fluglärm sind Pflanzungen vor allem in der direkten Umgebung des Flughafens sinnvoll, da Fluglärm ansonsten von oben kommt.

Aus dem gleichen Grund werden Schallschutzwände ausschließlich direkt am Flughafen errichtet. Den Anteil des Schallpegels von Schallquellen auch in geringer Höhe können sie kaum, den Anteil von Schallquellen auf dem Boden durch Beugungseffekte auch nur um 5 bis höchstens 20 dB mindern⁴⁷. Zur Minderung von Fluglärm sind sie wesentlich weniger geeignet als beispielsweise zur Minderung von Straßenverkehrslärm.

4 Rechtliche Grundlagen in Deutschland

Eine wichtige Maßnahme, durch die der Staat auf die Forschung zur Lärminderung Einfluss nehmen kann, sind Gesetze. Die Herstellung gleichwertiger Lebensverhältnisse im Bundesgebiet beziehungsweise in allen Teilräumen des Bundesgebiets ist bereits in Art. 72, Abs. 2 des Grundgesetzes und im Bundesraumordnungsgesetz § 2 als Ziel festgelegt.

Dementsprechend gibt es seit 1971 das Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm, dessen Zweck es ist, „in der Umgebung von Flugplätzen bauliche Nutzungsbeschränkungen und baulichen Schallschutz zum Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor Gefahren, erheblichen Nachteilen und erheblichen Belästigungen durch Fluglärm sicherzustellen.“⁴⁸.

Das Gesetz definiert in der Umgebung von Verkehrsflughäfen und Landeplätzen, sowie an militärischen Flugplätzen⁴⁹ Grenzwerte für drei verschiedene Lärmschutzbereiche: zwei Schutzzonen für den Tag und eine Schutzzone für die Nacht.

In der Umgebung von bereits bestehenden Verkehrsflugplätzen werden jeweils in den Bereichen, in denen die folgenden Grenzwerte überschritten werden, Schutzzonen errichtet:

⁴⁵ [5], S. 970 f

⁴⁶ [1], S. 187, S. 193-194

⁴⁷ [1], S. 188-189, S. 194

⁴⁸ [13], § 1

⁴⁹ [16], § 4

Tag-Schutzzone 1:

$$L_{Aeq\ Tag} = 65\text{ dB(A)},$$

Tag-Schutzzone 2:

$$L_{Aeq\ Tag} = 60\text{ dB(A)},$$

Nacht-Schutzzone:

$$L_{Aeq\ Nacht} = 55\text{ dB(A)},$$

$$L_{Amax} = 6\text{ mal }57\text{ dB(A)}^{50}.$$

Die Pegel beziehen sich jeweils auf die durch Fluglärm hervorgerufenen äquivalenten Dauerschallpegel (L_{Aeq}), also die durchschnittlichen Lautstärken am Tag beziehungsweise in der Nacht. Eine Nachtschutzzone wird eingerichtet, wenn zusätzlich zu dem für die Nacht niedriger angesetztem äquivalenten Dauerschallpegel 6-mal der Maximalschallpegel (L_{Amax}) überschritten wird⁵¹.

Bei neu errichteten beziehungsweise baulich wesentlich erweiterten Verkehrsflugplätzen oder militärischen Flugplätzen gelten niedrigere, bei bereits bestehenden militärischen Flugplätzen gelten höhere Grenzwerte.

In allen Schutzzonen dürfen keine schutzbedürftigen Einrichtungen wie Krankenhäuser, Altenheime und Erholungsheime errichtet werden. In der Tag-Schutzzone 1 und in der Nacht-Schutzzone dürfen in der Regel auch keine Wohnungen, in den beiden Tag-Schutzzonen keine Kindergärten, Schulen und ähnliche schutzbedürftige Einrichtungen errichtet werden⁵².

Eigentümern von Wohnungen in der Schutzzone Tag 1 und in der Nacht-Schutzzone werden bauliche Schallschutzmaßnahmen wie Schallschutzfenster oder Dämmmittel erstattet; Eigentümer von Grundstücken in der Tag-Schutzzone 1 haben zusätzlich einen Anspruch auf eine angemessene Entschädigung für Beeinträchtigungen des Außenwohnbereichs in Geld⁵³. Zahlungspflichtig ist der Flugplatzhalter beziehungsweise die Bundesrepublik Deutschland⁵⁴.

Durch die Luftverkehrsordnung (LuftVO) werden die Zulassungsbedingungen für zivile Flugzeuge geregelt. Unter anderem ist beim Betrieb eines Flugzeugs ein Lärmzeugnis mitzuführen. Je nach Masse dürfen durch die Flugzeuge Grenzwerte von 102-108 dB (seitlich und beim Anflug) und 93-108 dB (beim Überflug nach dem Abflug) nicht überschritten werden⁵⁵.

Die Flugverfahren, also sowohl die Flugrouten als auch An- und Abflugverfahren, werden durch das Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung für jeden Flughafen gesondert festgelegt⁵⁶.

⁵⁰ [16], §2, (2)

⁵¹ [16], § 2

⁵² [16], § 5

⁵³ [16], § 9

⁵⁴ [16], § 12

⁵⁵ [17], § 11c

⁵⁶ [17], § 33

5 Zusammenfassung

Obgleich die physikalischen Grundlagen des Schalls sehr gut verstanden sind, ist die Erforschung des Flugzeuglärms noch ein aktuelles ingenieurwissenschaftliches Thema. Eine genaue Untersuchung der Lärmquellen ist notwendig, um den Lärm optimal zu verringern.

Der Lärm entsteht während des Fluges vor allem an Fahrwerk, Flugwerk und Triebwerk, wobei der Triebwerkslärm besonders in der Phase des Abflugs dominiert. Verursacht wird der Lärm durch periodische oder chaotische Luftwirbel.

Besonders sinnvoll ist die Lärminderung an der Quelle. Das größte Potenzial ergibt sich hierbei durch eine Erhöhung des Bypassverhältnisses, also des Verhältnisses von Kalt- zu Warmluftstrom, was zusätzlich zu einer besseren Effizienz, also zu einer Verringerung des Treibstoffverbrauchs des Flugzeuges beiträgt.

Mittels Experimenten im Windkanal lassen sich Flügel und Kanten bezüglich ihrer Emissionen optimieren. Bei Lärmreduktion der Flugverfahren müssen vorrangig Sicherheitsaspekte und die lokalen Gegebenheiten wie die Siedlungsstruktur beachtet werden, weil durch die Optimierung vor allem eine Umverteilung des Lärms erfolgt. Außerdem ist die Ausbreitung des Schalls stark von den meteorologischen Gegebenheiten wie der Temperatur oder der Windrichtung abhängig. Generell lässt sich sagen, dass es nicht *die* eine Maßnahme zur Verringerung des Lärms gibt, sondern viele kleine Optimierungen den Fortschritt bringen. Weitere Forschung und die verstärkte Umsetzung der Maßnahmen sind notwendig, wenn sich der Flugverkehr im Rahmen der Vorgaben des Gesetzgebers weiterentwickeln soll.

Anhang

A Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Sinusschwingung; [2], S. 89	5
Abbildung 2 Intensität und empfundene Lautstärke als Funktion der Frequenz nach [2], S. 94.....	6
Abbildung 3 Bewertungsfiter; [1], S. 71	7
Abbildung 4 Frequenzspektren: Lautstärke in Abhängigkeit der Frequenz, Gegenüberstellung Klang – Geräusch; [1], S. 34.....	8
Abbildung 5 Fahrwerk, Flugwerk, Triebwerk am Airbus A380 nach http://www.aerospaceweb.org/aircraft/jetliner/a380/a380_16.jpg	9
Abbildung 6 Schallquellen eines Zweistromturboluftstrahltriebwerks, der Luftstrom fließt von links nach rechts; http://elib.dlr.de/70339/1/Laermminderung_Flugzeuge.pdf	9
Abbildung 7 Vergleich niedriges vs. hohes Bypass-Verhältnis, schematische Darstellung des Schallpegels und der Abstrahlrichtung; [5], S. 951.....	10
Abbildung 8 Doppler-Effekt und Machscher Kegel. Schematische Darstellung der Schallwellen bei von links nach rechts zunehmender Fluggeschwindigkeit; [8], S. 115	11
Abbildung 9 Schallabsorption (Verringerung des Schallpegels auf 100 m) bei verschiedenen Luftfeuchtigkeiten (Angaben in %), Frequenz links 1000 Hz, rechts 4000 Hz; [1], S. 187	12
Abbildung 10 Gerechnete Pegelreduktion durch den Bodeneffekt für Rasen (links), Schnee (rechts) für Schallquelle und –empfänger, die sich bei den verschiedenen angegebenen Abständen 1 m über dem Boden befinden; [1], S. 187	13
Abbildung 11 Schematische Darstellung der Wellenfronten bei sonnigem Wetter	13
Abbildung 12 Einfluss des Windes auf die Betriebsrichtung, Konturen oberhalb gleichen Lärmpegels für Lande- und Startvorgang bei unterschiedlichen Windrichtungen; [9], S. 40	14
Abbildung 13 Krümmung der Schallwege durch einen Windgradienten; [1], S. 191.....	14
Abbildung 14 Strömungsbild zwischen Rotor und Stator; [6], S. 4-5.....	15
Abbildung 15 Chevron-Düse (die Luft strömt von rechts nach links); [12]	16
Abbildung 16 Patent der Bauhaus Luftfahrt, bei dem der untere Teil des Triebwerks im Flügel untergebracht ist; [13].....	16
Abbildung 17 Im Windkanal mit Mikrofon gemessene Lärmreduktion durch bürstenartige Endkanten mit Faser- oder Nadelabstand s bei verschiedenen Abständen von der Hinterkante (logarithmischer Metermaßstab) für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten u ; [7], S. 34...	17
Abbildung 18 Teilverkleidung Fahrwerk (schwarzer Kunststoff); [6], S. 5-3	18
Abbildung 19 Errechnetes seitliches Abfallverhalten von Maximalpegeln nach [14], S. 21.....	19
Abbildung 20 Verschiedene Anflugverfahren nach [15], S. 17	20
Abbildung 21 Vergleich Optimiertes CDA- (SCDA-) vs. Standard-LDLP-Verfahren mittels einer Computersimulation, schwarze Konturlinien kennzeichnen Bereiche gleicher Lautstärke mit den in der Abbildung benannten dB-Werten; [15], S. 21	21
Abbildung 22 Vergleich Optimiertes Standardverfahren (SLDLP-) vs. Standard-LDLP-Verfahren, siehe Abb. 21; [15], S. 22	21

B Literaturverzeichnis

- [1] K. Eggenschwiler und J. M. Wunderli, Lärmbekämpfung (Vorlesungsskript), Zürich: ETH Zürich, 2010.
- [2] A. Trautwein, U. Kreibitz und J. Hüttermann, Physik für Mediziner, Biologen, Pharmazeuten, Berlin: Walter de Gruyter, 2008.
- [3] F. Dorn und F. Bader (Hrsg.), Physik – Oberstufe MS, Hannover: Hermann Schroedel Verlag KG, 1975.
- [4] Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm), 2015.
- [5] H. Mensen, Planung, Anlage und Betrieb von Flugplätzen, Berlin Heidelberg New York: Springer, 2013.
- [6] Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V. (Hrsg.), Leiser Flugverkehr (Zusammenfassender Projekt-Abschlussbericht), 5. 07. 2004. URL: http://www.dlr.de/as/Portaldata/5/Resources/dokumente/abteilungen/abt_ts/Abschlussbericht_LFVK.pdf. [Zugriff am 02. 09. 2015].
- [7] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., DLR-Projekt „Leiser Flugverkehr II – Abschlussbericht,“ Dezember 2007. URL: http://www.dlr.de/as/Portaldata/5/Resources/dokumente/abteilungen/abt_ts/Abschlussbericht_Wissenschaft.pdf. [Zugriff am 02. 09. 2015].
- [8] C. Gerthsen, Physik – Ein Lehrbuch zum Gebrauch neben Vorlesungen, Berlin Göttingen Heidelberg: Springer-Verlag, 1963.
- [9] U. Isermann, Fluglärmrechnungsverfahren – von der AzB zum Werkzeug für den aktiven Schallschutz, DAGA 2011 Düsseldorf.
- [10] J. H. Beckers, Verbesserungspotenzial für die Fluglärmbekämpfung in Europa, Mai 2009. URL: <http://www.fluglaerm.de/Dokumentation/907-MA-EU-FLBK-907.pdf>. [Zugriff am 08. 09. 2015].
- [11] MTU Aero Engines Holding AG, Antrieb der Zukunft: MTU und Pratt & Whitney entwickeln Getriebefan, 18. 07. 2007. URL: www.mtu.de/fileadmin/DE/7_News_Media/1_Presse/1_Aktuelle_Pressemeldungen/2007/07_06_18_gtf_de.doc [Zugriff am 12. 09. 2015].
- [12] J. Banke, NASA Helps Create a More Silent Night, 13. 12. 2010. URL: http://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/bridges_chevron_events.html. [Zugriff am 03. 09. 2015].
- [13] Depatis, Patent DE 102008024463 B4, URL: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?window=1&space=menu&content=treffer&action=pdf&docid=DE102008024463B4&Cl=7&Bi=1&Ab=1&De=2&Dr=8&Pts=&Pa=&We=&Sr=1&Eam=&Cor=&Aa=&so=desc&sf=vn&firstdoc=1&NrFaxPages=17&pdfpage=16>. [Zugriff am 10. 09. 2015].
- [14] U. Isermann, Lärmauswirkungen bei unterschiedlichen Abflugverfahren, Raunheim:

-
- Sitzung der Fluglärnkommision , 2012.
- [15] U. Isermann, Lärmoptimierte Flugverfahren, 19. 06. 2012. URL: <http://www.ald-laerm.de/downloads/veranstaltungen-des-ald/Isermann-Laermoptimierte-Flugverfahren.pdf>. [Zugriff am 20. 08. 2015].
- [16] Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm (FluLärmG), 2015.
- [17] Luftverkehrsordnung, 2015.
- [18] Flughafen München GmbH (Hrsg.), Fluglärm und Fluglärmschutz – Umwelt am Flughafen München, 2014.
- [19] B. Figlar, The potential of noise abatement procedures to sustain traffic growth within airport noise constraints, München: Verlag Dr. Hut, 2013.

Eidesstattliche Erklärung

Ich habe diese Seminararbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt.

München, 9. November 2015

(Meike Dünneberger)