

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen benutzt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder noch nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen.

Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfungsbehörde eingereicht worden.

Aachen, im März 2011

Sascha Kaatz

Ich möchte mich hier in erster Linie bei meiner Familie und meinem Freundeskreis danken, die mich ermutigt haben, den Schritt zum Studium zu wagen und mir während diesem stets hilfreich und motivierend zur Seite standen.

Auch möchte ich mich bei Herrn Professor Janser für seine oft fordernde, dennoch immer unterstützende Art und Weise bedanken, mit der er diese Arbeit begleitet und zu einem guten Ergebnis geführt hat. Damit einhergehend auch bei all denen die zum Gelingen dieser Arbeit mit beigetragen haben.

Zudem möchte ich mich auch bei Natalia für ihren Rückhalt und Zuspruch in den letzten Wochen von ganzem Herzen bedanken.

Aachen, den 4. März 2011

„Noise is the sound of the others“

- Kurt Tucholsky -

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Formelzeichen | IV |
| 1. Einleitung | 1 |
| 2. Grundlagen | 3 |
| 2.1 Lärm..... | 3 |
| 2.2 Physikalische Grundlagen..... | 5 |
| 2.2.1 Pegel..... | 5 |
| 2.2.2 Dezibel..... | 5 |
| 2.2.3 Zusammenhang von Leistungs-, Feld- und Pegelgrößen..... | 5 |
| 2.2.4 Schalldruckpegel..... | 6 |
| 2.2.5 Pegel-Zeit-Verlauf..... | 8 |
| 2.2.6 Zeitbewertung..... | 8 |
| 2.2.7 Spitzenschallpegel..... | 8 |
| 2.2.8 Dauerschallpegel..... | 9 |
| 2.3 Psychoakustische Grundlagen..... | 10 |
| 2.3.1 Psychoakustik..... | 10 |
| 2.3.2 Lautstärke und Lautheit..... | 10 |
| 2.3.3 Frequenzbewertung..... | 12 |
| 2.3.4 Tonhaltigkeit..... | 13 |
| 2.3.5 Impulshaltigkeit..... | 13 |
| 3. Lärmmessungen für die ADAC Luftfahrt Technik GmbH | 14 |
| 3.1 Ausgangssituation und Aufgabenstellung..... | 14 |
| 3.2 Versuchsbedingungen..... | 15 |
| 3.2.1 Lärmmessungen..... | 15 |
| 3.2.2 Messequipment..... | 16 |
| 3.2.3 Flughafen..... | 18 |
| 3.2.4 Messstationen..... | 19 |
| 3.2.5 Untersuchte Luftfahrzeuge..... | 21 |
| 3.2.5.1 BK 117 B - 2..... | 21 |
| 3.2.5.2 EC 135 P2..... | 25 |
| 3.3 Werkstattflugbetrieb..... | 29 |
| 3.3.1 Lärmmessung zum Werkstattflugbetrieb..... | 29 |
| 3.3.1.1 Flugroute..... | 29 |
| 3.3.1.2 Messstationen..... | 30 |
| 3.3.2 Ergebnisse der Messungen zum Werkstattflugbetrieb..... | 31 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.4 | Werft- und Wartungsbetrieb..... | 35 |
| 3.4.1 | Lärmmessung zum Werft- und Wartungsbetrieb..... | 35 |
| 3.4.1.1 | Betriebspositionen und -Zustände..... | 35 |
| 3.4.1.2 | Messstationen..... | 36 |
| 3.4.2 | Ergebnisse der Messungen zum Werft- und Wartungsbetrieb..... | 37 |
| 3.5 | Emissionsspektrum der Hubschrauber..... | 41 |
| 3.5.1 | Lärmmessungen zum Emissionsspektrum der Hubschrauber..... | 41 |
| 3.5.1.1 | Betriebszustände..... | 41 |
| 3.5.1.2 | Messpunkte..... | 41 |
| 3.5.2 | Meßergebnisse aus der Hubschraubervermessung..... | 42 |
| 3.5.2.1 | Schalldruckpegel..... | 42 |
| 3.5.2.2 | Richtcharakteristik..... | 46 |
| 3.5.2.3 | Spektralanalyse..... | 48 |
| 3.6 | Abschirmung durch die Werft..... | 53 |
| 3.7 | Maßnahmen zur Lärminderung..... | 54 |
| 3.7.1 | Seperate Betrachtung der entsprechenden Maßnahmen..... | 54 |
| 3.7.1.1 | Ausnutzung der Richtwirkung..... | 54 |
| 3.7.1.2 | Ausnutzung der Abschirmung durch die Werft..... | 55 |
| 3.7.2 | Zusammenfassung der Optionen der ADAC Luftfahrt Technik GmbH..... | 57 |
| 3.8 | Fazit der Lärmmessungen..... | 59 |
| 3.9 | Helipad..... | 60 |
| 3.9.1 | Grundlagen..... | 60 |
| 3.9.1.1 | Ausgangssituation..... | 60 |
| 3.9.1.2 | Rahmenbedingungen..... | 60 |
| 3.9.1.3 | Anforderungen an die Konstruktion..... | 62 |
| 3.9.2 | Entwurfsskizze..... | 63 |
| 3.9.3 | 3D- Modell..... | 65 |
| 4. | Schalldämpfung durch Fliegerhelme..... | 66 |
| 4.1 | Ausgangssituation..... | 66 |
| 4.2 | Binaurale Tonaufnahme und Kunstköpfe..... | 67 |
| 4.3 | Messequipment..... | 70 |
| 4.4 | Gehörschutzsysteme..... | 72 |
| 4.4.1 | Unterteilung..... | 72 |
| 4.4.2 | HML und SNR..... | 73 |
| 4.4.3 | Untersuchte Gehörschutzsysteme..... | 74 |
| 4.5 | Betrachtete Schalldrucksignale..... | 75 |

| | |
|---|-----------------|
| 4.6 Messablauf..... | 77 |
| 4.7 Messergebnisse..... | 79 |
| 4.7.1 Binaural Sound Pressure Level..... | 79 |
| 4.7.2 Tonale Schallsignale..... | 80 |
| 4.7.2.1 Frequenzspektren..... | 80 |
| 4.7.2.2 Schalldruckpegel..... | 82 |
| 4.7.3 Typische Hubschrauberschallereignisse..... | 86 |
| 4.7.3.1 Frequenzspektren..... | 86 |
| 4.7.3.2 Schalldruckpegel..... | 90 |
| 4.8 Zusammenfassung der Messergebnisse und Fazit..... | 91 |
| Abbildungsverzeichnis..... | 93 |
| Tabellenverzeichnis..... | 95 |
| Quellenverzeichnis..... | 96 |
| Anhang..... | <i>i</i> |
| A-1 Messstationen..... | <i>ii</i> |
| A-2 Werkstattflugbetrieb..... | <i>iv</i> |
| A-3 Werft- und Wartungsbetrieb..... | <i>xiii</i> |
| A-4 Richtcharakteristik..... | <i>xxi</i> |
| A-5 Terzbandspektrum..... | <i>xiv</i> |
| A-6 Dämmverhalten tonaler Signale, Frequenzspektrum..... | <i>xxxii</i> |
| A-7 Dämmverhalten tonaler Signale, Schalldruckpegel..... | <i>xxxix</i> |
| A-8 Dämmverhalten bei Hubschrauberschall, Frequenzspektrum..... | <i>xli</i> |
| A-9 Dämmverhalten bei Hubschrauberschall, Schalldruckpegel..... | <i>xliv</i> |
| Anhangsverzeichnis..... | <i>xlvi</i> |

Formelzeichen

| Größe | Bezeichnung | Einheit |
|-----------------|-----------------------------|------------------------|
| A | Fläche | m ² |
| B | Bandbreite | Hz |
| $BSPL$ | Binauraler Schalldruckpegel | B, dB, dB(A) |
| c | Schallgeschwindigkeit | m/s |
| f | Frequenz | Hz |
| H | Höhe | m, ft. |
| I | Schallintensität | W/m ² |
| L | Pegel | B, dB, dB(A) |
| L_N | Lautstärkepegel | phon |
| L_p | Schalldruckpegel | B, dB, dB(A) |
| N | Lautheit | sones |
| P_{Ak} | Akustische Leistung | W |
| p | Druck | N/m ² , bar |
| r | Abstand, Radius | m |
| t | Zeit | sek |
| T | Beurteilungszeitraum | sek |
| y | Lineare Größe | 1 |
| Y | Quadratische Größe | 1 |
| α, β | Winkel | ° |
| λ | Wellenlänge | m |
| ρ | Dichte | kg/m ³ |

Indizes

| Indize | Bezeichnung |
|-----------------|-------------------------------------|
| 0 | Bezugswert |
| $1, 2, 3 \dots$ | Zeitliche oder örtliche Reihenfolge |
| 10 | 10-dB down time |
| A | Größe unterliegt A-Bewertung |
| Ak | Akustisch |

| Indize | Bezeichnung |
|------------------------|---|
| <i>Betriebszustand</i> | Den Betriebszustand betreffend |
| <i>BK 117</i> | Hubschrauber BK 117 betreffend |
| <i>EC 135</i> | Hubschrauber EC 135 betreffend |
| <i>eq</i> | Äquivalent |
| <i>Hubschrauber</i> | Die Hubschrauber betreffend |
| <i>Idle</i> | Betriebszustand Idle betreffend |
| <i>m</i> | Mittel |
| <i>Max</i> | Maximum |
| <i>N</i> | Lautheit |
| <i>o</i> | Oben |
| <i>p</i> | Druck |
| <i>St</i> | Unter Berücksichtigung von Störeinflüssen |
| <i>u</i> | Unten |
| <i>Umg</i> | Umgebung |
| <i>Volll.</i> | Betriebszustand Volllast betreffend |

1. Einleitung

„Die größten Ereignisse – das sind nicht unsere lautesten, sondern unsere stillsten Stunden“^[1], lässt Friedrich Nietzsche 1884 seinen Zarathustra verkünden. Stille und Ruhe als Quellen sowohl der Erholung als auch konstruktiver Tätigkeiten, dies wusste nicht nur der berühmte Philosoph zu schätzen, sondern neben ihm zahlreiche weitere bedeutende Gelehrte vergangener Tage. Das wohl bekannteste literarische Denkmal hat der Stille der Dichter Johann Wolfgang von Goethe gesetzt. Im „Wanderers Nachtlied“ von 1813 heißt es: „Über allen Gipfeln / Ist Ruh, / in allen Wipfeln/ Spürest du / kaum einen Hauch, / Die Vögelein schweigen im Walde / Warte nur, balde/ Ruhest auch du.“^[2] Auch heute wird man Nietzsche oder Goethe ohne weiteres zustimmen wollen, dass Phasen der Stille und Ruhe notwendige Bestandteile des alltäglichen Lebens eines jeden Einzelnen sind.

Manch einer wird allerdings das Gefühl haben Ruhe und Stille in Anbetracht der großen Anzahl potentieller und tatsächlicher Schallquellen, die uns heute umgeben, nur noch selten genießen zu können. Spätestens mit Beginn der Industrialisierung, dem steten Wachstum der Städte und dem beständigen Ausbau der Infrastruktur durch die zunehmende Vernetzung von Straßen- Schienen- und Luftfahrtwegen, stand nämlich auch die Stille, wie Goethe sie noch beschrieb, für viele Menschen zur Disposition.

„Von den Gedanken gedeihen nur noch diejenigen, denen die Begleitung eines dumpfen rollenden Donners von der Straße keinen Abtrag tut“^[3], schimpft der Tübinger Philosoph Eduard Spranger 1955 und bereits vor dem ersten Weltkrieg gründet sich in Deutschland ein „Anti-Lärm-Verein“, der es sich zur Aufgabe gemacht hatte all „dies unaufhörliche Brüllen, Dröhnen, Pfeifen, Zischen, Fauchen, Hämmern, Rammeln, Klopfen, Schrillen, Schreien und Toben“^[3], dem die Menschen täglich ausgesetzt seien, zu bekämpfen. Auch wenn dem „Anti-Lärm-Verein“ nur eine kurze Überlebensdauer beschieden war, so zeigen doch Kampagnen wie der „International Noise Awareness Day“, der mit Unterstützung zahlreicher staatlicher und gemeinnütziger Organisationen in diesem Jahr (2011) zum 14. Mal auch in Deutschland stattfindet, dass der Lärmschutz nach wie vor ein gesellschaftliches Anliegen ist. Am häufigsten werden hierbei der Straßen- und Schienenlärm und zunehmend auch der Fluglärm als störend oder belästigend empfunden. Besonders dort wo Autobahnen, Schienennetze oder Flughäfen bzw. Flugschneisen in unmittelbarer Nachbarschaft zu Wohngebieten liegen ergibt sich immer wieder ein Konfliktpotential zwischen den Lärmverursachern, d.h. den Betreibergesellschaften der betroffenen Verkehrswege und Verkehrsknotenpunkte, und den umliegenden Anwohnern. Besteht an der Nützlichkeit der betroffenen Verkehrswege für die Allgemeinheit kein Zweifel, so gilt es nach Möglichkeiten zu suchen die für beide Seiten einen sinnvollen Kompromiss darstellen können. So versteht sich dann auch das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) als eine Regelung zur Herstellung eines Interessenausgleiches zwischen Lärmverursachern und betroffenen Anwohnern.

In den letzten Jahren ist insgesamt die Tendenz zu beobachten, dass die durch das BImSchG festgesetzten Grenzwerte zum Lärmschutz immer weiter gesenkt werden. Dies ist nicht zuletzt deshalb der Fall, weil neuere medizinische Untersuchungen eine Gefährdung sowohl der physischen als auch der psychischen Gesundheit durch dauerhafte Lärmeinwirkung belegen. Darüber hinaus spielen auch Erkenntnisse zum Umweltschutz eine große Rolle.

Im Bereich des Flugverkehrs sind die Betreiber und Nutzer von Flughäfen heute angesichts solcher ehrgeiziger Vorgaben aus Brüssel wie der „ACARE Strategic Research Agenda 2020“, die eine Halbierung des Fluglärms bis zum Jahre 2020 anstrebt, darauf angewiesen verstärkt schallmindernde Maßnahmen zu ergreifen. Dabei liegt es in ihrem Interesse, dass solche Maßnahmen ohne größeren Einfluss auf die Start- und Landkapazitäten bleiben bzw. nicht allein auf die Reduktion des Flugverkehrs abstellen. Die Entwicklung und Umsetzung innovativer Schallschutzkonzepte ist daher bereits jetzt ein wichtiger Teil des Flugbetriebs und dürfte in der Zukunft noch an Bedeutung gewinnen. Schließlich ist zu erwarten, dass der Flugverkehr künftig eher zu- als abnimmt.

Diese Arbeit dokumentiert im ersten Teil die Ermittlung und Bewertung der durch die ADAC Luftfahrt Technik GmbH hervorgerufenen Lärmimmission im Wohngebiet von Hangelar, einem Stadtbezirk von Sankt-Augustin im nordrheinwestfälischen Rhein-Sieg-Kreis. Dabei werden sowohl der Flugbetrieb als auch der Werft- und Wartungsbetrieb berücksichtigt. Außerdem wird eine akustische Vermessung der Hubschrauber der ADAC Luftfahrt Technik GmbH vorgenommen. Ausgehend von diesen Ergebnissen werden Konzepte vorgestellt mit deren Hilfe die Lärmimmission im anliegenden Ort gesenkt werden können. Dabei werden zum einen Optionen vorgestellt, wie die ADAC Luftfahrt Technik GmbH ihrerseits durch Modifikationen der innerbetrieblichen Abläufe zur Minderung der Lärmimmission beitragen kann, zum anderen werden darüber hinaus weiterführende Konzeptideen zur Schallminderung vorgestellt, die sich etwa in Kooperation mit der Fachhochschule Aachen umsetzen ließen.

In einem zweiten Teil befasst sich die Arbeit schließlich nicht mit den Auswirkungen des Hubschrauberlärms auf seine Umgebung sondern mit der Schalleinwirkung auf Besatzung und Passagiere, die sich in der Hubschrauberkabine befinden. Hierbei werden Untersuchungen zur Güte der Schallminderung von Fliegerhelmen durchgeführt und mit herkömmlichen Gehörschutzsystemen verglichen, wie sie im Einzelhandel erhältlich sind.

2. Grundlagen

2.1 Lärm

Das Wort Lärm stammt vom frühneuhochdeutschen *larman*^[17], und bedeutet in seiner ursprünglichen Form soviel wie Geschrei oder Krach. Heute lässt sich Lärm ganz allgemein als der Teil des auf uns und die Umwelt einwirkenden Schallfeldes beschreiben, den wir als unerwünscht, störend oder unangenehm empfinden^[4]. Die Feststellung, dass es sich bei einem Geräusch um Lärm handelt oder nicht, unterliegt hierbei der subjektiven Beurteilung des Einzelnen. So mag dem motorradbegeisterten Harley-Liebhaber das Motorengeräusch seiner Maschine ebenso wie "Musik in den Ohren klingen" wie der jungen Mutter das Schreien ihres Neugeborenen. Ein Außenstehender hingegen mag im Falle beider Geräusche weniger von Musik als vielmehr von Lärm sprechen.

Entsprechend einer solchen Definition existiert dann auch eine definierte physikalische Größe "Lärm" nicht. Es lassen sich in der Physik allerdings solche Schallquellen als Lärmquellen bezeichnen, von denen nach subjektiver Beurteilung des Hörenden, ein bestimmter Anteil des Geräuschespektrums als störend empfunden wird. Der von solchen Lärmquellen emittierte Schall lässt sich schließlich als Lärm bezeichnen.

Bei Lärmmessungen wird dementsprechend nicht der Lärm als solcher, sondern vielmehr das gesamte vorliegende Geräuschfeld gemessen und anschließend mit einer Referenzmessung der Umgebung, ohne den Anteil der Lärmquelle, verglichen. Dabei werden physikalische Schallgrößen festgehalten, die es zulassen unter Berücksichtigung der psychoakustischen Effekte, die Wahrnehmung eines Geräusches als Lärm zu beschreiben. Diese Größen sind:

- Der Schalldruckpegel - Allgemein werden größere Druckpegel als lauter empfunden
- Die Tonhöhe - Hohe Töne werden in der Regel als unangenehmer empfunden
- Die Tonhaltigkeit - Die wahrgenommene Lautstärke erhöht sich bei einzelnen tonalen Komponenten im Geräusch
- Die Impulshaltigkeit - Konstante Geräusche werden bei selbiger Lautstärke als angenehmer empfunden als impulsartige

Zudem erlauben es inzwischen moderne Messtechniken, die Frequenz-Zusammensetzung von Geräuschen zu ermitteln. Wie noch zu zeigen ist, spielen diese gerade bei der Bewertung von Fluglärm eine besondere Rolle.

Bei der Bestimmung der Stärke einer Belästigung durch Lärm, sind wie im Falle des Motorradliebhabers und der jungen Mutter bereits angedeutet, viele subjektive und psychoakustische Faktoren von Bedeutung. Beispiele wären:

- Die Tätigkeit - Während der Schlafenszeit oder bei Tätigkeiten die hohe Konzentration erfordern wirkt Lärm extrem störend
- Die persönliche Bewertung - Geräusche, die jemand mag, werden auch bei hohen Lautstärken nicht als störend empfunden und umgekehrt
- Das persönliche Befinden - Der allgemeine gesundheitliche Zustand eines Menschen kann sich auf die Lärmempfindlichkeit auswirken
- Die soziale und kulturelle Bewertung - Kirchenglocken werden z.B. von weniger Menschen als störend bezeichnet als Motorengeräusche vor dem Haus

Das deutsche Rechtssystem unterteilt Lärm in die folgenden drei Kategorien^[17]:

- Verkehrslärm (Straßen- und Schienenverkehrslärm, Fluglärm, Baustellenlärm)
- Gewerbe- und Industrielärm
- Nachbarschafts-, Freizeit- und Sportlärm

Lärm, der z.B. durch öffentliche Veranstaltungen, Schießplätze oder Kirchenglocken entsteht, wird in gesonderten Regelwerken festgehalten und beschrieben. Bisher gibt es in Deutschland eine ganze Reihe von Gesetzen und Normen zur Berechnung und Beurteilung von Lärmwirkungen.

Bei den verschiedenen Lärmquellen werden in Deutschland unterschiedliche Maßstäbe angewandt. So wird der Verkehrslärm nach geltendem Recht nicht gemessen, sondern nur berechnet. Eine Ausnahme bildet allerdings der Fluglärm. Als einzige Lärmquelle wird dieser an Verkehrsflughäfen kontinuierlich 24 Stunden lang täglich gemessen. Die Vorgaben zur Fluglärminderung sind hierbei im Laufe der Zeit deutlich verschärft worden. So soll etwa gemäß dem EU-Beratungsgremium durch die „ACARE Strategic Research Agenda 2020“ eine Halbierung des Fluglärms bis zum Jahre 2020 erreicht werden.

Von Belästigung durch Lärm wird dann gesprochen, wenn aufgrund eines oder mehrerer auftretender Geräusche eine Aktivität unterbrochen bzw. behindert wird. Eine solche Unterbrechung oder Behinderung liegt beispielsweise vor wenn,

- die sprachliche Kommunikation gestört wird,
- Denkleistungen beeinträchtigt werden,
- oder angestrebte körperliche Ruhe unterbunden wird (Schlaf, Auskurieren von Krankheiten usw.).

Die Beurteilung und Bewertung von Lärm bzw. Geräuschen kann mit Hilfe zahlreicher Methoden geschehen, die sowohl auf physikalischen als auch auf psychoakustischen Grundlagen beruhen. Das heißt Lärm wird nicht nur in Form physikalischer Änderungen beschrieben, sondern auch mit Hilfe der Auswirkungen, die solche physikalischen Änderungen im Empfinden eines Menschen hervorrufen^[5]. Die grundlegenden physikalischen Größen und psychoakustischen Aspekte sollen in der Folge vorgestellt werden.

2.2 Physikalische Grundlagen

2.2.1 Pegel

Pegel drücken in der Physik das logarithmierte Verhältnis elektrischer oder akustischer Größen gleicher Einheit aus^[6], bei der die Größe des im Nenner stehenden Wertes festgesetzt ist. Dieser wird Bezugswert genannt und entspricht mit der Bezugsgröße P_0 dem Nullpegel ($L = 0$).

$$L = \lg \frac{P}{P_0} [B] \quad (2.1)$$

Wird die Größe des Wertes im Nenner nicht festgesetzt ergeben sich relative Pegel, auch Maße genannt. Maße geben nur Werteverhältnisse wieder. Aus ihnen sind keinerlei Rückschlüsse auf die Zahlenwerte möglich. Die Logarithmierung dient der einfacheren Handhabung des sehr großen Intervalls von Schalldrücken, die durch das menschliche Gehör erfasst werden können. Das Formelzeichen des Pegels ist „L“ und stammt vom englischen "level".

2.2.2 Dezibel

Im Allgemeinen hat sich für die Kennzeichnung und Beurteilung von Pegeln das Bel (B) durchgesetzt. Häufiger wird aufgrund handlicherer Zahlenwerte das Dezibel (dB) verwendet, das dem zehnten Teil eines Bels entspricht. Das Bel entstammt nicht dem SI-Einheitensystem sondern dient als sogenannte Hilfseinheit zur Kennzeichnung von Pegeln und Maßen.

Ein Dezibel ist definiert als der 20-fache Briggsche Logarithmus eines Verhältnisses linearer Größen zueinander und als der 10-fache Briggsche Logarithmus eines Verhältnisses quadratischer Größen zueinander^[6].

$$dB \triangleq 20 \cdot \lg \frac{y_1}{y_0} \quad \text{bzw.} \quad dB \triangleq 10 \cdot \lg \frac{Y_1}{Y_0} \quad (2.2, 2.3)$$

y_1, y_0 lineare Größen
 Y_1, Y_0 quadratische Größen

2.2.3 Zusammenhang von Leistungs-, Feld- und Pegelgrößen

In linearen Systemen verhalten sich Leistungs- bzw. Energiegrößen P proportional zu den Quadraten der Effektivwerte von Feldgrößen (x_{eff})^[2]. Damit gilt: $P \sim x_{eff}^2$. Gemäß den Gleichungen 2.1 bis 2.3 ergibt sich die Beziehung:

$$L = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \text{ dB} = 10 \cdot \lg \left(\frac{x_{eff2}^2}{x_{eff1}^2} \right) \text{ dB} = 20 \cdot \lg \left(\frac{x_{eff2}}{x_{eff1}} \right) \text{ dB} \quad (2.4)$$

Als Beispiel für Leistungs- und Feldgrößen seien die Schallleistung oder auch akustische Leistung P_{Ak} und die Feldgröße Schalldruck p angeführt.

Tabelle 2.1 bietet einen Überblick über den Zusammenhang der Verhältnisse von Energie- und Feldgrößen und dessen Pegelgrößen in dB.

| P_2/P_1 | x_{eff2}/x_{eff1} | L |
|----------------|---------------------|--------|
| 10000 | 100 | 40 dB |
| 100 | 10 | 20 dB |
| 10 | $\approx 3,16$ | 10 dB |
| ≈ 4 | ≈ 2 | 6 dB |
| ≈ 2 | $\approx 1,41$ | 3 dB |
| $\approx 1,26$ | $\approx 1,12$ | 1 dB |
| 1 | 1 | 0 dB |
| $\approx 0,79$ | $\approx 0,89$ | -1 dB |
| $\approx 0,5$ | $\approx 0,71$ | -3 dB |
| $\approx 0,25$ | $\approx 0,5$ | -6 dB |
| 0,1 | $\approx 0,32$ | -10 dB |
| 0,01 | 0,1 | -20 dB |
| 0 | 0,01 | -40 dB |

Tabelle 2.1: Beziehung von Pegel, Energie- und Feldgrößen

Anhand der Tabelle 2.1 lässt sich die grundsätzliche Problematik verdeutlichen, die sich bei der Ergreifung lärmindernder Maßnahmen und der Festsetzung neuer Lärmgrenzen ergibt. Zur Erreichung einer Schallreduzierung um 3 dB muss die akustische Leistung P_{Ak} um 50% reduziert werden. Die „Agenda 2020“ etwa sieht eine Halbierung des Fluglärms vor. Zur Halbierung eines Lautstärkeindrucks ist eine Pegelminderung um 10 dB erforderlich. Dies bedeutet, dass die akustische Leistung des aktuellen Fluglärms um 90% reduziert werden muss.

2.2.4 Schalldruckpegel

Die für Lärmmessungen interessante Größe stellt der Schalldruckpegel L_p (L von engl. "level" und p von engl. "pressure") dar.

Der Bezugswert für Luftschall ist international auf $p_0 = 20 \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ festgesetzt. Dies entspricht in etwa der unteren Hörschwelle des menschlichen Gehörs bei einer Frequenz von 1000 Hz, sodass 0 dB den "gerade noch" bzw. "gerade nicht mehr" hörbaren Schall bezeichnen. Die Vorfaktoren sind dabei so gewählt, dass eine Pegeldifferenz von 1 dB als gerade noch unterschiedlich laut empfunden wird. Mit p_{eff} als Effektivwert eines Schallereignisses berechnet sich der Schalldruckpegel L_p von Gleichung 2.4 ausgehend wie folgt:

$$L_p = 20 \cdot \lg\left(\frac{p_{eff}}{p_0}\right) \text{ dB} \quad \text{bzw.} \quad L_p = 10 \cdot \lg\left(\frac{p_{eff}^2}{p_0^2}\right) \text{ dB} \quad (2.5, 2.6)$$

Als Pegelgröße kann der Schalldruckpegel sowohl positive als auch negative Werte annehmen, je nachdem ob der vorliegende Schalldruck größer oder kleiner als der Bezugswert ist. Negative Pegel liegen gemäß der Definition des Bezugswertes unterhalb der menschlichen Hörschwelle. Die folgende Tabelle 2.2 und die Abbildung 2.1 vermitteln einen Eindruck der Größenordnung des uns umgebenden Schallspektrums.

| Schalldruck P_{eff} [N/m ²] | Schalldruckpegel L [dB] | Situation/ Beschreibung |
|---|---------------------------------|-----------------------------|
| $2 \cdot 10^{-5}$ | 0 | Hörschwelle |
| $2 \cdot 10^{-4}$ | 20 | Wald bei wenig Wind |
| $2 \cdot 10^{-3}$ | 40 | Bibliothek |
| $2 \cdot 10^{-2}$ | 60 | Büro |
| $2 \cdot 10^{-1}$ | 80 | dicht befahrene Stadtstraße |
| $2 \cdot 10^0$ | 100 | Presslufthammer, Sirene |
| $2 \cdot 10^1$ | 120 | Start von Düsenflugzeugen |
| $2 \cdot 10^2$ | 140 | Schmerzgrenze |

Tabelle 2.2: Verhältnis von Schalldruck und Schalldruckpegel

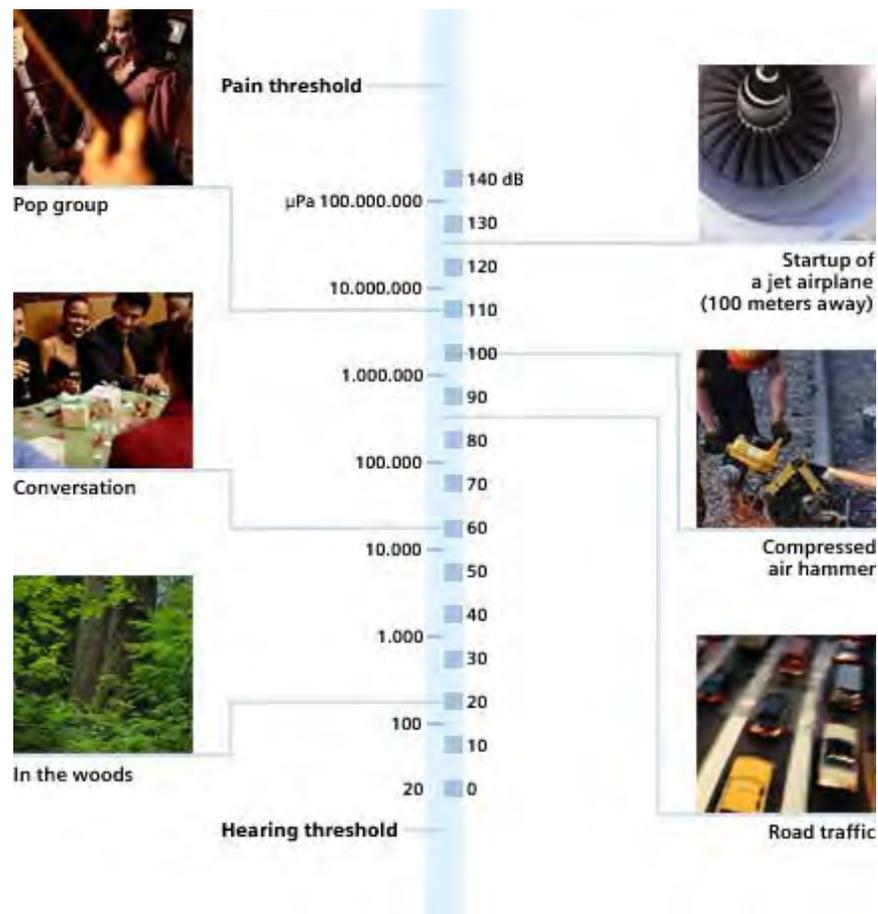


Abbildung 2.1: Dezibelskala ^[12]

Mit 0 dB als unterer Hörschwelle (Hearing treshold) und 140 dB als oberster Schmerzgrenze (Pain treshold) reichen die uns umgebenden Schalldrücke von ca. $2 \cdot 10^{-5}$ bis zu 200 N/m^2 . Somit schafft es das menschliche Gehör ein physikalisches Intervall von sieben Zehnerpotenzen abzudecken. Bemerkenswert ist zudem, dass selbst die größten Schalldrücke immer noch sehr viel kleiner sind, als der atmosphärische Gleichdruck von ca. 10^5 N/m^2 . So beträgt selbst der größte Schalldruck bei 140 dB nur 1/500 des atmosphärischen Druckes^[5].

2.2.5 Pegel-Zeit-Verlauf

In der Regel entsprechen Lärmereignisse instationär auftretenden Erscheinungen. Eine Beschreibung mit Hilfe einer Funktionsgleichung ist daher oft nicht praktisch. Der Pegel-Zeit-Verlauf stellt die Größe des gemessenen Schalldruckpegels grafisch als Funktion der Zeit dar. Dies ermöglicht ein einfaches Ablesen der Schalldruckpegelgrößen an der Ordinatenachse zu jedem Zeitpunkt der Messung. Aus ihm lassen sich zudem der Spitzenschallpegel L_{Max} sowie die relevanten Größen für die Ermittlung des äquivalenten Dauerschallpegels L_{eq} bestimmen.

2.2.6 Zeitbewertung

Bei der Zeitbewertung wird der Zeitverlauf des gemessenen Schalldruckes mit einer bestimmten Zeitkonstante gefiltert. Sie hat Einfluss auf die Trägheit des Pegelverlaufes und somit auf die aufgezeichneten Messwerte.

In der DIN EN 61672 - 1 sind drei verschiedene Zeitbewertungen genormt:

- S (slow): Zeitkonstante 1 s
- F (fast): Zeitkonstante 125 ms
- I (Impuls): Zeitkonstante Pegelanstieg 35 ms, Zeitkonstante Pegelabfall 1,5 s

Die Zeitbewertung „slow“ bewirkt einen stark gedämpften Zeitverlauf des aufgezeichneten Schalldruckpegels. Unter „fast“ reagiert das Messgerät wesentlich schneller, was bei direkt abgelesenen und nicht aufgezeichneten Messungen zum Nachteil führen kann. Eine „Impulse“-Zeitbewertung zeichnet sich durch ein schnelles Ansteigen und ein relativ langsames Abfallen eines Schallereignisses aus.

Je nach Messaufgabe kommen unterschiedliche Zeitbewertungen zum Einsatz. In Normen zur Geräuschmessung werden die jeweils zu verwendenden Zeitbewertungen angegeben.

2.2.7 Spitzenschallpegel

Der Spitzenschallpegel L_{Max} bezeichnet den größten auftretenden Schalldruckpegel der während einer Messung erfasst wird. Er dient als Ausgangspunkt zur Ermittlung der 10 dB-down-time die zur Bestimmung des äquivalenten Dauerschallpegels L_{eq} notwendig ist.

2.2.8 Dauerschallpegel

Der Dauerschallpegel oder auch der äquivalente Dauerschallpegel L_{eq} dient dazu eine Anzahl an Einzelschallereignissen während einer Bewertungszeit T zu einem zeitlich konstanten Pegel zu verrechnen der die gleiche Lärmbelastigung bewirkt wie die Einzelereignisse. Dadurch ergibt sich aus einem instationären Schallereignis ein einziges vergleichbares Maß für die Lärmeinwirkung. Dadurch lassen sich die verschiedensten Geräusch-Situationen (z.B. in zwei verschiedenen Straßen) als Ganzes recht einfach und quantitativ miteinander vergleichen. Anhand der Pegel-Zeit-Verläufe selbst ist dies nur schwer möglich. Im Allgemeinen gilt:

$$L_{eq} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_{eff}^2(t)}{p_0^2} dt \right) = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{(L(t)/10)} dt \right) \quad (2.7, 2.8)$$

$$\text{mit } L(t) = 10 \cdot \lg \left(\frac{p_{eff}(t)}{p_0} \right)^2 \quad (2.9)$$

Dabei entspricht T dem Beurteilungszeitraum, p_{eff} dem effektiven Schalldruck und p_0 dem Bezugswert für den Luftschall.

2007 wurde eine Neufassung des Gesetzes zum Schutz gegen Fluglärm verabschiedet. Hierbei erhielt der äquivalente Dauerschallpegel Einzug in die Bestimmung und Einrichtung von Lärmschutzzonen und löste den bis dato geltende Spitzenschallpegel in seiner Häufigkeit als Bezugsmaß ab. Die gesetzlichen Dauerschallpegel berechnen sich wie folgt:

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \lg \left[\frac{k}{T} \sum_{i=1}^n t_{10,i} \cdot 10^{0,1 L_{Amax,i}} \right] \quad (2.10)$$

Dabei entspricht $L_{Amax,i}$ dem Spitzenschallpegel der i -ten Messung, $t_{10,i}$ der 10 dB-down-time der i -ten Messung und k einem Gewichtungsfaktor für den Tages- bzw. Nachtflugbetrieb. Die 10 dB-down-time ist definiert als die Zeitdauer des Fluglärmereignisses, während der Schalldruckpegel höchstens 10 dB(A) unter dem Spitzenschallpegel $L_{Amax,i}$ liegt.

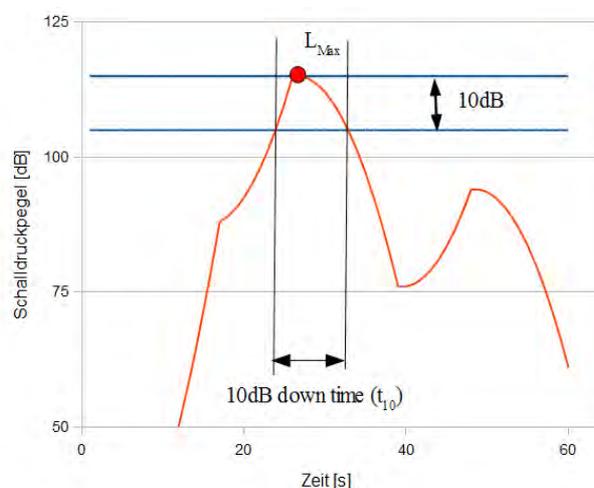


Abbildung 2.2: 10 dB-down-time

2.3 Psychoakustische Grundlagen

2.3.1 Psychoakustik

Die Psychoakustik befasst sich mit dem Zusammenhang von physikalischen Schallereignissen und den vom Menschen empfundenen Hörereignissen. So ist z. B. der empfundene Lautstärkeindruck nicht nur eine Funktion des physikalischen Schalldruckfeldes sondern auch eine Funktion der Frequenz oder des Zeitverhaltens des Schallsignales. Diese Zusammenhänge werden empirisch ermittelt und in DIN- und ISO-Normen festgehalten.

2.3.2 Lautstärke und Lautheit

Die bekannteste psychoakustische Größe ist die Lautstärke. Sie ist ein Maß dafür wie laut ein Schall als Hörereignis empfunden wird. Dieser Zusammenhang ist stark frequenzabhängig. So werden zwei Töne gleichen Schalldruckes jedoch unterschiedlicher Frequenz nicht gleich laut wahrgenommen. Beschrieben wird die Lautstärke durch die Größen des Lautstärkepegels L_N in Phon und der Lautheit N in Sone. Sowohl Phon als auch Sone sind Hilfseinheiten.

Der Lautstärkepegel L_N ist ein Vergleichsmaß zwischen einem Hörereignis und einem Bezugsschall. Der Bezugsschall ist ein Schallsignal mit einer Frequenz von 1000 Hz und eines variablen Schalldruckpegels, der so angepasst wird, dass die Lautstärke gleich der Lautstärke des empfundenen Hörereignisses ist. Durch diesen Vergleich der empfundenen Lautstärke eines beliebigen Schallsignals mit der Lautstärke eines Referenzsignals ist es möglich, die Hörempfindung mit einem Pegelwert zu beschreiben, der unabhängig vom Spektrum des Signals ist. Bei einer Schallfrequenz von 1000 Hz stimmen Schalldruckpegel in Dezibel und Lautstärkepegel in Phon per Definition überein.

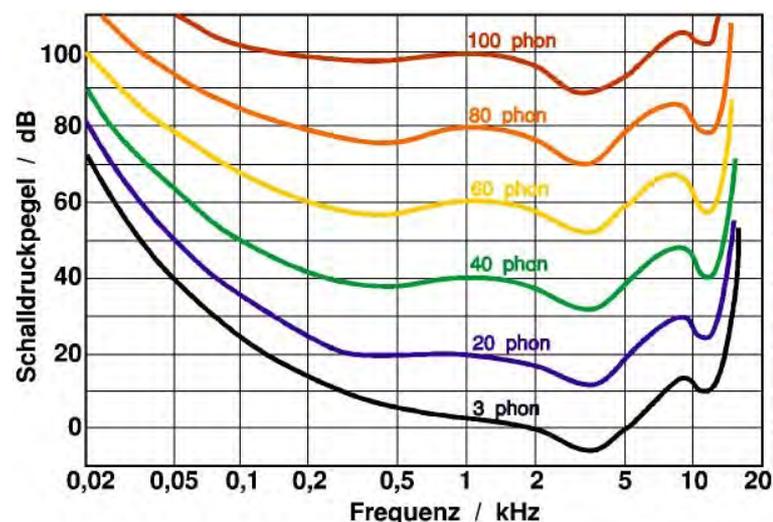


Abbildung 2.3: Kurven gleicher Lautstärkepegel ^[8]

Ein Schall mit einem Lautstärkepegel von 50 phon (beliebiger Frequenz) ist empfunden genauso laut wie ein 1 kHz-Sinuston mit einem Schalldruckpegel von 50 dB. Für Sinustöne anderer

Frequenzen sowie für komplexe Schallereignisse sind dagegen andere Schalldruckpegel erforderlich, um den gleichen Lautstärkeindruck zu erzielen. Welcher Schalldruckpegel für einen Einzelton bei welcher Frequenz erforderlich ist, um jeweils den gleichen Lautstärkeindruck zu erzielen, ist in den "Kurven gleicher Lautstärkepegel" (Isophone) nach Abbildung 2.3 dargestellt. Aus dieser Abbildung geht auch hervor, dass die Frequenzabhängigkeit bei niedrigen Lautstärkepegeln wesentlich ausgeprägter ist, wodurch sich z. B. der Verlauf der 3-Phon-Kurve entlang der Frequenz von etwa + 70 dB bis zu etwa -5 dB erstreckt.

Da der Zusammenhang zwischen der empfundenen Lautstärke nicht proportional zur akustischen Leistung ist (Verdopplung der akustischen Leistung entspricht keiner Verdopplung der Lautstärke), wird die durch Normen festgelegte Größe Lautheit in Sone als Abbildung des menschlichen Lautstärkeempfindens herangezogen. Die Lautheit macht eine direkte Aussage darüber, wie laut ein Mensch den Schall empfindet. „1 sone“ ist definiert als ein Geräusch mit einem Lautstärkepegel von 40 phon. Ein doppelt so laut empfundener Schall erhält den doppelten Lautheitswert, ein halb so laut empfundener Schall den halben Lautheitswert. Oberhalb von 40 phon besteht ein logarithmischer Zusammenhang zwischen Sone und Phon (siehe Abbildung 2.4). Dabei entspricht eine Zunahme des Lautstärkepegels um 10 phon einer Verdoppelung der empfundenen Lautstärke. Beispielsweise wird ein Geräusch der Lautstärke 100 phon 64-mal so laut wahrgenommen wie ein Geräusch mit 40 phon.

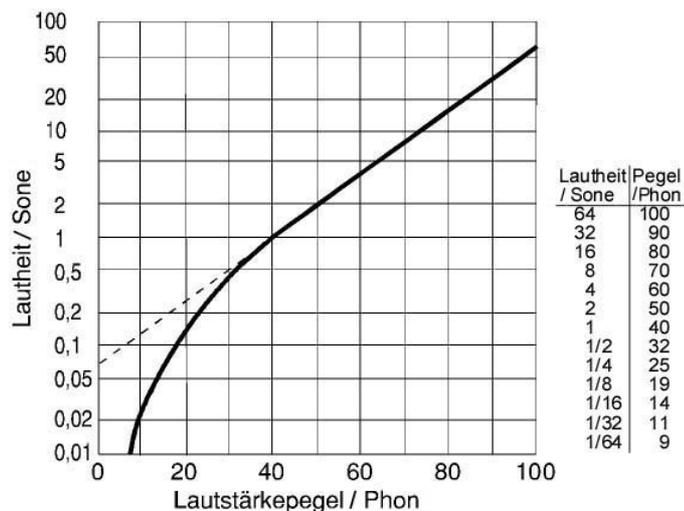


Abbildung 2.4: Zusammenhang von Phon und Sone ^[8]

Lautstärkepegel in Phon und Lautheit in Sone lassen sich in die jeweils andere Einheit umrechnen, bewertete Schalldruckpegel in dB lassen sich hingegen nicht in Phon oder Sone ausdrücken.

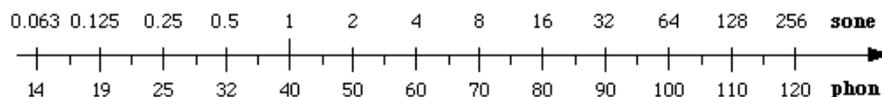


Abbildung 2.5: Sone/Phon- Skalar ^[11]

Für Aussagen darüber, wie "angenehm" oder "unangenehm" ein Schallereignis von einer Person individuell wahrgenommen wird sind weitere Parameter wie Schärfe, Rauigkeit etc. zu berücksichtigen.

2.3.3 Frequenzbewertung

Zur Berücksichtigung der Lautstärkeempfindung in Abhängigkeit von der Frequenz wird zur Beurteilung von Schallereignissen eine Frequenzbewertung vorgenommen. Dazu werden Frequenzfilter mit empirisch ermittelten Übertragungsfunktionen verwendet, welche die Frequenzcharakteristik des menschlichen Ohres berücksichtigen und dessen Lautstärkeempfinden simulieren. Diese sogenannten Frequenzbewertungskurven sind der Abbildung 2.6 zu entnehmen. Es werden folgende Frequenzbewertungen unterschieden:

- A- Bewertung bei ca. 20 – 40 phon
- B- Bewertung bei ca. 50 – 70 phon
- C- Bewertung bei ca. 80 – 90 phon
- D- Bewertung bei sehr hohen Schalldrücken

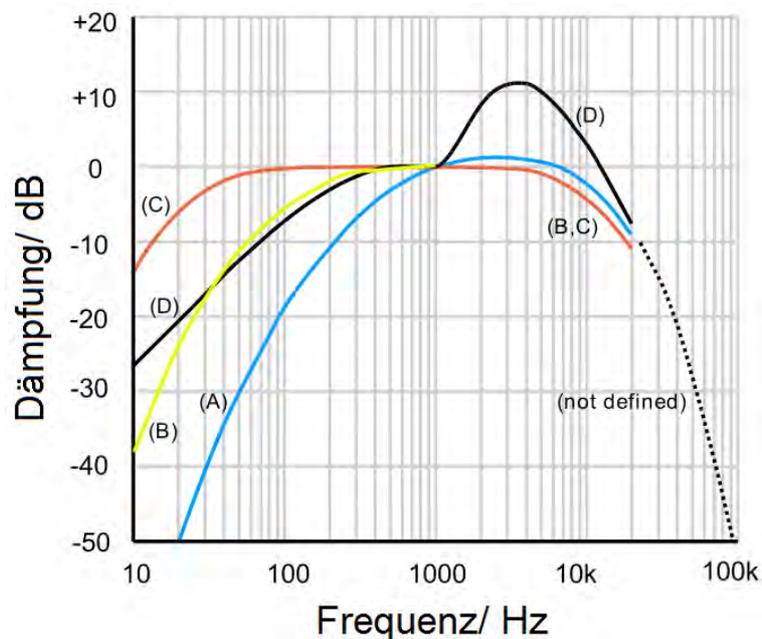


Abbildung 2.6: Bewertungsfilterkurven ^[17]

In Deutschland ist bei Lärmessungen im Bereich der General Aviation die A-Bewertung gebräuchlich und vorgeschrieben. Bei einer Frequenzbewertung ist der unbewertete Schalldruckpegel mit der jeweilige Dämpfung nach Abbildung 2.6 zu versehen. Im Bereich von 1 bis 5 kHz erfolgt bei der A-Bewertung eine Anhebung des eigentlichen Pegelwertes. Alternativ kann der A-bewertete Schalldruckpegel auch über die Beziehung

$$L_A = 10 \cdot \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{L_i + \Delta_i / 10} \right) [dB(A)] \quad (2.11)$$

ermittelt werden. Dabei sind die Werte für Δ_i der Abbildung 2.6 zu entnehmen. Sie können auch in der DIN 45 633 nachgeschlagen werden.

Pegel die einer Frequenzbewertung unterliegen werden nach allen Standards der ISO durch

Ergänzung des Filtertyps an ihrer Hilfseinheit gekennzeichnet. So besitzt ein A-bewerteter Schalldruckpegel die Hilfseinheit dB_A , dBA oder dB(A) .

Der Verlauf der A-Bewertung entspricht etwa dem Frequenzgang des Gehörs bei niedrigen Schalldruckpegeln und senkt im Vergleich zu anderen Bewertungsfiltern hoch- und niederfrequente Geräuschanteile stark ab. Zu Beachten ist, dass die A-Bewertung (wie Lautstärke und Lautheit) nur auf reinen Sinustönen basiert und nicht direkt auf komplexere Geräusche übertragen werden kann. Auch der bewertete Schalldruckpegel kann keine adäquate Lästigkeit eines Schallereignisses ausdrücken, so dass häufig noch Zuschläge z.B. für die Tonhaltigkeit oder Impulshaltigkeit vergeben werden, welche die Fehler der bewerteten Pegelmessung ausgleichen sollen.

2.3.4 Tonhaltigkeit

Tonhaltigkeit liegt dann vor wenn innerhalb eines Geräusches Einzeltöne hörbar sind. Diese erhöhen die Störwirkung dieses Geräusches. Abbildung 2.7 zeigt dies am Beispiel eines Sinustones von 1000 Hz und dessen Auswirkungen auf die Hörschwelle in Abhängigkeit des Schalldruckpegels.

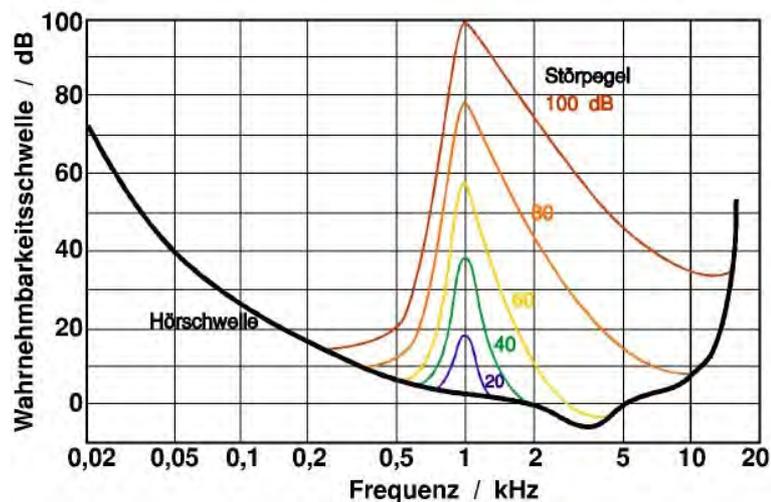


Abbildung 2.7: Einfluss der Tonhaltigkeit auf die Hörschwelle ^[8]

2.3.5 Impulshaltigkeit

Die Impulshaltigkeit dient zur Charakterisierung von Schallereignissen. Sie berücksichtigt schnelle starke Schalldruckpegeländerungen, wie sie z.B. beim Schlagen eines Hammers auftreten. Starke langsamverlaufende Schalldruckpegeländerungen gelten als nicht impulshaltig.

3. Lärmmessungen für die ADAC Luftfahrt Technik GmbH

3.1 Ausgangssituation und Aufgabenstellung

Im Frühjahr 2010 trat die ADAC Luftfahrt Technik GmbH mit Sitz am Flughafen Bonn-Hangelar in Sankt Augustin mit der Anfrage einer Lärmesskampagne an das Strömungslabor des Fachbereichs Luft- und Raumfahrttechnik der Fachhochschule Aachen heran. Anlass dieser Lärmesskampagne war die stetig steigende Unzufriedenheit der ortsansässigen Bevölkerung in den umliegenden Bereichen des Flughafens. Ein Begehren dieser Anwohner ist die Minderung des Geräuschfeldes, das aus dem Flughafenbetrieb resultiert. Von Seiten der Flughafengesellschaft und ihrer Anlieger wurden bereits mehrere Maßnahmen zur Lärmreduzierung ergriffen. So wurde z.B. bereits durch die Flugplatzgesellschaft Hangelar mbH eine Optimierung Platzrundenführung vorgenommen, bei der sowohl eine Anpassung des Grundrisses (Abweichung von der standardmäßigen Rechteckform) als auch der Flughöhe (1000 ft. statt 800 ft. AGL) eingeführt wurde.

Der Flughafen beherbergt eine Vielzahl an Unternehmen, Flugschulen, Fliegergemeinschaften- und Vereinen für Privatpiloten sowie die Hubschrauberstaffel der Bundespolizei. Zur Ermittlung der Schallemissionen eines jeden einzelnen dieser Flughafennutzer ist eine separate Lärmerfassung erforderlich. Diese Untersuchung beschäftigt sich dabei lediglich mit der durch die ADAC Luftfahrt Technik GmbH hervorgerufenen Schallimmission am nahegelegensten Ortsrand von Hangelar. Auf der Basis einer Analyse der Ergebnisse der Lärmmessungen sollen hierbei Möglichkeiten zu einer Optimierung der Schallimmission in den betroffenen Wohngebieten aufgezeigt werden.

Bei den von der Fachhochschule Aachen durchgeführten Lärmmessungen wird hierbei zwischen den verschiedenen Betriebssituationen der Hubschrauber, die aus der Nutzung des Flughafens Bonn- Hangelar von Seiten der ADAC Luftfahrt Technik GmbH resultieren, differenziert. Diese lassen sich in den Werkstattflugbetrieb und in den Werft- und Wartungsbetrieb unterteilen. Die Messungen zum Werkstattflugbetrieb gliedern sich weiter in Ab- und Anflüge. Der Werft- und Wartungsbetrieb wurde zusätzlich auf eine optimale Betriebsposition der Hubschrauber auf dem ADAC Luftfahrt Technik GmbH- Gelände hin untersucht.

Des weiteren boten die Lärmmessungen die Möglichkeit eine akustische Vermessung der Schallemission des Hubschraubers an sich durchzuführen. Diese Messungen dienten später als Grundlage zur Erstellung von hubschraubertypischen Richtcharakteristiken und zur Ermittlung der emittierten Frequenzspektren, die zur Bestimmung einer optimalen Ausrichtung des Hubschraubers im Werft- und Wartungsbetrieb herangezogen wurden. Darüber hinaus konnten sie bei der wissenschaftlich fundierten Entwicklung weiterer Lärmreduzierungsmaßnahmen berücksichtigt werden.

Im folgenden Kapitel werden also zunächst Optionen zur Schallreduzierung am Flughafen Bonn-Hangelar aufgezeigt, die von der ADAC Luftfahrt Technik GmbH unmittelbar umgesetzt werden können. Darüber hinaus wird ein Konzept zur dauerhaften Schallminderung vorgestellt, welches sich künftig in fortlaufender Kooperation zwischen der ADAC Luftfahrt Technik GmbH und der Fachhochschule Aachen umsetzen ließe.

3.2 Versuchsbedingungen

3.2.1 Lärmmessungen

Die durchgeführten Lärmmessungen gliedern sich in drei differenzierte Bereiche.

1. Die Lärmimmission durch den Werkstattflugbetrieb (An- und Ablüge zum bzw. vom Flughafen) an verschiedenen Punkten des Ortsrandes von Hangelar
2. Die Lärmimmission durch den Wartungsbetrieb der Werft (Standläufe (Idle- und Volllastbetrieb) und Hoverbetrieb) an verschiedenen Betriebspositionen des Flughafengeländes an verschiedenen Punkten des Ortsrandes von Hangelar
3. Eine direkte Messung der Lärmemission der Hubschrauber nach Größe, Frequenz und Richtung

Alle Messungen werden sowohl mit Hubschraubern des Typs BK 117 als auch des Typs EC 135 durchgeführt.

Die gemessenen Schalldruckpegel werden jeweils durch die Verwendung eines A-Filters und in ihrem Zeitverlauf nach der Norm „fast“ bewertet.

Weitere Informationen zu den einzelnen Messungen können den entsprechenden Kapiteln entnommen werden.

Das primäre Ziel der durchgeführten Schallmessungen ist die Ermittlung des tatsächlich durch die ADAC Luftfahrt Technik GmbH emittierten Schallfeldes. Es sollen keine offiziellen Lärmmessungen nach den internationalen Richtlinien der *International Civil Aviation Organization* (ICAO) durchgeführt werden, die für die Untersuchungen zur Einhaltung der Lärmvorschriften für Flugplätze gelten. Diese Messverfahren, Techniken und Berechnungsgrundlagen, für die Ermittlung des Lärmes von Hubschraubern, sind in den Kapiteln 8 und 11 des Annex 16 der *Convention on International Civil Aviation* der *International Civil Aviation Organisation* ICAO festgelegt und durch das „Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm“ vom 01.06.2007 (BGBl I. S. 986) und der Ersten Verordnung zur Durchführung des Gesetzes zum Schutz gegen Fluglärm von 2007 (BGBl I. S.) geregelt.

3.2.2 Messequipment

Die Lärmmessungen werden mit dem laptopbasierten PULSE Multi-Analyser System von Brüel & Kjær aufgezeichnet und analysiert. Zudem werden mit einem Modulschallpegelmessers des Typs 2231, ebenfalls von Brüel & Kjær, zusätzliche Kontrollmessungen parallel durchgeführt.

- PULSE Multi-Analyser System mit Front-End-Modul Type 3560-B-10 *

Rechnereinheit:

Typ: Dell Latitude D380
Prozessor: Intel® Core™ 2 Duo CPU Tz500 @ 2.20GHz 789MHz
Hersteller: Dell

Betriebssystem:

System: Microsoft Windows® XP Professional
Version: Version 2002, Service Pack 2
Hersteller: Microsoft

Analysesoftware:

Programm: PULSE LabShop
Version: Version 12.05.196 – 2008-02-01
Hersteller: Brüel & Kjær

Messhardware:

- 1/2" Free field Microfone Unit Type 4149-A-021 inkl. Vorverstärker, Seriennr.: 2628991 *
- Front-End-Modul Type 3560-B-010 *
- Windschirm Typ UA 0237 *
- Netzteil für Front- End- Modul Typ ZG 0429, Model LAD6019AC3 (A) *
- Softwaredongle *

Zubehör:

- BNC-Verlängerungskabel für das Mikofon (10m)
- Adapterkabel BNC auf Lemo (1m)
- LAN-Kabel (1,8m)
- Mikrofonständer (1,3m)
- Portable 12V- Batterie

- **Modulschallpegelmesser** mit VP7382/ WH2973 – Software Typ 2231 *

Messsoftware:

Programm: VP 7382/ WH 2973
Version: -
Hersteller: Brüel & Kjær

Messhardware:

- Modulschallpegelmesser Typ 2231, Seriennr.: 1221146 *
- 1/2" Free field Microfone Unit Type 41891 inkl. Eingangsstufe ZC 0020, Seriennr.: 1836828 *

Zubehör:

- Mikrofonständer (1,3m)

* Hersteller: Brüel & Kjær



Abbildung 3.1: PULSE Multi-Analyser^[13]



Abbildung 3.2: Modulschallpegelmesser^[14]

3.2.3 Flughafen

Der Sitz der ADAC Luftfahrt Technik GmbH liegt am Flughafen Bonn- Hangelar in Sankt Augustin, an der nord-östlichen Stadtgrenze zu Bonn.

| | |
|----------------------|--|
| Name: | Flughafen Bonn Hangelar |
| ICAO Code: | EDKB |
| Anschrift: | Richthofenstr. 126 53757 Sankt Augustin |
| Lage: geogr. Breite: | N 50.4613 |
| geogr. Länge: | E 07.0984 |
| Höhe über NN: | 197ft/ 60m |
| Start-/ Landebahnen: | RWY 11/ 29 |
| Lage der Bahn: | 1120/ 2920 rechtsweisend |
| Länge der Bahn: | 800m |
| Oberfläche der Bahn: | Asphalt |

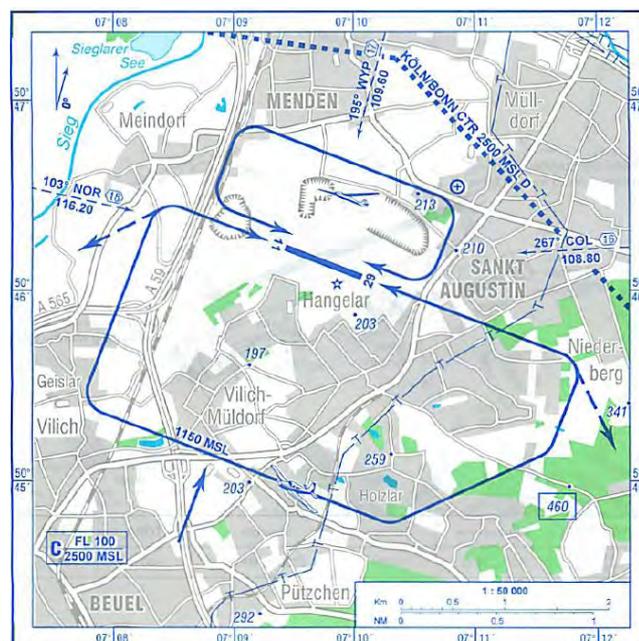


Abbildung 3.3: AIP- Flughafenkarte Bonn-Hangelar

3.2.4 Messstationen

Für die Lärmmessungen werden insgesamt fünf Messstationen in Hangelar eingerichtet. Die Wahl der Positionen dieser Messstationen, wurden dabei nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- gleichmäßige Verteilung entlang des Wohngebietes
- möglichst freie Fläche
- schallharter Boden
- möglichst ungestörte Anströmung des vom Flughafen ausgesendeten Schallfeldes
- unmittelbare Nähe zur Flugroute

Die Messstationen befinden sich an folgenden Stellen:

Messstation Nr. 1: Parkplatz Richthofenstr. Ecke Bundesgrenzschutzstr.

Messstation Nr. 2: Parkplatz gegenüber dem Friedhofsgebäude auf der Fritz-Pulling-Str.

Messstation Nr. 3: Parselvalstr. Ecke Falderbaumstr.

Messstation Nr. 4: Parkplatz der Hertz Autovermietung, Kölnstr. 4

Messstation Nr. 5: Parkplatz des Sportgeländes am Ende der Fritz-Pulling-Str.

Geografische Lage:

| | Längengrad | Breitengrad |
|---------------|------------|-------------|
| Messstation 1 | 7.09611 | 50.45699 |
| Messstation 2 | 7.09861 | 50.45809 |
| Messstation 3 | 7.10106 | 50.45795 |
| Messstation 4 | 7.10596 | 50.46032 |
| Messstation 5 | 7.09929 | 50.45843 |

Tabelle 3.1: Geografische Lage der Messstationen

Messstation 2 wurde zusätzlich in die Messungen mit aufgenommen, obwohl sie die oben aufgezählten Kriterien nicht erfüllt. Anwohner dieses Bereiches haben allerdings besonders häufig über Lärmbelästigung geklagt. Messstation 2 ist weitestgehend von der dortigen Bebauung umschlossen; eine ungehinderte Schalleinströmung ist hier eigentlich nicht gewährleistet.

Kapitel 3: Lärmmessungen für die ADAC Luftfahrt Technik GmbH

Von den insgesamt fünf Messstationen werden nicht alle für jede Untersuchung vermessen. So werden für die Lärmmessungen zum Werkstattflugbetrieb lediglich die Messstationen 1 bis 4 und für den Werft- und Wartungsbetrieb die Messstationen 2, 3 und 5 vermessen.



Abbildung 3.4: Lage der Messstationen

Die exakten Positionierungen der Messeinrichtungen können der Tabelle 3.1 sowie den Abbildungen im Anhang unter Kapitel A-1 entnommen werden.



Abbildung 3.5: Beispiel des Messaufbaus (hier: Messstation 4)

3.2.5 Untersuchte Luftfahrzeuge

3.2.5.1 BK 117 B - 2



Abbildung 3.6: Die untersuchte BK 117 (D - HBRB)

Allgemeine Angaben:

| | |
|----------------------|---|
| Luftfahrzeug: | MBB – BK 117 B - 2 |
| Hersteller: | Messerschmidt-Bölkow-Blohm, Kawasaki, Heavy Industries, Eurocopter (D,J) |
| Kennzeichen: | D – HBRB |
| Baujahr: | 1983 |
| Antrieb: | 2x AVCO Lycoming1-750 B-1 mit je 700 Wellen-PS |
| Rotor: | 117 – 14 1081 / 117 – 15 1321 |
| Heckrotor: | 117 – 31 7201 |

Angaben zum Luftfahrzeug:

| | | |
|-----------------|--------------------------|------------------------------|
| Abmaße: | Länge über alles [m]: | 13,00 |
| | Rumpflänge [m]: | 9,98 |
| | Höhe über alles [m]: | 3,84 |
| | Breite [m]: | 2,71 |
| | Breite Landewerk [m]: | 2,5 |
| | Kabine (l,b,h) [m]: | 3,12 x 1,70 x 1,27 |
| Massen: | Max. Abfluggewicht [kg]: | 3350 |
| | Leergewicht [kg]: | 1723 |
| | Nutzlast [kg]: | 1670 oder bis zu 11 Personen |
| | Tankinhalt [l]: | 701 |
| Flugleistungen: | Höchstgeschw. [km/h]: | 278 |
| | Reisegeschw. [km/h]: | 250 |
| | Max. Reichweite [km]: | 550 |
| | Dienstgipfelhöhe [km]: | |
| | Steigrate [m/s]: | |

Angaben zum Antrieb:

| | | |
|-------------|--|-----|
| Typ: | 2x AVCO Lycoming1-750 B-1 mit je 700 Wellen-PS | |
| Leistungen: | Startleistung [kW]: | 366 |
| | Dauerleistung [kW]: | 313 |
| | Max. Drehzahl [1/min]: | |
| | Trockengewicht [kg]: | 123 |

Angaben zum Rotor:

| | | |
|---------------|------------------------------|-----|
| Typ: | 117 – 14 1081/ 117 – 15 1321 | |
| Techn. Daten: | Rotordurchmesser [m]: | 11 |
| | Rotordrehzahl [1/min]: | 384 |
| | Blattzahl []: | 4 |

Angaben zum Heckrotor:

| | | |
|---------------|----------------------------|------|
| Typ: | 117 – 31 7201 | |
| Techn. Daten: | Heckrotordurchmesser [m]: | 1,96 |
| | Heckrotordrehzahl [1/min]: | 2169 |
| | Blattzahl []: | 2 |

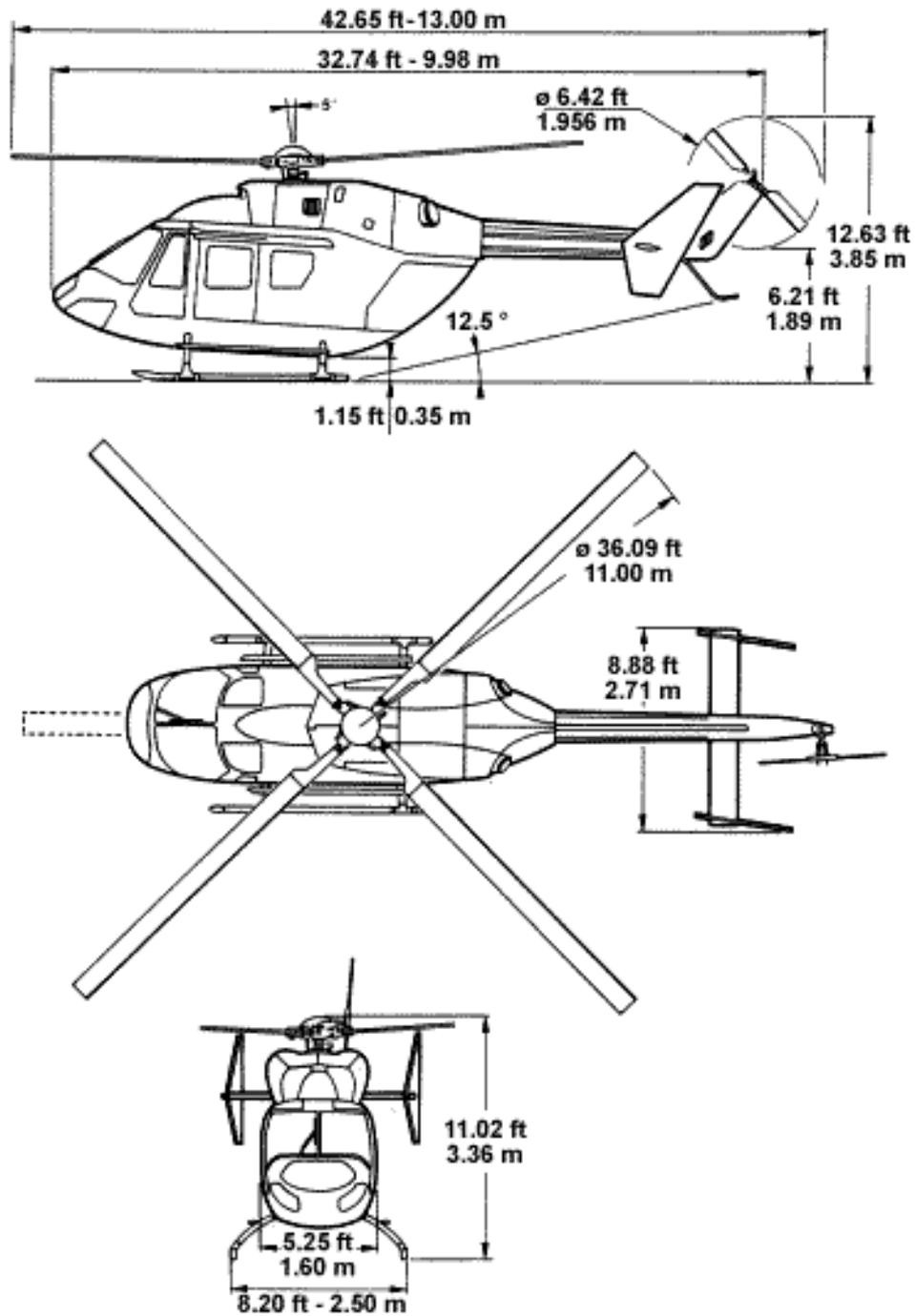
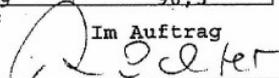


Abbildung 3.7: 3-Seitenansicht der BK 117^[18]

Kapitel 3: Lärmmessungen für die ADAC Luftfahrt Technik GmbH

Nach § 10 Abs. 4 der Luftverkehrs-Zulassungs-Ordnung (LuftVZO) erteilt das Luftfahrt-Bundesamt für in Deutschland registrierte Luftfahrzeuge Lärmzeugnisse, wenn die Einhaltung der Lärmgrenzwerte (§3 Abs. 3 LuftVZO) nach den jeweiligen Verfahren der Lärmschutzforderungen für Luftfahrzeuge (LSL) vom 01.01.1991, ergänzt durch NfL (Nachrichten für Luftfahrer) II – 4/97 vom 16.01.1997, nachgewiesen wurde.^[19]

|  BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND LUFTFAHRT-BUNDESAMT | LÄRMZEUGNIS für 13594 - Hubschrauber (LSL Kapitel VIII und XI) Noise Certificate for Helicopters | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|---|---|--|-------------------|--|--|--|--|----------------------|------|------|------|------|-------------------------|--|------|------|------|--|--|------|------|------|--|--|
| | 1. Staatszugehörigkeits- und Eintragszeichen: D- H T L B | 2. Muster/Baureihe: HBB RK 117 B-2 | 3. Werknummer: 7022 Baujahr: 1983 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4. Dieses Lärmzeugnis ist in Übereinstimmung mit dem Anhang 16 zum Abkommen über die internationale Zivilluftfahrt vom 7. Dezember 1944 sowie dem deutschen Luftverkehrsgesetz und den zu seiner Durchführung erlassenen Rechtsverordnungen ausgestellt. This Noise Certificate is issued pursuant to Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation dated Dec. 7, 1944 and to the German Aeronautics Act and the regulations issued for its implementation. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5. Dieses Lärmzeugnis besitzt nur Gültigkeit, solange die umseitig bestätigten Daten und Betriebsgrenzen keine Änderung erfahren. This Noise Certificate is valid only as long as the data and limitations overleaf will not be modified. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6. Innerhalb der Daten und Betriebsgrenzen, wie umseitig bestätigt, erfüllt das Luftfahrzeug die entsprechenden nationalen Lärmschutzforderungen für Luftfahrzeuge* (LSL). Es entspricht damit auch den Richtlinien und Empfehlungen der internationalen Zivilluftfahrt-Organisation (ICAO) gemäß Annex 16, Volume I Aircraft Noise. Within the data and limitations attested overleaf the aircraft meets the relevant national noise requirements for aircraft* (LSL). It complies also with the standards of ICAO Annex 16, Volume I Aircraft Noise. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7. Lärmgrenzwerte gemäß LSL vom 01. Januar 1991 Kapitel: VIII Noise limits according to Chapter | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8. Lärmdaten (Kapitel VIII: EPNdB, Kapitel XI: dB SEL, Werte nur für Überflug): Noise data (Chapter VIII: EPNdB, Chapter XI: dB SEL, Levels for flyover only): | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>Messpunkt Measurement point</th> <th>Starthöchstmasse max. T/O Mass kg</th> <th>Lärmpegel Noise Level EPNdB/dB SEL</th> <th>90 % Vertrauensbereich 90 % Confidence Level EPNdB/dB SEL</th> <th>Lärmgrenzwert Noise Limit EPNdB/dB SEL</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Start Take-off</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Überflug Fly over</td> <td>3350</td> <td>89,9</td> <td>±0,8</td> <td>95,3</td> </tr> <tr> <td>Landeanflug Approach</td> <td></td> <td>91,3</td> <td>±0,4</td> <td>94,3</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>95,8</td> <td>±0,9</td> <td>96,3</td> </tr> </tbody> </table> | Messpunkt Measurement point | Starthöchstmasse max. T/O Mass kg | Lärmpegel Noise Level EPNdB/dB SEL | 90 % Vertrauensbereich 90 % Confidence Level EPNdB/dB SEL | Lärmgrenzwert Noise Limit EPNdB/dB SEL | Start Take-off | | | | | Überflug Fly over | 3350 | 89,9 | ±0,8 | 95,3 | Landeanflug Approach | | 91,3 | ±0,4 | 94,3 | | | 95,8 | ±0,9 | 96,3 | | |
| Messpunkt Measurement point | Starthöchstmasse max. T/O Mass kg | Lärmpegel Noise Level EPNdB/dB SEL | 90 % Vertrauensbereich 90 % Confidence Level EPNdB/dB SEL | Lärmgrenzwert Noise Limit EPNdB/dB SEL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Start Take-off | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Überflug Fly over | 3350 | 89,9 | ±0,8 | 95,3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Landeanflug Approach | | 91,3 | ±0,4 | 94,3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 95,8 | ±0,9 | 96,3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Datum der Ausstellung: Date of issue Braunschweig, den 11. Dezember 2000 | | Unterschrift: Signature  Im Auftrag | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

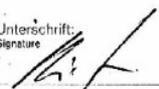
| | |
|---|--|
| Bestätigung über technische Daten und Betriebsgrenzen durch eine nach § 13 oder § 18 LuftGerPV zuständige Stelle Attestation of technical data and limitations of the aircraft by a body competent for inspection according to LuftGerPV 13594 | |
| 1. Motor / Engine a) Muster / Baureihe: 2x Lycoming LTS 101-750 B1 Type / Model b) Höchstzulässige Startleistung / Drehmoment: 2x366 kW/ Entfällt Nm Max. Take-off power/Torque Höchstzulässige Dauerleistung / Drehmoment: 2x313 kW/ Entfällt Nm Max. Continuous power/Torque | |
| 2. Hauptrotor / Mainrotor a) Muster / Baureihe: 117-141081 / 117-151321 Type / Model b) Gemessener Durchmesser: 11,0 m Ø c) Blattzahl: 4 d) Rotordrehzahl: 384 min ⁻¹ Measured diameter Number of blades Rotor RPM | |
| 3. Heckrotor / Tailrotor a) Muster / Baureihe: 117-317201 Type / Model b) Gemessener Durchmesser: 1,956 m Ø c) Blattzahl: 2 d) Rotordrehzahl: 2169 min ⁻¹ Measured diameter Number of blades Rotor RPM | |
| 4. Starthöchstmasse: 3350 kg Max. Take-off mass | |
| 5. Zusätzliche Ausrüstung oder Änderungen für die Übereinstimmung mit den Lärmschutzforderungen: Entfällt Additional Equipment or modifications for the purpose of compliance with noise requirements | |
| 6. Die zum Luftfahrzeug gehörenden Betriebsanweisungen stimmen mit den vorstehenden Angaben überein/nicht überein The operating instructions belonging to the aircraft correspond to the statement above | |
| 7. Das umseitig genannte Luftfahrzeug stimmt mit dem/der zugelassenen Muster/Baureihe/ Einzelstück nach folgendem Kenn-/Datenblatt überein: The overleaf mentioned aircraft is in compliance with the noise certificated type/model/individual airplane as documented in the following Data Sheet | |
| Drehflügel - Kennblatt/Datenblatt Nr.: 3049 Data Sheet No. | Ausgabe Nr.: 5 Issue No. |
| Ort und Datum: Place and Date Donauwörth 08.12.00 | LBA - Anerkennungs - Nr.: LBA - Approval No. LBA.0049 Unterschrift: Signature  |

Abbildung 3.8: Lärmzeugnis der BK 117 B - 2

3.2.5.2 EC 135 P2



Abbildung 3.9: Die untersuchte EC 135 (D - HLDM)

Allgemeine Angaben:

| | |
|----------------------|-----------------------------------|
| Luftfahrzeug: | EC 135 P2 |
| Hersteller: | Eurocopter (D) |
| Kennzeichen: | D – HLDM |
| Baujahr: | 2005 |
| Antrieb: | 2x Pratt & Whitney Canada PW 206B |
| Rotor: | Bearingless, DM-H4/ DM-H3 |
| Heckrotor: | Fenestron, OAF 139 – OAF 095 |

Angaben zum Luftfahrzeug:

| | | |
|-----------------|--------------------------|-------|
| Abmaße: | Länge über alles [m]: | 12,19 |
| | Rumpflänge [m]: | 10,21 |
| | Höhe über alles [m]: | 3,62 |
| | Breite [m]: | 2,65 |
| | Breite Landewerk [m]: | 2 |
| | Kabine (l,b,h) [m]: | |
| Massen: | Max. Abfluggewicht [kg]: | 2835 |
| | Leergewicht [kg]: | 1455 |
| | Nutzlast [kg]: | 1455 |
| | Tankinhalt [l]: | |
| Flugleistungen: | Höchstgeschw. [km/h]: | 259 |
| | Reisegeschw. [km/h]: | 230 |
| | Max. Reichweite [km]: | 635 |
| | Dienstgipfelhöhe [km]: | 6,095 |
| | Steigrate [m/s]: | 7,6 |

Angaben zum Antrieb:

| | | |
|-------------|-----------------------------------|-------|
| Typ: | 2x Pratt & Whitney Canada PW 206B | |
| Leistungen: | Startleistung [kW]: | 321 |
| | Dauerleistung [kW]: | 321 |
| | Max. Drehzahl [1/min]: | 6741 |
| | Trockengewicht [kg]: | 117,3 |

Angaben zum Rotor:

| | | |
|---------------|---------------------------|-------|
| Typ: | Bearingless, DM-H4/ DM-H3 | |
| Techn. Daten: | Rotordurchmesser [m]: | 10,2 |
| | Rotordrehzahl [1/min]: | 395,2 |
| | Blattzahl []: | 4 |

Angaben zum Heckrotor:

| | | |
|---------------|------------------------------|------|
| Typ: | Fenestron, OAF 139 – OAF 095 | |
| Techn. Daten: | Heckrotordurchmesser [m]: | 1,00 |
| | Heckrotordrehzahl [1/min]: | 3584 |
| | Blattzahl []: | 10 |

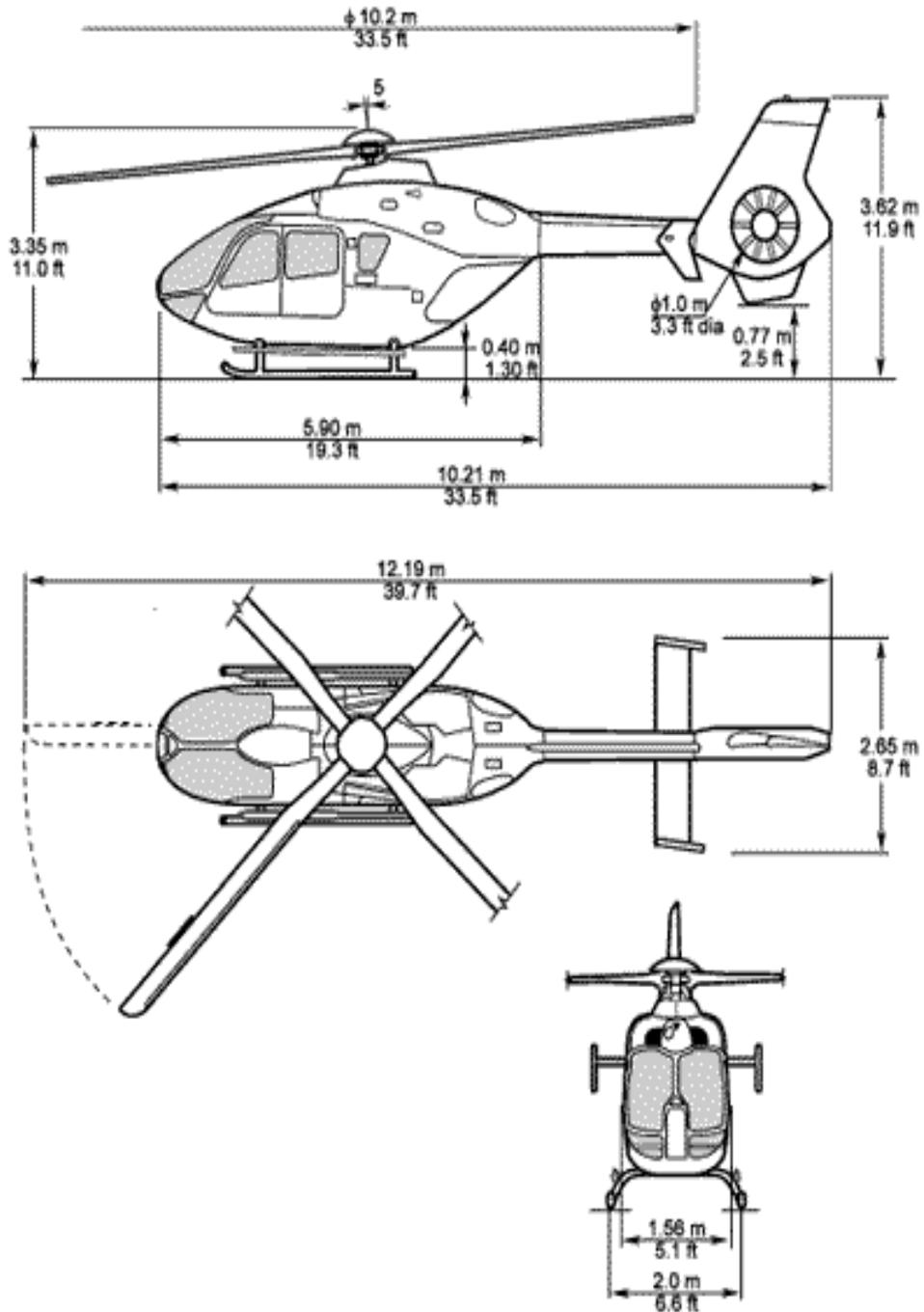
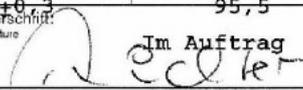


Abbildung 3.10: 3-Seitenansicht der EC 135 ^[18]

|  BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND LUFTFAHRT-BUNDESAMT | | LÄRMZEUGNIS für 16441 - Hubschrauber (LSL Kapitel VIII und XI) Noise Certificate for Helicopters | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|---|--|--|---|----------------------------------|--|--|--|--|-------------------------------------|------|------|------|------|--|--|------|------|------|--|--|------|------|------|--|--|--|
| 1. Staatszugehörigkeits- und Eintragungszeichen: <small>Nationality and registration marks</small> | 2. Muster/Baureihe: <small>Type/Model</small> | 3. Werknummer: <small>Serial Number</small> | 0276 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D-HSAN | EC 135 P2 | Baujahr: <small>Year of manufacturing</small> | 2003 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4. Dieses Lärmzeugnis ist in Übereinstimmung mit dem Anhang 16 zum Abkommen über die internationale Zivilluftfahrt vom 7. Dezember 1944 sowie dem deutschen Luftverkehrsgesetz und den zu seiner Durchführung erlassenen Rechtsverordnungen ausgestellt. <small>This Noise Certificate is issued pursuant to Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation dated Dec. 7, 1944 and to the German Aeronautics Act and the regulations issued for its implementation.</small> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5. Dieses Lärmzeugnis besitzt nur Gültigkeit, solange die umseitig bestätigten Daten und Betriebsgrenzen keine Änderung erfahren. <small>This Noise Certificate is valid only as long as the dates and limitations overleaf will not be modified.</small> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6. Innerhalb der Daten und Betriebsgrenzen, wie umseitig bestätigt, erfüllt das Luftfahrzeug die entsprechenden nationalen „Lärmschutzforderungen für Luftfahrzeuge“ (LSL). Es entspricht damit auch den Richtlinien und Empfehlungen der internationalen Zivilluftfahrt-Organisation (ICAO) gemäß Annex 16, Volume I Aircraft Noise. <small>With the dates and limitations attested overleaf the aircraft meets the relevant national „noise requirements for aircraft“ (LSL). It complies also with the standards of ICAO Annex 16, Volume I Aircraft Noise.</small> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7. Lärmgrenzwerte gemäß LSL vom | 01. Januar 1991 | Kapitel: <small>Chapter</small> | VIII | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8. Lärmdaten (Kapitel VIII: EPNdB, Kapitel XI: dB SEL, Werte nur für Überflug): <small>Noise data (Chapter VIII: EPNdB, Chapter XI: dB SEL, Levels for flyover only):</small> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>Messpunkt <small>Measurement point</small></th> <th>Starthöchstmasse <small>max. T/O Mass</small> kg</th> <th>Lärmpegel <small>Noise Level</small> EPNdB / dB SEL</th> <th>90 % Vertrauensbereich <small>90 % Confidence Level</small> EPNdB / dB SEL</th> <th>Lärmgrenzwert <small>Noise Limit</small> EPNdB / dB SEL</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Start <small>Take-off</small></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Überflug <small>Fly over</small></td> <td>2835</td> <td>88,6</td> <td>±1,3</td> <td>94,5</td> </tr> <tr> <td>Landeanflug <small>Approach</small></td> <td></td> <td>84,0</td> <td>±0,4</td> <td>93,5</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>92,7</td> <td>±0,3</td> <td>95,5</td> </tr> </tbody> </table> | Messpunkt <small>Measurement point</small> | Starthöchstmasse <small>max. T/O Mass</small> kg | Lärmpegel <small>Noise Level</small> EPNdB / dB SEL | 90 % Vertrauensbereich <small>90 % Confidence Level</small> EPNdB / dB SEL | Lärmgrenzwert <small>Noise Limit</small> EPNdB / dB SEL | Start <small>Take-off</small> | | | | | Überflug <small>Fly over</small> | 2835 | 88,6 | ±1,3 | 94,5 | Landeanflug <small>Approach</small> | | 84,0 | ±0,4 | 93,5 | | | 92,7 | ±0,3 | 95,5 | Datum der Ausstellung: <small>Date of issue</small> Braunschweig, den 25. März 2003 | | |
| Messpunkt <small>Measurement point</small> | Starthöchstmasse <small>max. T/O Mass</small> kg | Lärmpegel <small>Noise Level</small> EPNdB / dB SEL | 90 % Vertrauensbereich <small>90 % Confidence Level</small> EPNdB / dB SEL | Lärmgrenzwert <small>Noise Limit</small> EPNdB / dB SEL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Start <small>Take-off</small> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Überflug <small>Fly over</small> | 2835 | 88,6 | ±1,3 | 94,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Landeanflug <small>Approach</small> | | 84,0 | ±0,4 | 93,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 92,7 | ±0,3 | 95,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Unterschrift: <small>Signature</small>  Im Auftrag | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | |
|--|--|--|--|
| Bestätigung über technische Daten und Betriebsgrenzen durch eine nach § 13 oder § 18 LuftGerPV zuständige Stelle <small>Attestation of technical data and limitations of the aircraft by a body competent for inspection according to LuftGerPV</small> | | | |
| 1. Motor / <small>engine</small> a) Muster / Baureihe: 2 x Pratt & Whitney Canada PW 206B2 <small>Type / Model</small> | | | |
| b) Höchstzulässige Startleistung / Drehmoment: 2 x 308 kW / Nm <small>Max. Take-off power/Torque</small> | | c) Höchstzulässige Dauerleistung / Drehmoment: 2 x 283 kW / Nm <small>Max. Continuous power/Torque</small> | |
| 2. Hauptrotor / <small>main rotor</small> a) Muster / Baureihe: Type: Bearingless DM-H4 / DM-H3 <small>Type / Model</small> | | | |
| b) Gemessener Durchmesser: 10,2 m Ø <small>Measured diameter</small> | | c) Blattzahl: 4 <small>Number of blades</small> | |
| | | d) Rotordrehzahl: 395,2 min. ⁻¹ <small>Rotor RPM</small> | |
| 3. Heckrotor / <small>tail rotor</small> a) Muster / Baureihe: Fenestron OAF 139-OAF 095 <small>Type / Model</small> | | | |
| b) Gemessener Durchmesser: 1,0 m Ø <small>Measured diameter</small> | | c) Blattzahl: 10 <small>Number of blades</small> | |
| | | d) Rotordrehzahl: 3584 min. ⁻¹ <small>Rotor RPM</small> | |
| 4. Starthöchstmasse: 2835 kg <small>Max. Take-off mass</small> | | | |
| 5. Zusätzliche Ausrüstung oder Änderungen für die Übereinstimmung mit den Lärmschutzforderungen: <small>Additional equipment or modifications for the purpose of compliance with noise requirements</small> | | | |
| 6. Die zum Luftfahrzeug gehörenden Betriebsanweisungen stimmen mit den vorstehenden Angaben überein/nicht überein <small>The operating instructions belonging to the aircraft correspond to the statement above</small> | | | |
| 7. Das umseitig genannte Luftfahrzeug stimmt mit dem/der zugelassenen Muster/Baureihe/Einzelstück nach folgendem Kenn-/Datenblatt überein: <small>The overleaf mentioned aircraft is in compliance with the noise certified type/model/individual airplane as documented in the following Data Sheet:</small> | | | |
| Drehflügel - Kennblatt/Datenblatt Nr.: 3061 <small>Data Sheet No.</small> | | Ausgabe Nr.: 8 <small>Issue No.</small> | |
| Ort und Datum: <small>Place and Date</small> Donauwörth, den 19.03.2003 | | LBA - Anerkennungs - Nr.: <small>LBA-Approval No.</small> LBA.G.0013 | |
| | | Unterschrift: <small>Signature</small>  | |

Abbildung 3.11: Lärmzeugnis der EC 135 P2

3.3 Werkstattflugbetrieb

3.3.1 Lärmmessung zum Werkstattflugbetrieb

3.3.1.1 Flugroute

Für die Lärmmessung zum Werkstattflugbetrieb werden je Hubschrauber vier Start- und Landeanflüge vermessen. Die Flugbahn, auf der sich der Hubschrauber bewegt, entspricht dabei der offiziellen südlichen Platzrunde des Flughafens Bonn-Hangelar. Normalerweise ist diese Flugroute den motorisierten Tragflächenflugzeugen vorbehalten. Hubschrauber, die den Flughafen anfliegenden, bewegen sich üblicherweise entlang der nördlichen Platzrunde, die auch für den Segelflugbetrieb genutzt wird. Indem die südliche Platzrunde des Flughafens für die Lärmmessungen genutzt wurde, fallen die gemessenen Schallimmissionen in Hangelar größer aus, als sie sich durch den Flugbetrieb tatsächlich ergeben. Bezüglich der Lärmimmission stellt dies für die Anwohner Hangelars folglich den ungünstigsten anzunehmenden Fall dar.

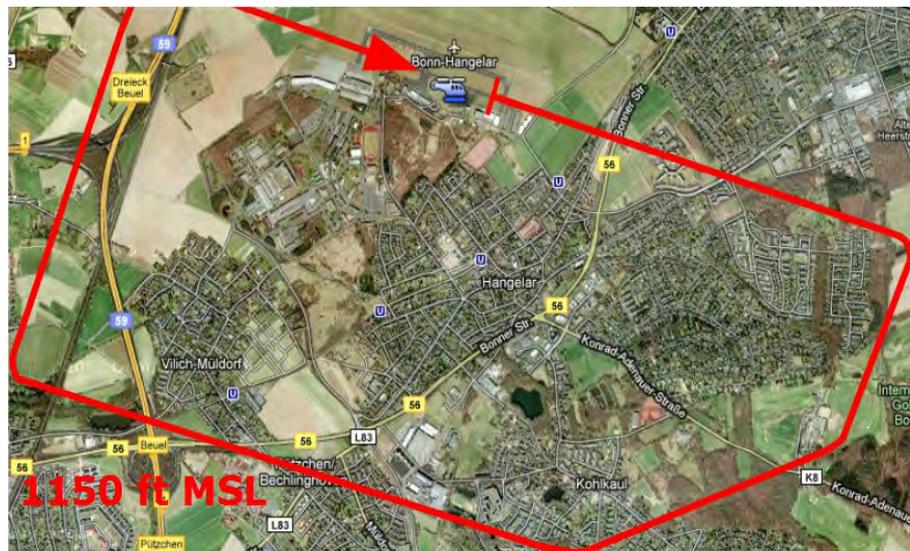


Abbildung 3.12: Südliche Platzrunde und Flugrichtung

Der Pilot startet und landet jeweils auf der RWY 29 und 11 des Flughafens. Nach dem Start wird der Flughafen in süd-östlicher Richtung verlassen. Dabei hält der Pilot die Richtung bis zur äussersten östlichen Ortsgrenze, bevor er nach rechts dreht und über unbewohnte Felder und Wiesen fliegt. Die einzigen direkt überflogenen Wohngebiete auf dieser Route liegen in Kohlkaul, wo der Pilot den eigentlichen Rückflug einleitet und für einen kurzen Abschnitt über Pützling/Bechlinghoven. Von diesen zwei Abschnitten abgesehen verläuft die gesamte südliche Platzrunde über unbewohntem Gebiet und orientiert sich an den vorliegenden Ortsgrenzen. Die Flughöhe der Platzrunde beträgt dabei ca. 950 ft. AGL und ca. 1150 ft. MSL. Zwischen jeder Platzrunde setzt der Pilot mit den Hubschraubern auf dem Werftgelände auf so, dass auch die Abschirmung durch das Werftgebäude auf den ersten und letzten Metern der Flugbahn Berücksichtigung findet. Der Flugbetrieb der ADAC Luftfahrt Technik GmbH macht im Vergleich zum Werft- und Wartungsbetrieb ca. 10% aus.

3.3.1.2 Messstationen

Messungen zur Schallimmission durch den Flugbetrieb werden an den Messstationen 1 bis 4 durchgeführt. Die Position der jeweiligen Messstation und deren Lage zur Flugroute können der Abbildung 3.13 entnommen werden. Die Messstationen 1 bis 3 liegen dabei am Rande der bewohnten Fläche und innerhalb der Platzrunde, wohingegen Messstation 4 sich auf einem Unternehmensparkplatz befindet, der sowohl ausserhalb des Wohngebietes als auch ausserhalb der Platzrunde neben der Bundesstraße 56 liegt. Die Wahl für Messstation 4 begründet sich durch die unmittelbare Nähe zur Flugbahn des Hubschraubers.

-  Messstation 1: Parkplatz Richthofenstr. Ecke Bundesgrenzschutzstr.
-  Messstation 2: Parkplatz gegenüber dem Friedhofsgebäude auf der Fritz-Pulling-Str.
-  Messstation 3: Parsevalstr. Ecke Falderbaumstr.
-  Messstation 4: Parkplatz der Hertz Autovermietung, Kölnstr. 4
-  Lage des Start- und Landeplatzes der ADAC LT GmbH

| | Breite [°] | Länge [°] | Entfernung [m] |
|---------------|------------|-----------|----------------|
| Landeplatz | 50.76710 | 7.16343 | 0 |
| Messstation 1 | 50.46699 | 7.09611 | 638 |
| Messstation 2 | 50.45809 | 7.09861 | 400 |
| Messstation 3 | 50.45795 | 7.10106 | 550 |
| Messstation 4 | 50.46032 | 7.10596 | 924 |

Tabelle 3.2: Lage der Messpunkte zum Flugbetrieb



Abbildung 3.13: Messstationen für den Flugbetrieb und Lage zur Flugroute

3.3.2 Ergebnisse der Messungen zum Werkstattflugbetrieb

Die Abbildungen 3.14 und 3.15 stellen die aufgezeichneten Messschriebe der Lärmmessung zum Werkstattflugbetrieb beispielhaft für alle Messergebnisse dar. Im Anhang unter Kapitel A-2 können alle Messergebnisse aus den Untersuchungen zum Werkstattflugbetrieb eingesehen werden. Der Bereich der weitgehend frei von Störeindrücken ist, ist im Pegel-Zeit-Verlauf farblich unterlegt.

MS 1, EC 135, Start

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ | $L_{A\text{ eq}}$ | $L_{A\text{ eq St}}$ | [dB(A)] |
|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|---------|
| 49,19 | 59,17 | 63,25 | 55,15 | 55,15 | |

Indizes:
Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel
eq: Äquivalter Dauerschallpegel; St: inklusive Störeindrücke



Lärmrichtung: →

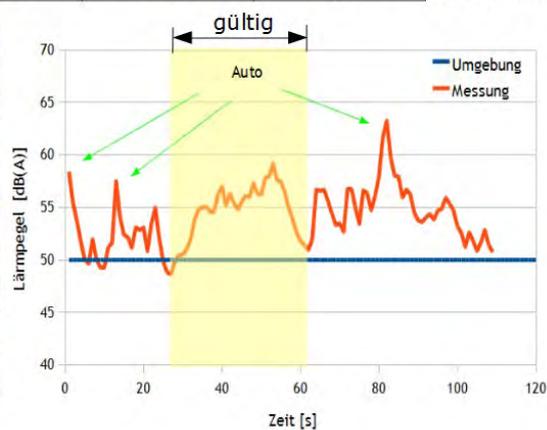


Abbildung 3.14: Messstation 1, EC 135, Start

MS 3, EC 135, Start

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ | $L_{A\text{ eq}}$ | $L_{A\text{ eq St}}$ | [dB(A)] |
|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|---------|
| 48,88 | 61,38 | 64,71 | 55,68 | 56,01 | |

Indizes:
Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel
eq: Äquivalter Dauerschallpegel; St: inklusive Störeindrücke



Lärmrichtung: →

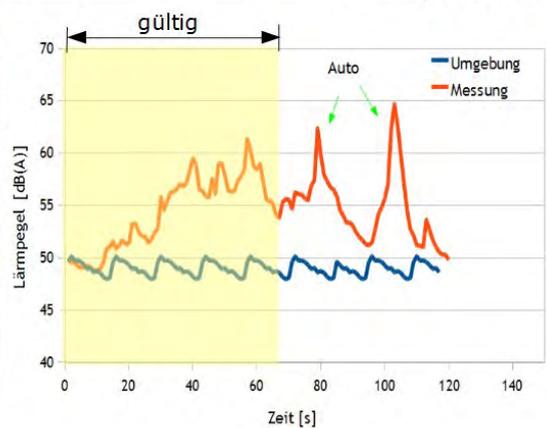


Abbildung 3.15: Messstation 3, EC 135, Start

Allgemein sind die Störeindrücke, die während der Schallmessungen auftraten, aufgrund ihrer Intensität und Häufigkeit nicht zu vernachlässigen. Insgesamt betrachtet war bei keinem der acht Versuche eine störquellenfreie Messung des Hubschrauberschalles möglich. Für eine grobe Zuordnung der Störeinflüsse, die während der Messungen zu verzeichnen waren, sind diese mit der Quelle der sie entstammen vermerkt.

Als Referenz zum Hubschrauberschall wird der jeweils vorliegende Umgebungsschallpegel mit Hilfe einer zweiten (blauen) Linie dargestellt. Die Umgebung wird vor dem Start des Hubschraubers separat mit einer Messzeit von $t_{Umgebung} = 10$ sek festgehalten und zur optischen Gegenüberstellung über die Länge der gesamten Messzeit aus der Vermessung des Flugbetriebes gestreckt. Durch die kurzen und störquellenfreien Umgebungsmessungen ergeben sich relativ geringe Umgebungsschallpegel im Vergleich zum tatsächlich vorliegendem Geräuschfeld. Während der eigentlichen, längeren Fluglärmmessungen fällt auf, dass besonders der Straßenverkehr im Wohngebiet selbst, aber auch der Schienenverkehr einen großen Anteil am vorliegenden Geräuschfeld ausmachen. Des weiteren stammt ein großer Teil des Umgebungsschalles aus dem Nachbarschaftslärm selbst. Der eigentlich interessierende und zu untersuchende Fluglärm durch die An- und Abflüge der Hubschrauber ist dabei nur schwer identifizierbar.

Die Störeindrücke gilt es für eine vernünftige Analyse des eigentlichen Fluglärms so weit wie möglich herauszufiltern. Sie liefern allerdings auch ein aussagekräftiges Bild der vorherrschenden Umgebungsbedingungen. In den Pegel-Zeit-Verläufen der jeweiligen Messsignale finden sich trotz verschiedener Störeindrücke Schalldruckpegelerhöhungen, die eindeutig auf die Hubschrauber der ADAC Luftfahrt Technik GmbH zurückzuführen sind. Im Maximum erreichen diese Pegel kurzzeitig Werte um 62 dB(A). Dem gegenüber stehen jedoch weit größere Schalldruckpegel der Umgebungsgeräusche (insbesondere die des Verkehrslärms). Dabei ist allerdings die zeitliche Dauer der Lärmeinwirkung im Falle eines vorbeifahrenden Kraftfahrzeuges wesentlich kürzer als bei einem vorbeifliegendem Hubschrauber. So wird der Schall eines Kraftfahrzeuges in bebauten Flächen durch Gebäude reflektiert, gebrochen und abgeschirmt. Bei einem Hubschrauber, der sich über den Gebäuden entlang der Platzrunde bewegt und dessen Schallfeld sich von oben kommend über dem Wohngebiet verteilt, kann dieser lärmindernde Effekt nicht zum Tragen kommen. Des weiteren geht aus den Lärmmessungen hervor, dass vom Flughafen startende Propellermaschinen den Schallpegel der Hubschrauber signifikant übersteigen.

Die Ergebnisse aller Messungen sind zusammenfassend in Tabelle 3.3 dargestellt.

Zur Gegenüberstellung sind für jede Messung, sofern es die Messwerte zuliesen, der Umgebungsschallpegel $L_{A\text{ Umgebung}}$, der Spitzenschallpegel $L_{A\text{ Max}}$, und der äquivalente Dauerschallpegel $L_{A\text{ eq}}$ angegeben. Als Beurteilungszeitraum der äquivalenten Dauerschallpegel dient jeweils der störinflussfreie Bereich, der in den Pegel-Zeit-Verläufen auch farblich hinterlegt ist.

Der Indize „St“ an den jeweiligen Größen steht dabei für „Störeinfluss“ und entspricht dem Schalldruckpegel, der sich jeweils unter der Berücksichtigung der gesamten Messzeit ergibt ohne die Filterung der Störeinflüsse. Diese Werte bieten eine zusätzliche Möglichkeit des Vergleichs zwischen flugverkehrsbedingtem und nicht-flugverkehrsbedingtem Lärm.

| MS | Typ | Ereignis | $L_{A\ Umg}$ | $L_{A\ Max}$ | $L_{A\ Max\ St}$ | $L_{A\ eq}$ | $L_{A\ eq\ St}$ |
|----|--------|----------|--------------|--------------|------------------|-------------|-----------------|
| 1 | EC 135 | Start | 49,2 | 59,2 | 63,3 | 55,2 | 55,2 |
| | | Landung | 49,2 | 61,2 | 65,2 | 56,4 | 56,4 |
| | BK 117 | Start | 48,0 | 58,4 | 68,3 | 53,1 | 61,0 |
| | | Landung | 48,0 | - | - | - | - |
| 2 | EC 135 | Start | 47,7 | 50,6 | 63,6 | 48,7 | 52,6 |
| | | Landung | 47,7 | 55,4 | 55,4 | 52,1 | 51,1 |
| | BK 117 | Start | 47,6 | 61,3 | 66,8 | 55,1 | 55,7 |
| | | Landung | 47,6 | 55,6 | 63,1 | 51,3 | 52,5 |
| 3 | EC 135 | Start | 48,9 | 61,4 | 64,7 | 55,7 | 56,0 |
| | | Landung | 48,9 | - | - | - | - |
| | BK 117 | Start | 47,0 | 68,3 | 70,4 | 62,9 | 59,9 |
| | | Landung | 47,0 | - | 68,0 | - | 58,8 |
| 4 | EC 135 | Start | 58,1 | 60,9 | 66,9 | 58,5 | 60,9 |
| | | Landung | 58,1 | - | - | - | - |
| | BK 117 | Start | 59,1 | 79,4 | 84,4 | 82,2 | 79,6 |
| | | Landung | 59,1 | - | - | - | - |

Werte in dB(A)

Tabelle 3.3: Ergebnisse aus dem Werkstattflugbetrieb

Wie bereits erwähnt, ist der Anteil aus dem Verkehrs- und Nachbarschaftslärm während der Messungen nicht zu vernachlässigen. So war bei keinem Versuch eine störquellenfreie Messung möglich. Bedingt ist dies u.a. durch die hohe Taktung mit der Kraft- und auch Schienenfahrzeuge das gemessene Geräuschfeld beeinflussen. Beispielsweise waren zwei von den acht Flugphasen, die mit der EC 135 durchgeführt wurden, aufgrund von Störeindrücken aus dem Flugbetrieb privater Propellerflugzeuge nicht messbar, eine weitere wurde durch die anliegende Straßenbahn gestört. Vier Messungen wurden schließlich durch die Vorbeifahrt mehrerer Kraftfahrzeuge beeinflusst. Die durch den Straßenverkehr beeinträchtigten Messungen machen insgesamt 50% der Gesamtzahl der Messversuche aus, die für die EC 135 durchgeführt wurden. Dabei wurden während dieser vier, maximal zwei Minuten dauernden Messungen, 13 Kraftfahrzeuge verzeichnet. Dies entspräche hochgerechnet in etwa 100 Kraftfahrzeugen pro Stunde und berücksichtigt dabei nur die während der Start- und Landephase der Hubschrauber mit aufgezeichneten Kraftfahrzeuge.

Die Spitzenschallpegel $L_{A\ Max\ St}$ nach Tabelle 3.3 belegen zudem höhere Werte für eben diese Kraftfahrzeuge. So liegt der größte durch den Flugbetrieb bedingte Spitzenpegel bei $L_{A\ Max} = 79,4$ dB(A). Dieser wurde beim direkten Überflug der BK 117 an Messstation 4 (Parkplatz neben der Bundesstraße 56) verzeichnet. Dem gegenüber steht ein Spitzenpegel von $L_{A\ Max\ St} = 84,4$ dB(A), der aus der vorbeiführenden Bundesstraße resultiert. Sieht man von den Ergebnissen der Messstation 4 an der unbewohnten Bundesstraße ab, so liegt im eigentlichen zu untersuchenden Wohngebiet ein durch den Flugbetrieb bedingter maximaler Spitzenschallpegel von $L_{A\ Max} = 68$ dB(A) und ein maximaler Dauerschallpegel von $L_{A\ eq} = 63$ dB(A) vor. Beide Werte werden während des Startvorgangs der BK 117 an Messstation 3 (Parsevalstr. Ecke Falderbaumstr.) gemessen. Dabei liegt auch hier der Spitzenschallpegel aus dem Verkehrslärm mit 70 dB(A) über dem des Flugbetriebes.

Im Vergleich zu den anderen Messstationen ist Messstation 3 nicht durch Bewaldung und/oder Bebauung vor der direkten Schallimmission durch den Flugbetrieb geschützt (siehe Abbildung 3.16 und 3.21). Hier kann schon vom Werftgelände aus, ohne vorheriges Übergehen in die Flugphase, der Hubschrauberschall ungestört über das Sportgelände und das benachbarte freie Feld zur ca. 550 m entfernten Wohnsiedlung strömen.

Der an diesem Messpunkt erfasste fluglärmbedingte äquivalente Dauerschallpegel weist im Vergleich zu den Dauerschallpegeln an anderen Messstationen einen deutlich höheren Wert auf. Abgesehen vom Dauerschallpegel an der Bundesstraße 56, liegt er mit einer Differenz von +7 dB(A) deutlich über den Werten der übrigen Messstationen, welche sich mit +/- 3 dB(A) um einen mittleren Wert von 55 dB(A) bewegen. Hält man die fluglärmbedingten äquivalenten Dauerschallpegel den störquellenfreien Umgebungsschallpegeln gegenüber, so liegen diese im Schnitt 7 bis 8 dB(A) darüber. Berücksichtigt man jedoch alle am Gesamtschallfeld beteiligten Schallquellen mit Ausnahme des Flugbetriebes, so ergeben sich Dauerschallpegel die teilweise größer sind als jene, die sich durch den Flugbetrieb allein ergeben.

Auch die auf den Start der BK 117 folgende 2-Propeller-Maschine, die im Rahmen der Messungen mit aufgezeichnet wurde, erreicht einen äquivalenten Dauerschallpegel von 61 dB(A) und liegt somit 8 dB(A), über dem Wert der startenden BK 117.



Abbildung 3.16: Messaufbau an Messstation 3, die Werft im Hintergrund

Bedenkt man zuletzt, dass, aufgrund der gewählten Flugbahn entlang der südlichen Platzrunde, das Worst-Case-Szenario bezüglich der Lärmimmission für die Ortschaft von Hangelar simuliert wurde, so ist festzuhalten, dass der einfallende gemessene Schall im realen Werkstattflugbetrieb noch geringer ist, als es die oben dargestellten Messungen angeben.

3.4 Werft- und Wartungsbetrieb

3.4.1 Lärmmessung zum Werft- und Wartungsbetrieb

3.4.1.1 Betriebspositionen und -Zustände

Für die Lärmmessung zum Werft- und Wartungsbetrieb der Hubschrauber, werden diese jeweils an vier verschiedenen Positionen auf dem Werftgelände betrieben. Dabei wird der Hubschrauber auf den Positionen 1 bis 3 jeweils 2 min im Idlebetrieb gehalten um anschließend für weitere 2 min in den Vollastbetriebszustand hochzufahren zu werden. An der Position 4 werden die Hubschrauber, ebenfalls für 2 min, jeweils im Hoverbetrieb gehalten.

Die Hubschrauber sind an den Positionen 1 bis 3 frontal und an Position 4 parallel zur Außenwand des Werftgebäudes ausgerichtet. Bei der parallelen Ausrichtung der Hubschrauber, ist die rechte Hubschrauberseite der Werftwand zugewandt, so dass die Hubschrauberfront Richtung Wohngebiet zeigt. Bei diesen Betrachtungen ist darauf zu achten, dass die Außenwand des Werftgebäudes an der sich die Ausrichtung der Hubschrauber orientiert, in einem Winkel von etwa -40° zum horizontalen Breitengrad liegt. Zusätzlich zu den Positionierungen sollen die Auswirkungen der jeweiligen Bodenbeschaffenheit der einzelnen Betriebspositionen, auf das Schallfeld untersucht werden. Diese stellt sich folgendermaßen dar:

- Pos. 1, 2 Asphalt
- Pos. 3 Beton
- Pos. 4 Gras



Abbildung 3.17: Betriebspositionen auf dem Werftgelände

3.4.1.2 Messstationen

Die Auswirkungen der verschiedenen Betriebspositionen und Bodenbeschaffenheiten auf die Schallimmission in Hangelar werden durch Messungen an den Messstationen 2, 3 und 5 untersucht. Diese Messstationen liegen dem Werftgelände am nächsten. Die Entfernung zwischen Messstation und der jeweiligen Betriebsposition der Hubschrauber liegt dabei zwischen 360 und 550 m. Messstation 5, am Ende der Fritz-Pulling-Straße, wurde spontan in die Messungen mit aufgenommen, da die Schalleinwirkung bei Messstation 2 nicht messbar war. Die Wohnbebauung schirmte hier das Messmikrofon vom Schallfeld des Flughafens ab.

-  Messstation 2: Parkplatz gegenüber dem Friedhofsgebäude auf der Fritz-Pulling-Str.
-  Messstation 3: Parsevalstr. Ecke Falderbaumstr.
-  Messstation 5: Parkplatz am Ende der Fritz-Pulling-Straße
-  Lage des Landeplatzes der ADAC LT GmbH

| | Breite [°] | Länge [°] | Entfernung [m] |
|---------------|------------|-----------|----------------|
| Landeplatz | 50.76710 | 7.16343 | 0 |
| Messstation 2 | 50.45809 | 7.09861 | 400 |
| Messstation 3 | 50.45795 | 7.10106 | 550 |
| Messstation 5 | 50.45843 | 7.09929 | 365 |

Tabelle 3.4: Lage der Messpunkte zum Werftbetrieb



Abbildung 3.18: Vermessene Stationen für den Werft- und Wartungsbetrieb

3.4.2 Ergebnisse der Messungen zum Werft- und Wartungsbetrieb

Die Abbildungen 3.19 und 3.20 stellen beispielhaft die aufgezeichneten Messschriebe der Lärmmessungen zum Werft- und Wartungsbetrieb dar. Im Anhang unter Kapitel A-3 können alle Messergebnisse für den Werft- und Wartungsbetrieb eingesehen werden.

MS 2, BK 117, Standbetrieb

Indizes: Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel; St: inkl. Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ |
|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 47,5 | 48,1 | 63,8 |



Lärmrichtung: →

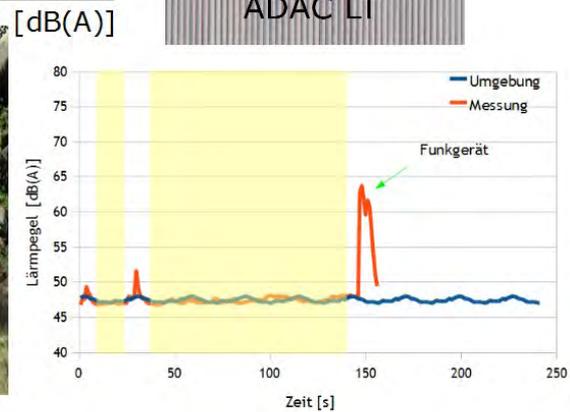
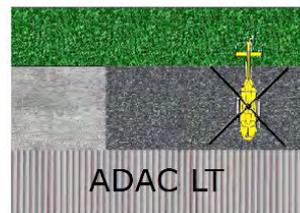


Abbildung 3.19: Messstation 2, BK 117, Betriebspos. 2, Standbetrieb

MS 5, EC 135, Standbetrieb

Indizes: Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel; St: inkl. Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ |
|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 47,4 | 48,8 | 63,3 |



Lärmrichtung: →

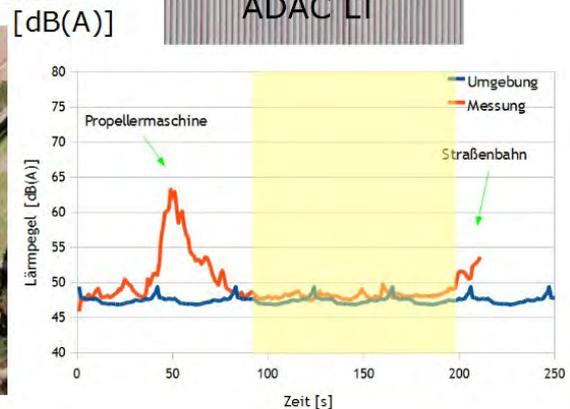


Abbildung 3.20: Messstation 5, EC 135, Betriebspos. 1, Standbetrieb

Der Bereich der weitgehend frei von Störeinflüssen ist, ist wie zuvor bei den Messungen zum Flugbetrieb, wiederum farblich unterlegt. Auch im Rahmen dieser Messungen bestätigt sich zudem, dass eine störquellenfreie Messung bei keinem Versuch möglich ist.

Im Allgemeinen lassen sich die Messergebnisse aus dem Werft- und Wartungsbetrieb mit denen aus dem Werkstattflugbetrieb gut in Einklang bringen. So wird der emittierte Hubschrauberschall vom vorherrschenden Umgebungslärm fast gänzlich überdeckt. Der Schall aus den Standläufen der Hubschrauber, der die Messstationen erreicht wird durch den Straßen- und Schienenverkehr sowie den vorliegenden Nachbarschaftslärm deutlich übertönt. Die Messungen ließen insgesamt erkennen, dass der emittierte Hubschrauberschall nur noch sehr geringe bis gar keine Auswirkungen auf das Gesamtschallspektrum in der umliegenden Wohnsiedlung ausübt.

Die folgende Tabelle trägt die Ergebnisse aus den Messungen zum Werft- und Wartungsbetrieb zusammen:

| MS | Typ | BP | $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ |
|----|--------|----|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 2 | BK 117 | 1 | 47,5 | 47,9 | 68,6 |
| | | 2 | 47,5 | 48,1 | 63,8 |
| | | 3 | 47,5 | 50,6 | 64,6 |
| | | 4 | 47,5 | 47,5 | 63,0 |
| 3 | | 1 | 47,4 | 48,3 | 53,7 |
| | | 2 | 47,4 | 49,0 | 66,0 |
| | | 3 | 47,4 | 48,3 | 69,1 |
| | | 4 | 47,4 | 51,3 | 64,4 |
| 3 | EC 135 | 1 | 48,6 | 48,4 | 63,8 |
| | | 2 | 48,6 | 50,8 | 68,5 |
| | | 3 | 48,6 | 50,7 | 74,5 |
| | | 4 | 48,6 | 50,1 | 68,6 |
| 5 | | 1 | 47,4 | 48,8 | 63,3 |
| | | 2 | 47,4 | 48,8 | 53,3 |
| | | 3 | 47,4 | 48,0 | 54,2 |
| | | 4 | 47,4 | 48,8 | 53,0 |

Werte in dB(A)

Tabelle 3.5: Ergebnisse aus dem Werft- und Wartungsbetrieb

Aufgrund der niedrigen Geräuschimmission, die aus dem Werft- und Wartungsbetrieb resultiert, ist die Ermittlung eines äquivalenten Dauerschallpegels nicht sinnvoll, da sich die Lärmpegel der Schallemissionen nicht von denen der Umgebung absetzen.

Die niedrigen Schalldruckpegel erschweren zudem eine Deutung der Messergebnisse. So mag bei Betrachtung der Tabelle 3.5 der Eindruck erweckt werden, dass der aus dem Werftbetrieb stammende Schalldruckpegel an Messstation 2 steigt, sobald sich der Hubschrauber auf dem Werftgelände von Betriebsposition 1 in Richtung Betriebsposition 3 bewegt. Dies steht jedoch im Gegensatz zu den Hörereignissen des Messteams vor Ort.

Nach Aussagen der Beteiligten, war während der Messungen an Messstation 2, kein vom

Hubschrauberbetrieb stammendes Geräusch zu vernehmen. Auch bei den anderen Messstationen war das Hubschraubergeräusch allenfalls schwach wahrnehmbar.

So war, nach Beurteilung des Messteams, beim Standbetrieb an Position 1 auf dem Werftgelände an den Messstationen 3 und 5 ein schwaches, flatterndes Geräusch, das seiner Charakteristik nach wohl dem Hubschrauber entstammt, zu vernehmen. Allerdings riefen diese Geräusche keine erkennbare Änderung am Gesamtpegel der aufgezeichneten Messung hervor. Da dieses Geräusch dennoch vom Messteam wahrgenommen wird, könnte seine Begründung in der Änderung der vorliegenden Frequenzspektren finden. Dabei werden von dem Hubschrauber möglicherweise gewisse Bereiche im Frequenzband stärker ausgebildet als andere. Diese Anteile könnten in einem Bereich liegen deren Frequenzen durch das menschliche Gehör besser wahrgenommen wird. Dadurch kann ein Schallsignal wahrgenommen werden ohne, dass sich Änderung am physikalischen Gesamtschalldruckpegel bemerkbar macht.

Beim Betrieb des Hubschraubers an Position 2 und 3 auf dem Werftgelände verlor sich schließlich dieses, durch die Beteiligten an den Messstationen wahrgenommene Geräusche wieder.

Entgegen diesen Aussagen lassen sich jedoch bei Betrachtung der Messwerte bei einer steigenden Abschirmung durch das Werftgebäude steigende Spitzenschalldruckpegel an Messstation 2 ausmachen. Unter Berücksichtigung der Aussagen der Mitglieder des Messteams, lassen sich diese Werte am ehesten durch kleinere Störeinflüsse wie Windböen oder Blätterrauschen erklären. An dieser Stelle scheinen die subjektiven Wahrnehmungen der Beteiligten aufschlussreicher zu sein als die Messergebnisse.

Während des Hubschrauberbetriebes lies sich an den vermessenen Immissionsorten lediglich ein schwaches Ansteigen des Geräuschpegels beim Übersetzen des Hubschraubers von der einen zur nächsten Position vernehmen. Dies entspricht den Momenten an denen der Pilot über dem Werftgelände schwebte und der Hubschrauber sich nicht mehr im Stand befand. So sind während der Messungen die einzigen vom Hubschrauber ausgehenden und wirklich messbaren Geräusche, zu vernehmen, wenn sich dieser an Betriebsposition 4 im Schwebезustand befindet bzw. auf dem Werftgelände zu einer anderen Position übersetzt.

Die Spitzenschallpegel die während der Messungen im Allgemeinen auftreten liegen maximal 2 dB(A) über dem Umgebungspegel. Da diese Pegel sind jeweils nur von kurzer Dauer sind, ist davon auszugehen, dass sie nicht vom stationären Schallfeld des Hubschraubers stammen, sondern ihren Ursprung in Windstößen und anderen äußeren Störeinflüssen aus der Umgebung der Messeinrichtung haben. Dies würde auch mit den oben beschriebenen Aussagen des Messteams übereinstimmen.

Der während der Lärmmessungen zum Werft- und Wartungsbetrieb maximal auftretende Spitzenpegel beträgt 51 dB(A) und wurde während des Hoverbetriebes der BK 117 an Betriebsposition 4 an Messstation 3 gemessen. An Messstation 3 traten bereits bei den Messungen zum Werkstattflugbetrieb die größten gemessenen Schalldruckpegel auf. Ursächlich hierfür dürfte wiederum das offenliegende Terrain zwischen Messstation und Werft sein, das eine ungehinderte und geradlinige Ausbreitung des Schallfeldes zulässt (siehe Abbildung 3.21). Unterstützt wird dies zudem durch die größere Distanz zwischen Betriebsposition 4 und dem Werftgebäude, die eine wirkungsvolle Abschirmung durch das Gebäude nicht mehr gewährleistet. Durch das Hovern kann zusätzlich ein weiterer Teil des vom Hubschrauber emittierten Schalles über das Werftgebäude

hinweg strömen. Der Abschirmeffekt des Werftgebäudes sinkt so weiter.



Abbildung 3.21: Offenes Gelände zur Messstation 3

Zuletzt ist noch zu beobachten, dass die Spitzenpegel, die sich aus den aufgetretenen Störeinflüssen ergeben, deutlich über denen liegen, die aus dem Werft- und Wartungsbetrieb resultieren. Sie erreichen maximale Spitzenpegel von bis zu 74 dB(A) und übertreffen somit den Spitzenpegel des Werft- und Wartungsbetriebs um mehr als 20 dB(A). Dies entspricht der Auswertung der Messdaten zum Flugbetrieb.

3.5 Emissionsspektrum der Hubschrauber

3.5.1 Lärmmessungen zum Emissionsspektrum der Hubschrauber

3.5.1.1 Betriebszustände

Die Positionierung und Ausrichtung der Hubschrauber bei deren akustischer Vermessung entspricht annähernd jener aus der Werft- und Wartungsbetriebsmessung für die Positionen 1 und 2. Die Hubschrauber werden nacheinander an acht Punkten rundum vermessen. Dabei werden alle Messpunkte einmal im Idle- und einmal im Volllastbetriebszustand untersucht.

3.5.1.2 Messpunkte

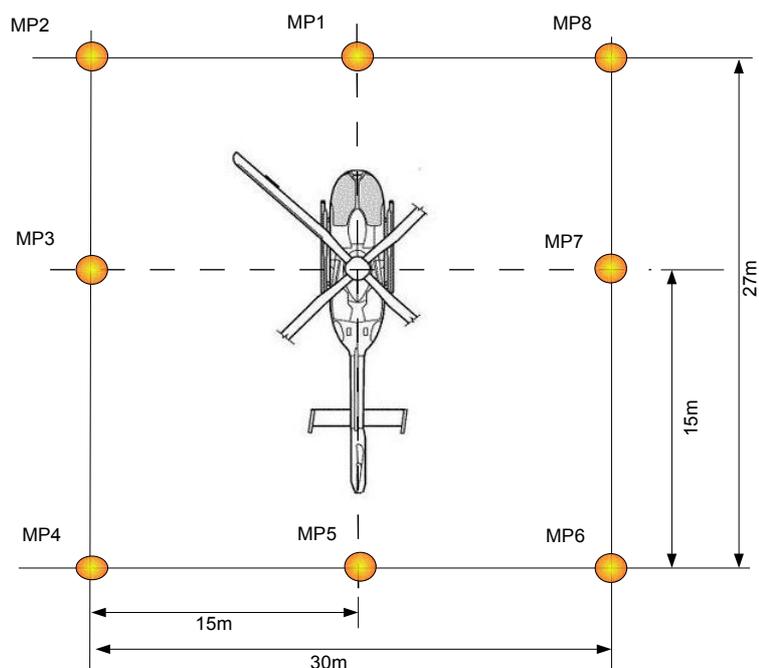


Abbildung 3.22: Lage der Messpunkte für die Hubschraubervermessung

Als Bezugspunkt für die Lage der Messpunkte dient jeweils die Rotorachse der Hubschrauber. Seitlich vom und hinter dem Hubschrauber wird dabei ein Sicherheitsabstand von je 15 m eingehalten in dem die Messmikrofone platziert werden. Aufgrund der Platzbeschränkung durch das Werftgebäude an der Front des Hubschraubers, wird der vordere Abstand der Mikrofone, zur Rotorachse, auf 12 m verkürzt. Dadurch ergibt sich für die Messpunkte 2 und 6 ein Winkel von $51,34^\circ$ zur Hubschrauberlängsachse.

3.5.2 Meßergebnisse aus der Hubschraubervermessung

3.5.2.1 Schalldruckpegel

An den Messpunkten werden bei der Hubschraubervermessung folgende Schalldruckpegel verzeichnet:

| Messpunkt | BK 117 | | EC 135 | |
|-----------|--------|---------|--------|---------|
| | Idle | Vollast | Idle | Vollast |
| 1 | 86,6 | 97,3 | 86,8 | 93,4 |
| 2 | 84,1 | 94,3 | 85,3 | 89,2 |
| 3 | 86,9 | 97,4 | 87,9 | 92,4 |
| 4 | 84,9 | 95,0 | 83,3 | 89,7 |
| 5 | 85,3 | 98,7 | 87,3 | 92,0 |
| 6 | 83,9 | 98,8 | 85,1 | 90,2 |
| 7 | 87,3 | 103,0 | 90,6 | 95,7 |
| 8 | 84,5 | 97,1 | 86,8 | 92,0 |

Tabelle 3.6: Gemessene Schalldruckpegel in dB(A)

Zur Bestimmung der emittierten Schalldruckpegel an der Rotorachse muss für die gemessenen Schalldruckpegel eine Abstandskorrektur durchgeführt werden. Dabei wird vereinfacht angenommen, dass die Schallquelle des Hubschraubers einer Punktschallquelle bzw. einem Monopol entspricht. Bei Schallquellen mit Monopolcharakter breitet sich der Schall entsprechend Abbildung 3.23 nach allen Seiten hin auf einer Kugeloberfläche aus. Bei Zugrundelegung des Energieprinzips muss durch jede beliebige, die Schallquelle ganz umschließende Hüllfläche, die gleiche akustische Leistung hindurchtreten. Folglich bleibt auf jeder dieser Kugeloberflächen, unabhängig vom Radius, die akustische Leistung konstant. Mit ρ als Dichte der Luft und c als Schallgeschwindigkeit ergibt sich die akustische Leistung auf einer Kugeloberfläche zu

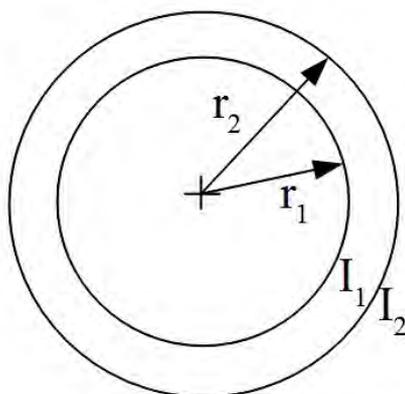


Abbildung 3.23: Monopolcharakteristik

$$P_{Ak} = \frac{p^2}{\rho c} \cdot 4\pi r^2 = konst. \quad (3.1)$$

Mit zunehmender Entfernung vom Ursprung bzw. zunehmendem Radius der Kugeloberfläche, sinkt auch die Intensität des Schallfeldes. Die Schallintensität I beschreibt den Quotienten aus der akustischen Leistung und der Fläche über die sie sich verteilt.

$$I = \frac{P_{Ak}}{A} = \frac{P_{Ak}}{4\pi r^2} \quad (3.2)$$

Aus den Gleichungen 3.1 und 3.2 ergibt sich bei einer konstanten Schallleistung:

$$P_{Ak1} = P_{Ak2}$$

$$4\pi r_1^2 \cdot I_1 = 4\pi r_2^2 \cdot I_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} = \frac{p_1^2}{p_2^2}$$

$$\Rightarrow p \sim \frac{1}{r}$$

Damit verhält sich der Schalldruck bei Annahme eines Monopolcharakters umgekehrt proportional zum Abstand zur Schallquelle. Dadurch kann der Schalldruckpegel aus dem Verhältnis der Abstände zueinander ermittelt werden. Ohne Berücksichtigung der atmosphärischen Dämpfung, aufgrund der kurzen Abstände, geschieht dies nach Gleichung 2.4 mit

$$\Delta L = 20 \cdot \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (3.3)$$

bzw.

$$L_{emittiert} = L_{gemessen} + 20 \cdot \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (3.4)$$

Dabei entspricht der Abstand r_2 der Distanz vom Bezugspunkt an der Rotorachse zum Messmikrofon und r_1 dem Bezugswert des Pegels mit der Größe 1 m. Die Abstände sind nicht für alle Messpunkte gleich groß, sondern verhalten sich aufgrund der gegebenen Geometrie wie folgt:

| MP | Abstand [m] | MP | Abstand [m] |
|------|-------------|------|-------------|
| MP 1 | 12,0 | MP 5 | 15,0 |
| MP 2 | 19,2 | MP 6 | 21,2 |
| MP 3 | 15,0 | MP 7 | 15,0 |
| MP 4 | 21,2 | MP 8 | 19,2 |

Tabelle 3.7: Distanz Mikrofon - Rotorachse

Nach der Abstandskorrektur gemäß Gleichung 3.4, ergeben sich aus den jeweils gemessenen Schalldruckpegeln der einzelnen Messpunkte die tatsächlich emittierten Schalldruckpegel während des Hubschrauberbetriebes in dB(A).

Diese Emissionsschalldruckpegel liegen nicht an der Position vor, an der sie gemessen werden, sondern zeigen von der Rotorachse ausgehend lediglich in deren Richtung. Die Größe der emittierten Schalldruckpegel sind je nach Hubschrauber, Betriebszustand und Ausbreitungsrichtung in Tabelle 3.8 zusammengefasst.

| Richtung | BK 117 | | EC 135 | |
|----------|--------|----------|--------|----------|
| | Idle | Volllast | Idle | Volllast |
| MP 1 | 108,2 | 118,9 | 108,4 | 115,0 |
| MP 2 | 109,7 | 120,0 | 111,0 | 114,9 |
| MP 3 | 110,5 | 120,9 | 111,4 | 116,0 |
| MP 4 | 111,4 | 121,6 | 109,9 | 116,3 |
| MP 5 | 108,8 | 122,3 | 110,8 | 115,6 |
| MP 6 | 110,4 | 125,4 | 111,6 | 116,7 |
| MP 7 | 110,8 | 126,5 | 114,1 | 119,3 |
| MP 8 | 110,2 | 122,7 | 112,5 | 117,7 |

Tabelle 3.8: Emittierte Schalldruckpegel in dB(A)

Die Abbildungen 3.24 und 3.25 stellen die Pegel-Zeit-Verläufe der emittierten Schalldruckpegel bei den Betriebszuständen Idle (durchgängig) und Volllast (gestrichelt) für beide Hubschrauber dar.

Zum Vergleich der emittierten Schallfelder untereinander lassen sich auch die Differenzen bei den jeweiligen Betriebszuständen sowie den jeweiligen Hubschraubertypen bestimmen. Dabei wird beim Vergleich der Betriebszustände der Schalldruckpegel des Idlebetriebszustands von dem des Volllastbetriebszustands subtrahiert. Zum Vergleich der Hubschrauber untereinander wird die Differenz der jeweiligen Schalldruckpegel durch die Subtraktion des EC 135-Schalldruckpegels vom BK 117-Schalldruckpegel bestimmt. Dabei gilt es das jeweilige Vorzeichen zu beachten, das gemäß dieser Definition, negativ ist, wenn der Schalldruckpegel der EC 135 größer ist als der Schalldruckpegel der BK 117.

$$\Delta L_{\text{Hubschrauber}} = L_{\text{Volllast}} - L_{\text{Idle}} \quad (3.5)$$

$$\Delta L_{\text{Betriebszustand}} = L_{\text{BK 117}} - L_{\text{EC 135}} \quad (3.6)$$

| Richtung | Volllast – Idle | | BK 117 – EC 135 | |
|----------|-----------------|--------|-----------------|----------|
| | BK 117 | EC 135 | Idle | Volllast |
| MP 1 | 10,6 | 6,7 | -0,1 | 3,8 |
| MP 2 | 10,3 | 3,9 | -1,3 | 5,1 |
| MP 3 | 10,5 | 4,6 | -1,0 | 5,0 |
| MP 4 | 10,2 | 6,4 | 1,5 | 5,3 |
| MP 5 | 13,4 | 4,8 | -1,9 | 6,7 |
| MP 6 | 14,9 | 5,1 | -1,2 | 8,6 |
| MP 7 | 15,7 | 5,1 | -3,3 | 7,3 |
| MP 8 | 12,6 | 5,3 | -2,3 | 5,0 |

Tabelle 3.9: Differenzwerte der emittierten Schalldruckpegel in dB(A)

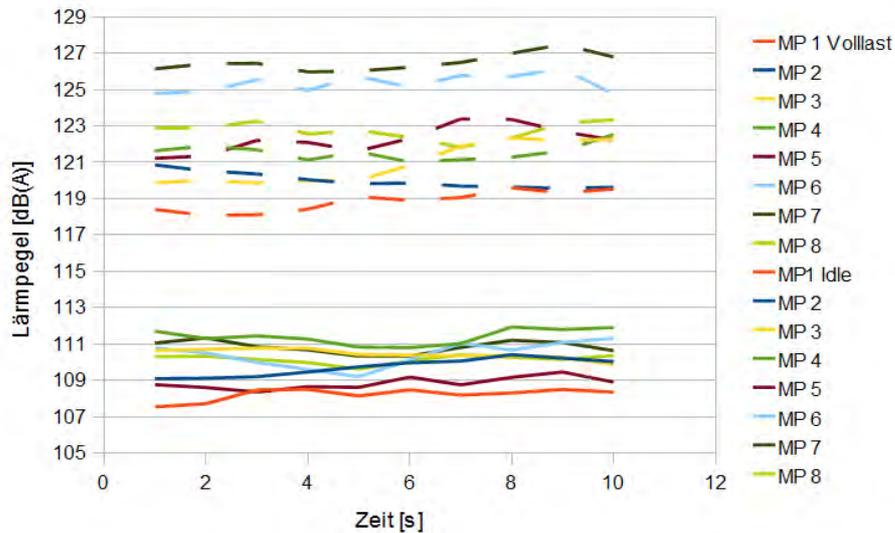


Abbildung 3.24: Emittierte Schalldruckpegel der BK 117

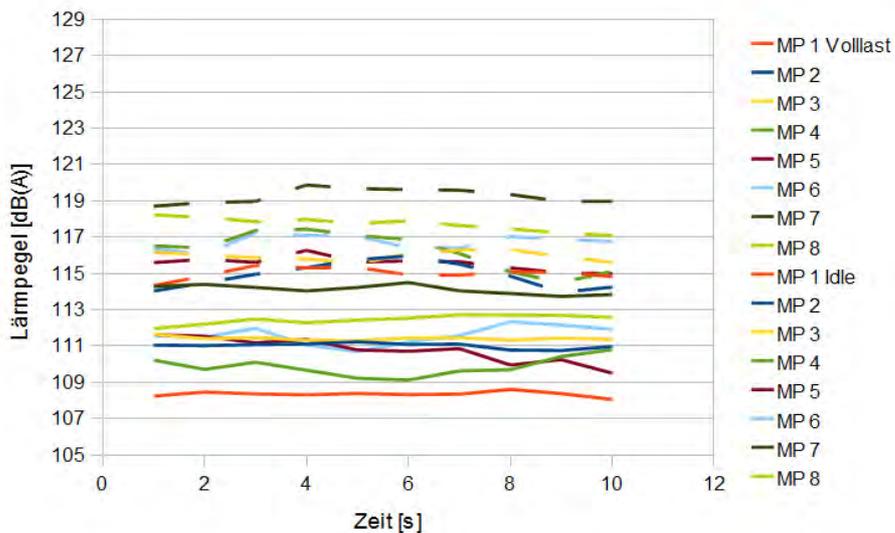


Abbildung 3.25: Emittierte Schalldruckpegel der EC 135

Für beide Hubschrauber liegt im Idlebetriebszustand der Emissionsschalldruckpegel in guter Näherung bei $L_{Idle} \approx 110$ dB(A). Bei Volllastbetrieb steigt der Schalldruckpegel der BK 117 auf $L_{A\ Voll. BK 117} = 125$ dB(A) an. Er steigt somit deutlich höher als der Schalldruckpegel der EC 135. So steigt der Schalldruckpegel der EC 135 bei Volllast lediglich um 5 dB(A) auf $L_{A\ Voll. EC 135} = 115$ dB(A). Dies entspricht in etwa einer Zunahme der akustischen Leistung um den Faktor 32 für die BK 117 und um den Faktor 3 für die EC 135. Siehe dazu Tabelle 3.10.

| Typ | L_{idle} [dB(A)] | $L_{voll.}$ [dB(A)] | ΔL [dB(A)] | P_{Ak2}/P_{Ak1} [1] |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|
| BK 117 | 110 | 125 | 15 | ≈ 32 |
| EC 135 | 110 | 115 | 5 | ≈ 3 |

Tabelle 3.10: Änderung des Schalldruckpegels

Des weiteren weisen die Schalldruckpegel auf der rechten Hubschrauberseite höhere Werte auf als auf der linken. Auch dieser Effekt ist bei der BK 117 stärker zu beobachten als bei der EC 135. Bei der EC 135 liegt der Unterschied von der linken zur rechten Hubschrauberseite bei 3 dB(A); bei der BK 117 beträgt diese Differenz hingegen 7 dB(A). Für beide Hubschrauber liegen die maximalen Werte bei Messpunkt 7 an der rechten Hubschrauberseite. Eine Ausnahme stellt die BK 117 im Idlebetriebszustand dar. Hier ist der maximale emittierte Schalldruckpegel auf der linken hinteren Seite zu verzeichnen. Dort befindet sich der Heckrotor der BK 117. Eventuelle Einflüsse aus dem Heckrotor müssten für genauere Aussagen zu dieser Erkenntnis weiter untersucht werden.

Zudem sind eventuell auftretende Interferenzerscheinungen durch Reflexionen, bei den Messungen an den Punkten 1, 2 und 8, durch die relativ nahe Positionierung der Mikrofone zur Außenwand des Werftgebäudes nicht auszuschließen.

3.5.2.2 Richtcharakteristik

Mit der Ermittlung der emittierten Schalldruckpegel nach Tabelle 3.8 ergibt sich die Möglichkeit zur Erstellung von Richtcharakteristiken. Diese beschreiben mittels Polarkoordinaten die Winkelabhängigkeit der Stärke der emittierten Schalldruckpegel und veranschaulichen diese in Polardiagrammen. Diese Polardiagramme bieten sich sowohl für die verschiedenen Hubschraubertypen als auch für die verschiedenen Betriebszustände an.

Abbildung 3.26 stellt die Richtcharakteristik am Beispiel der BK 117 sowohl für den Idle- als auch für den Volllastbetriebszustand dar. Die Drehrichtung des Hauptrotors ist mit einem orangen Pfeil kenntlich gemacht. Die Zunahme des Schalldruckpegels von den einen in den andere Betriebszustand ist dabei sehr deutlich zu erkennen. Diese Schalldruckpegeländerungen vom Idle- zum Volllastbetriebszustand sind in Abbildung 3.27 für beide Hubschrauber dargestellt. Dabei lässt sich ein starkes Ansteigen des emittierten Schalles auf der rechten Hubschrauberseite der zuvor betrachteten BK 117 erkennen, das eine ausgeprägte Asymmetrie der Richtcharakteristik hervorruft. Hingegen fällt der Zuwachs des emittierten Schallesfeldes bei der EC 135 weit geringer und symmetrischer aus.

Zu beachten ist bei den Diagrammen jedoch, dass der lineare Verlauf zwischen den einzelnen Messpunkten zur Bestimmung der Zwischenwerte nicht herangezogen werden darf. Zur Verfeinerung dieser Verläufe müssten mehr Messpunkte einbezogen werden.

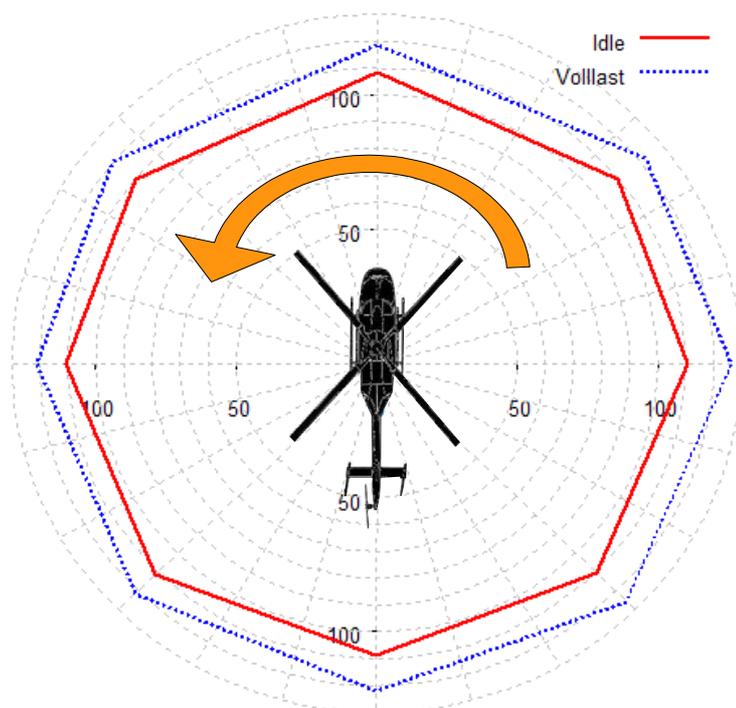


Abbildung 3.26: Richtwirkung der BK 117

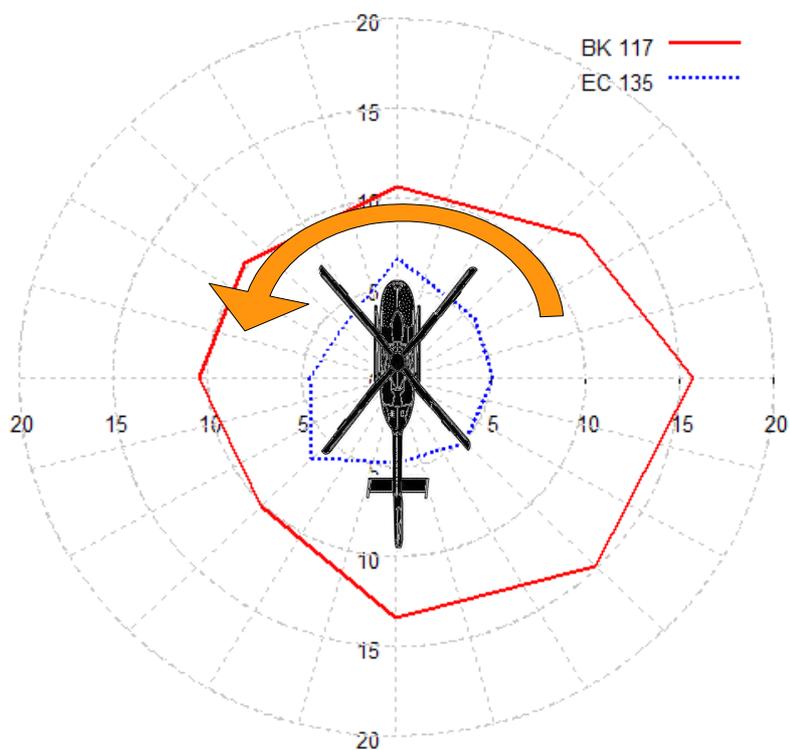


Abbildung 3.27: Differenz von Vollast zu Idle

Ein eventueller Einfluss aus dem Heckrotor, der diesen Anstieg auf der rechten Hubschrauberseite

möglicherweise begründet, wurde oben bereits erwähnt.

Mögliche Ursachen für diesen Effekt, könnten auch in Verbindung mit der Drehrichtung des Hauptrotors liegen. So ist nicht auszuschließen, dass die vom Heckrotor ausgehenden Schallfelder durch die Rotation des Hauptrotors zur rechten Seite hin mitgetragen werden. Hier spielt zudem die Durchströmrichtung des Heckrotors eine Rolle. Um diese zu bestimmen müsste die Drehrichtung des Heckrotors berücksichtigt werden, sowie dessen Auslegung und Einbaulage. So wäre etwa in Rechnung zu stellen, ob es sich um einen Zug- oder Druckpropeller handelt und wie sich dessen Ausrichtung in das Seitenleitwerk gestaltet.

Eine vom Heckrotor unabhängige Erklärung wäre, dass entsprechend der Drehrichtung des Hauptrotors ein instationärer Strömungsvorgang an der linken hinteren Rumpfseite hervorgerufen wird, bei dem sich das Luftvolumen zwischen dem Rumpf und dem sich herandrehenden Rotorblatt stark verdichtet. Dies hätte zur Folge, dass bei jedem Blatt eine Druckwelle durch die erhöhte Kompression auftritt, welche sich in die Richtung ausbreitet, in der die Verdichtung stattfindet. Bei einem links drehenden Hauptrotor läge die Ausbreitung dieser Stoßwelle entsprechend auf der rechten Hubschrauberseite.

Bei allen genannten Möglichkeiten handelt es sich jedoch lediglich um Spekulationen bzw. Theorien, deren Überprüfung weiterer Untersuchungen bedürfte.

Alle Richtcharakteristiken können dem Kapitel A-4 im Anhang entnommen werden.

3.5.2.3 Spektralanalyse

Ein weiterer Aspekt neben der Betrachtung der Richtcharakteristik ist die Untersuchung der vorliegenden Frequenzspektren. Moderne Messtechniken ermöglichen es die Zusammensetzung des Gesamtschalldruckpegels in dessen separate frequenzanteilige Schalldruckpegel zu zerlegen. Dies gestattet Rückschlüsse auf die dominierenden Frequenzen des Schallfeldes.

Zur Bestimmung der Frequenzspektren werden für die Messungen bei der ADAC Luftfahrt Technik GmbH sogenannte Terzfilter verwendet. Diese Filter gehören zur Gruppe der Bandpaßfilter und besitzen einen definierten Durchlaßbereich. Dabei ändert sich der Durchlaßbereich dieser Filter mit der Mittenfrequenz f_m und ist durch die obere und untere Grenzfrequenz f_o und f_u definiert. Die Mittenfrequenz ergibt sich aus dem geometrischem Mittel der entsprechenden Grenzfrequenzen.

$$f_m = \sqrt{f_o \cdot f_u} \quad (3.7)$$

Die Filter ermöglichen eine starke Selektion der einzelnen Frequenzanteile durch mehr oder minder starke Dämpfung der benachbarten Bereiche um die Mittenfrequenz. Bei der Mittenfrequenz selbst beträgt die Dämpfung des Filters gleich 0 dB.

Gemäß Definition entspricht eine Oktave einer Verdoppelung der Frequenz. Eine Oktave besitzt also das Verhältnis $f_o / f_u = 2$. Damit liegen die oberen Grenzfrequenzen für Oktaven bei $f_o \approx 1,42 f_m$ und die unteren bei $f_u \approx 0,72 f_m$. Eine Oktave setzt sich aus 3 Terzen zusammen. Daraus ergibt sich:

$$\left(\frac{f_o}{f_u}\right)_{Terz} = \left(\frac{f_o}{f_u}\right)_{Okt.}^{1/3} = \sqrt[3]{2} = 1,26 \quad (3.8)$$

Die oberen und unteren Grenzfrequenzen betragen demzufolge bei einem Terzfilter $f_o \approx 1,22 f_m$ und $f_u \approx 0,89 f_m$. Für die Bandbreite B des Terzfilters ergibt sich somit ungefähr ein Bereich von $0,23 f_m$.

Die Mittenfrequenzen des Filters entsprechen den ISO-Empfehlungen. Damit genügen die Durchlaßbereiche des verwendeten Terzfilters den Anforderungen der *American Standard Association* (ASA) und der *International Electrotechnical Commission* (IEC).

Anzumerken ist, dass bei der Bestimmung der Frequenzspektren nicht die Emissionsschalldruckpegel herangezogen werden, sondern auf den tatsächlich, an den Messpunkten vorliegenden und gemessenen Schalldruckpegel zurückgegriffen wird.

Die Untersuchung der Frequenzspektren ergibt für beide Hubschrauber in beiden Betriebszuständen folgende Wertetabelle:

| Frequenz [Hz] | Teilschalldruckpegel [dB(A)] | | | |
|------------------|------------------------------|---------|--------|---------|
| | BK 117 | | EC 135 | |
| | Idle | Vollast | Idle | Vollast |
| 40 | 35,7 | 42,5 | 38,5 | 34,5 |
| 50 | 45,4 | 62,2 | 39,2 | 60,2 |
| 63 | 47,6 | 63,6 | 45,4 | 54,3 |
| 80 | 53,4 | 65,9 | 55,2 | 60,6 |
| 100 | 58,1 | 67,0 | 56,4 | 63,6 |
| 125 | 59,4 | 71,2 | 56,2 | 63,0 |
| 160 | 61,9 | 73,7 | 58,9 | 64,7 |
| 200 | 65,1 | 77,0 | 61,8 | 68,7 |
| 250 | 66,3 | 78,0 | 65,8 | 71,6 |
| 315 | 68,5 | 80,4 | 68,0 | 74,2 |
| 400 | 71,3 | 84,2 | 70,5 | 76,9 |
| 500 | 73,8 | 87,1 | 71,8 | 80,0 |
| 630 | 75,2 | 87,4 | 73,3 | 80,3 |
| 800 | 75,6 | 86,6 | 74,1 | 81,3 |
| 1000 | 75,6 | 87,7 | 75,3 | 81,9 |
| 1250 | 75,6 | 87,6 | 75,4 | 81,9 |
| 1600 | 75,3 | 87,7 | 76,9 | 81,8 |
| 2000 | 74,2 | 87,9 | 76,5 | 82,1 |
| 2500 | 73,4 | 86,6 | 74,3 | 81,9 |
| 3150 | 72,1 | 84,9 | 74,9 | 79,7 |
| 4000 | 70,8 | 82,6 | 76,6 | 77,3 |
| 5000 | 70,5 | 79,9 | 77,1 | 76,3 |
| 6300 | 69,5 | 77,7 | 73,8 | 74,5 |
| 8000 | 67,1 | 74,4 | 70,3 | 71,5 |
| 10000 | 64,8 | 71,1 | 66,2 | 68,9 |

Tabelle 3.11: Emittierte Frequenzspektren

Die Abbildungen 3.28 und 3.29 veranschaulichen die vorliegenden Terzbandspektren am Beispiel der EC 135 und der BK 117 an Messpunkt 5 in beiden Betriebszuständen. Messpunkt 5 befindet sich am Heck des Hubschraubers. Bei Betrachtung der Differenzen die sich durch den Übergang vom Idlebetriebszustand in den Volllastbetriebszustand ergeben wird der Unterschied in der Pegelzunahme zwischen der EC 135 und der BK 117 nochmals verdeutlicht.

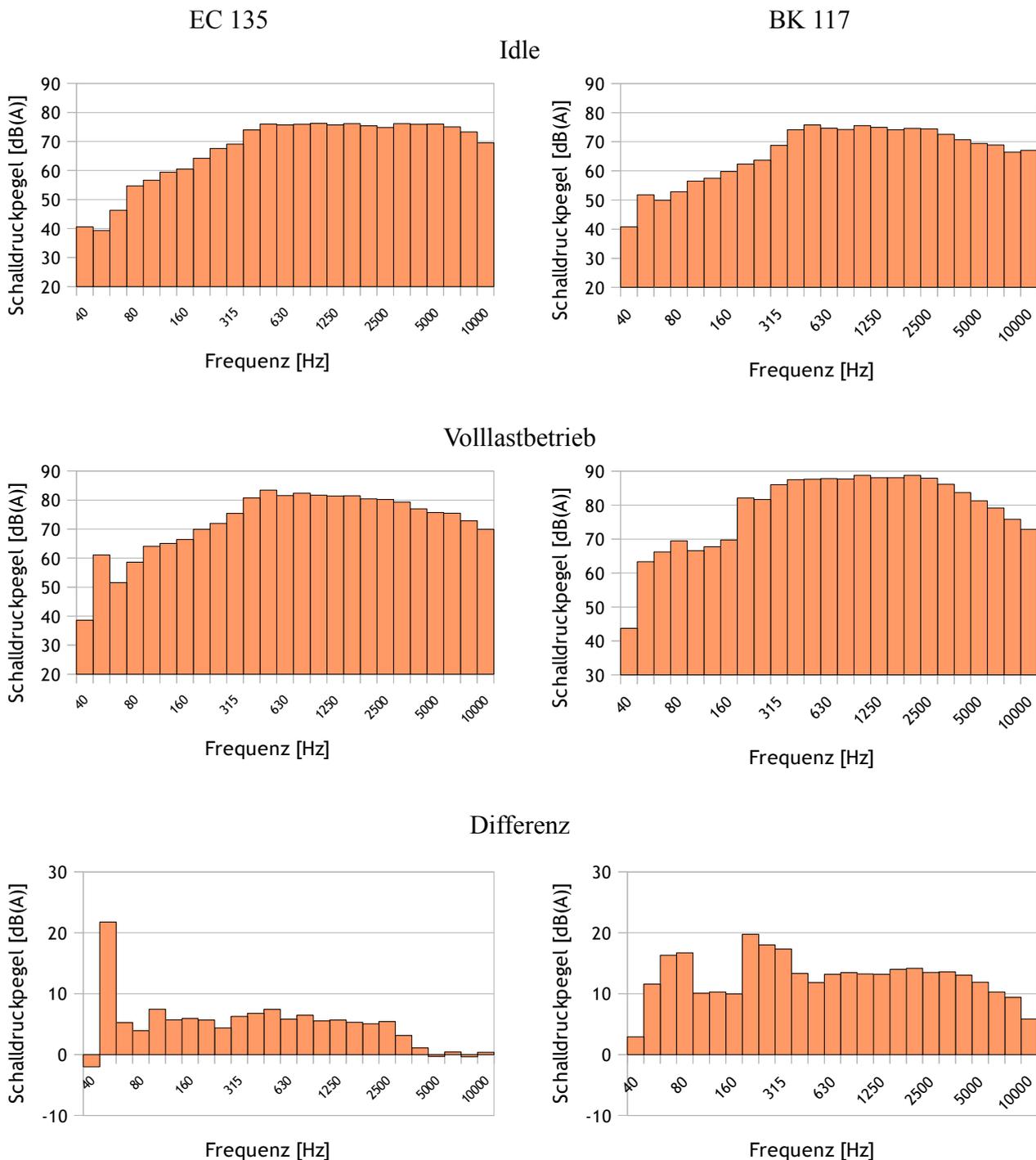


Abbildung 3.28: Terzbandspektrum, EC 135, Messp. 5

Abbildung 3.29: Terzbandspektrum, BK 117, Messp. 5

Die Terzbandspektren beider Hubschrauber in beiden Betriebszuständen an allen Messpunkten können dem Kapitel A-5 im Anhang entnommen werden.

Zum Vergleich der Hubschrauber und der Betriebszustände untereinander werden auch für die Frequenzspektren die Differenzen gebildet. Dabei wird, wie zuvor beim Gesamtschalldruckpegel, die Differenz durch die Subtraktion des EC 135-Pegels vom BK 117-Pegel für die Hubschrauber und durch die Subtraktion des Pegels aus dem Idlebetrieb von dem aus dem Volllastbetrieb für die Betriebszustände gebildet. Die sich ergebenden Werte sind in der Tabelle 3.12 zusammengefasst. Zur besseren Übersicht sind dabei die negativen Werte rot hervorgehoben.

| Frequenz [Hz] | Volllast - Idle | | BK117 – EC135 | |
|------------------|-------------------|-------------------|-----------------|---------------------|
| | BK 117 [dB(A)] | EC 135 [dB(A)] | Idle [dB(A)] | Volllast [dB(A)] |
| 40 | 6,84 | -4,03 | -2,80 | 8,07 |
| 50 | 16,76 | 20,94 | 6,18 | 2,00 |
| 63 | 16,05 | 8,91 | 2,17 | 9,32 |
| 80 | 12,53 | 5,38 | -1,81 | 5,34 |
| 100 | 8,94 | 7,15 | 1,66 | 3,45 |
| 125 | 11,85 | 6,88 | 3,22 | 8,19 |
| 160 | 11,89 | 5,85 | 2,97 | 9,01 |
| 200 | 11,92 | 6,89 | 3,32 | 8,35 |
| 250 | 11,67 | 5,88 | 0,56 | 6,36 |
| 315 | 11,86 | 6,20 | 0,57 | 6,22 |
| 400 | 12,82 | 6,36 | 0,84 | 7,29 |
| 500 | 13,29 | 8,29 | 2,02 | 7,02 |
| 630 | 12,20 | 7,01 | 1,86 | 7,04 |
| 800 | 11,03 | 7,22 | 1,53 | 5,34 |
| 1000 | 12,03 | 6,63 | 0,38 | 5,79 |
| 1250 | 12,02 | 6,55 | 0,23 | 5,69 |
| 1600 | 12,36 | 4,92 | -1,56 | 5,89 |
| 2000 | 13,71 | 5,61 | -2,27 | 5,84 |
| 2500 | 13,23 | 7,62 | -0,89 | 4,72 |
| 3150 | 12,79 | 4,78 | -2,83 | 5,18 |
| 4000 | 11,81 | 0,68 | -5,81 | 5,32 |
| 5000 | 9,37 | -0,76 | -6,52 | 3,60 |
| 6300 | 8,13 | 0,66 | -4,25 | 3,22 |
| 8000 | 7,34 | 1,25 | -3,22 | 2,86 |
| 10000 | 6,28 | 2,67 | -1,40 | 2,21 |

Tabelle 3.12: Differenzen der emittierte Frequenzspektren

Die Analyse der Frequenzspektren im Idlebetriebszustand belegt im Schnitt bei der EC 135 höhere Frequenzteilpegel als bei der BK 117. Dies gilt an allen Messpunkten für die höheren Frequenzen von etwa 1 bis 10 kHz. An Messpunkt 5, am Heck des Hubschraubers, ist der Schalldruckpegel sogar entlang des gesamten Frequenzbandes größer, als bei der BK 117. Die Ursache könnte erneut beim Heckrotor liegen. So besitzt der Heckrotor der BK 117 zwei Heckrotorblätter und der Fenestron der EC 135 hingegen zehn Blätter. Lediglich im niederfrequenten Bereich von 50 Hz bis 1 kHz ist auf der linken Hubschrauberseite der Schalldruckpegel der BK 117 größer als der der EC

135. Dabei sind die Schalldruckpegel der BK 117 nur gering größer als die der EC 135 und liegen dabei zwischen 1 und 3 dB(A) über dem EC 135-Pegel.

Beim Betrieb im Volllastbereich trifft dies nicht mehr zu. Im Volllastbetrieb dominiert an allen Messpunkten über das gesamte Frequenzspektrum der BK 117-Pegel. Insgesamt betrachtet sind die Teilschalldruckpegel dabei bis zu 10 dB(A) größer als die der EC 135.

Des weiteren lässt sich anhand der Diagramme gut erkennen, dass sich die Lärmpegel entlang der Frequenzen bei den jeweiligen Betriebszuständen nicht verlagern, sondern in beiden Fällen ihren maximalen Wert jeweils zwischen 1 und 2 kHz erreichen. Der dominierende Frequenzbereich erstreckt sich dabei über ein sehr breites Intervall von etwa 500 bis 8000 Hz.

Den technischen Daten der Hubschrauber können dabei für die rotierenden Komponenten folgende Drehzahlen und Frequenzen entnommen werden.

| Komponente | Drehzahl [1/min] | | Frequenz [Hz] | |
|-------------------------------------|------------------|--------|---------------|--------|
| | BK 117 | EC 135 | BK 117 | EC 135 |
| Hauptrotordrehzahl bei 100% Anzeige | 361 | 395 | 24 | 26 |
| Heckrotordrehzahl bei 100% HaRo | 2396 | 3584 | 80 | 597 |
| Heckrotorwelle | 2169 | 4986 | 36 | 83 |
| Verdichterturbine | 50000 | | 833 | |
| Powerturbine | 33000 | | 550 | |
| Output Shaft | 5000 - 6000 | | 83 – 100 | |

Tabelle 3.13: Drehzahlen und Frequenzen der rotierenden Komponenten

Es ist ersichtlich, dass die hohen Frequenzanteile des Gesamtpegels überwiegend aus den Komponenten der Triebwerke stammen. Der Hauptrotor weist, im Vergleich zu den anderen Teilen, die niedrigsten Drehzahlen auf, die am Hubschrauber erzeugt werden. Sehr groß ist dabei, aufgrund der unterschiedlichen Anzahl von Blättern, die Differenz am Heckrotor. So beträgt die Frequenz des Heckrotors bei der EC 135 etwa 500 Hz mehr als bei der BK 117.

Für das Gesamtfrequenzspektrum kommen zu diesen Frequenz aus den rotierenden Komponenten noch jene hinzu, die z.B. aus Vibrationen oder Interaktionen benachbarter Teile hervorgerufen werden.

3.6 Abschirmung durch die Werft

Die schalltechnischen Untersuchungen der Hubschrauber gestatteten eine zusätzliche Messung zum Abschirmeffekt des Werftgebäudes. Diese zusätzliche Messung ergibt, dass der Schalldruckpegel, der in unmittelbarer Nähe des Hubschraubers noch ungefähr 110 dB(A) beträgt, auf der gegenüberliegenden Seite des Werftgebäudes, am Haupteingang der ADAC Luftfahrt Technik GmbH, lediglich einen Spitzenpegel von 48 dB(A) erreicht.

Das Werftgebäude selbst bewirkt also, je nach Ausbreitungsrichtung, eine Minderung des emittierten Schalles um bis zu 60 dB(A). Dieser Abschirmeffekt des Werftgebäudes kann sich zur Minderung der Schallimmission im Wohngebiet, durch eine geeignete Positionierung der Hubschrauber auf dem Werftgelände zunutze gemacht werden ohne, dass zusätzliche Baumaßnahmen und hiermit verbundene Kosten anfallen.



Abbildung 3.30: Abschirmung durch die Werft

3.7 Maßnahmen zur Lärminderung

Wie eingangs geschildert war das Ziel der beschriebenen Untersuchungen nicht nur die Analyse des von der ADAC Luftfahrt Technik GmbH verursachten Betriebslärms am Flughafen Bonn-Hangelar und der daraus resultierende Lärmimmission in den anliegenden Wohngebieten sondern auch die Zusammenstellung eines Kataloges geeigneter Maßnahmen zur Reduktion derselben.

3.7.1 Seperate Betrachtung der entsprechenden Maßnahmen

3.7.1.1 Ausnutzung der Richtwirkung

Aus den Untersuchung der Richtcharakteristiken geht hervor, dass bei beiden Hubschraubern die größte Schallemission auf der rechten Seite liegt. Um eine Minderung der Schallimmission im Wohngebiet zu erzielen, wird diese Tatsache, durch ein gezieltes „Wegdrehen“ der rechten Hubschrauberseite vom Wohngebiet ausgenutzt. Dadurch strahlt der schallintensivste Bereich in das offene unbewohnte Gelände.

Die folgenden Abbildungen veranschaulichen den Effekt dieser Maßnahme. Dabei ist die Richtung des größten, vom Hubschrauber ausgehenden, Schalles mit Pfeilen gekennzeichnet.

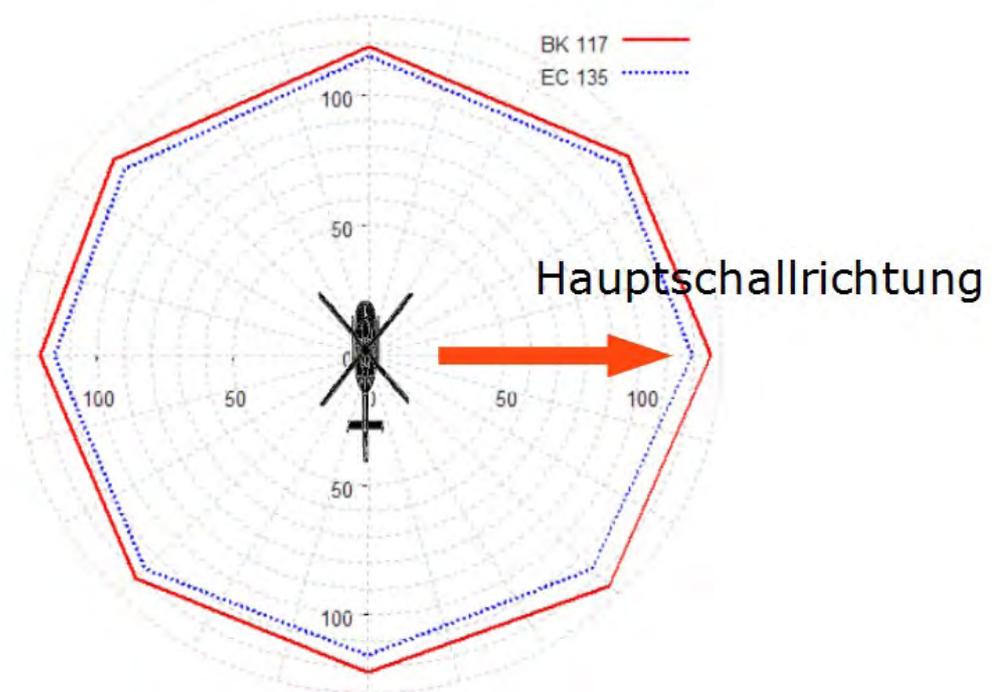


Abbildung 3.31: Hauptschallrichtung der Hubschrauber

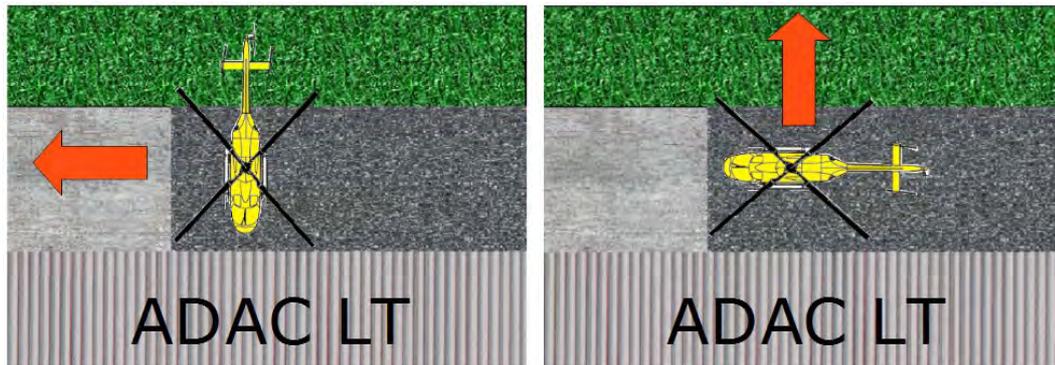


Abbildung 3.32: Optimale Ausrichtung der Hubschrauber auf dem Werftgelände

Bei Umsetzung dieser Maßnahme verhält sich der vom Hubschrauber ausgesandte Schall in der Umgebung wie es in Abbildung 3.33 dargestellt ist.



Abbildung 3.33: Schallausbreitungsrichtung und Ortsrand

3.7.1.2 Ausnutzung der Abschirmung durch die Werft

Bei Annahme einer geradlinigen Schallausbreitung ist im Bezug auf die Betriebspositionen für Standläufe ersichtlich, dass der Abschirmwinkel den die Werft bildet wächst, wenn die Betriebspositionen näher zusammen liegen. Des weiteren liegen die Positionen 2 und 3 auf der ortsabgewandten Seite des Werftgeländes. Beim Betrieb der Hubschrauber an diesen Positionen

In der Fläche, welche sich zwischen den beiden Abschirmwinkeln α und β (siehe Abbildung 3.35) aufspannt, liegt in etwa auch der Ort, der bei den Lärmmessungen sowohl für den Werkstattflugbetrieb als auch für den Werft- und Wartungsbetrieb die größte Schallimmission aufweist. Für die exakten Verläufe dieser Grenzen müssten die Abmaße der Werft, ihre Lage und ihre Ausrichtung genauer untersucht werden. Eine erste Näherung an diese Grenzen ist in der Stadtkarte von Hangelar in Abbildung 3.35 dargestellt.

Insbesondere für die Anwohner der Parsevalstraße, die durch keine schallmindernde Bebauung oder Bepflanzung vor dem dort direkt und ungestört eintreffenden Schallfeld geschützt ist, könnte eine bewusste Positionierung der Hubschrauber auf dem Werftgelände eine sinnvolle und effektive Reduktion der Lärmimmission bewirken.

In einer Kombination dieser Möglichkeiten, ergibt sich für die Anwohner Hangelars letztlich die schallärmste Lösung. Dabei müssen von der ADAC Luftfahrt Technik GmbH keine finanziell aufwändigen Schallschutzmaßnahmen ergriffen, sondern lediglich Eingriffe in den innerbetrieblichen Abläufen getätigt werden.

3.7.2 Zusammenfassung der Optionen der ADAC Luftfahrt Technik GmbH

Auch wenn die Lärmimmission durch die ADAC Luftfahrt Technik GmbH am Ortsrand von Hangelar insgesamt nur gering ist, lassen sich auf der Grundlage der Messergebnisse einige Maßnahmen zur Lärminderung formulieren. Dabei handelt es sich um kleinere Eingriffe in den Werft- und Wartungsbetrieb, die allerdings eine merkliche Reduktion der Lärmemission versprechen:

- Bei Standläufen sollten die Hubschrauber in Richtung des Werftgebäudes ausgerichtet sein. Die Ergebnisse aus der Hubschraubervermessung belegen eine höhere Lärmemission zur rechten Seite der Hubschrauber hin. Somit wäre eine Ausbreitung des dominierenden Schallfeldes in Richtung des offenen, unbewohnten Feldes hin gewährleistet. Alternativ würde dies auch durch eine Ausrichtung der Hubschrauber parallel zur Außenwand des Werftgebäudes erreicht, sofern die jeweils linke Hubschrauberseite der Werft zugewandt ist. (siehe Abbildung 3.31 bis 3.33)
- Die Standläufe sollten auf die Betriebspositionen 2 und 3 nach Kapitel 3.4.1.1 begrenzt werden, um so eine optimale Abschirmung der Lärmemission durch das Werftgebäude zu erzielen. (siehe dazu Abbildung 3.34 und 3.35)
- Hovervorgänge auf dem Werftgelände sollten auf das Mindestmaß beschränkt werden. Da in diesem Betriebsmodus die Abschirmung durch das Werftgebäude am geringsten ist.

Diese Maßnahmen bedürfen keiner zusätzlichen Zuhilfenahme von weiteren Einrichtungen oder Konstruktionen durch externe Partner. Sie können hingegen unmittelbar von den Betreibern der Werft umgesetzt werden. So kann die Schallimmission im Wohngebiet bereits alleine durch Anpassung der innerbetrieblichen Abläufe gemindert werden.

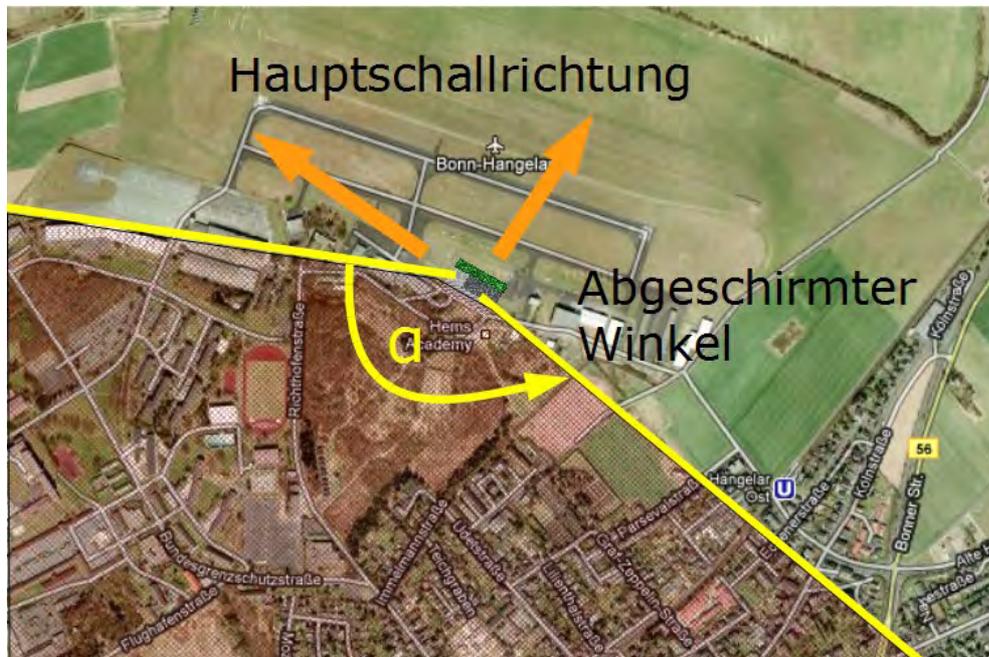


Abbildung 3.36: Kombinierte Maßnahmen

3.8 Fazit der Lärmmessungen

Die Resultate der Lärmmessungen lagen insgesamt weit hinter den Lärmimmissionen, die das Aufbegehren der Anwohner zunächst erwarten ließ. Durch die geringe Differenz zwischen Umgebungsschall und den Geräuschen aus dem Hubschrauberbetrieb wurden die Lärmmessungen zudem erschwert. So liegen, trotz zahlreicher Versuche, keine Messungen vor, die völlig frei von Störeinflüssen sind. Es fällt auf, dass trotz der vermeintlich ruhigen Lage des Wohngebietes ein reges Verkehrsaufkommen herrscht. Der Straßen- und Schienenverkehr bewirkt von der Häufigkeit her mehr Schallereignisse als der Flugbetrieb der ADAC Luftfahrt Technik GmbH.

Die Lärmemission des Werft- und Wartungsbetriebes, der mit 90% den Großteil des Arbeitsbetriebs der ADAC Luftfahrt Technik GmbH ausmacht, ist im untersuchten Wohngebiet messtechnisch nicht mehr zu erfassen. Sie lässt sich allenfalls noch auf der Grundlage psychoakustischer Rezeptionsmuster wahrnehmen. Ausnahmen bilden dabei Hovervorgänge auf dem Werftgelände, die an bestimmten, ungeschützten Punkten des Ortsrandes, messbare Lärmimmission bewirken. Die eigentliche Lärmbelästigung der Anwohner wird jedoch durch den Flugbetrieb verursacht. Dabei sind die jeweiligen Wohnhäuser je nach Lage mehr oder weniger stark davon betroffen. Unter der Berücksichtigung, dass der Flugbetrieb der ADAC Luftfahrt Technik GmbH nur 10% ihres Betriebes ausmacht, spielt diese flugbedingte Lärmeinwirkung im Vergleich zu anderen Nutzern des Flughafens eine nur untergeordnete Rolle.

Zudem wurde, durch die Flugbahn entlang der südlichen Platzrunde, das Worst-Case-Szenario während der Lärmmessungen zum Werkstattflugbetrieb für die Ortschaft von Hangelar simuliert. Stellt man zudem in Rechnung, dass sich der Werkstattflugbetrieb im Normalfall auf die An- und Abflüge zur Werft beschränkt und nicht die gesamte Platzrunde mit einbezieht, kann mit einiger Sicherheit gesagt werden, dass die tatsächliche Schallimmission in Hangelar geringer ausfällt, als durch die Lärmessungen ermittelt.

Die während der Messungen verzeichnete Schallimmission durch den Werft- und Wartungsbetrieb im Wohngebiet, kann durch kleinere Eingriffe in den innerbetrieblichen Abläufen verbessert werden ohne, dass finanziell aufwändige Schallschutzmaßnahmen ergriffen werden müssen.

Dennoch ist, auch wenn die Lärmmessungen für die anliegenden Wohngebiete zunächst keine Notwendigkeit einer Lärminderung nahelegen, die Frage nach Maßnahmen zur Erreichung einer Lärminderung für die Flughafennutzer bzw. für die Angestellten am Flughafen selbst durchaus berechtigt. Die Vermessungen der Hubschrauber belegen eine Schallquelle mit einem Potenzial von bis zu 126 dB(A) in einer Entfernung von 14 m zum Werftgebäude. Da die dauerhafte Aussetzung gegenüber intensivem Lärm nicht nur die Arbeitsfähigkeit einschränkt, sondern auch Krankheiten, wie Migräne, Bluthochdruck oder Schwerhörigkeit auslösen und/oder fördern kann, soll in einem nächsten Schritt ein mögliches Konzept für Schallschutzmaßnahmen im unmittelbaren Umfeld des Flughafens erarbeitet werden. Dabei gilt es spezielle Techniken zu entwickeln, die es gestatten, den anfallenden Schall am Ort seiner Entstehung umzulenken oder zu absorbieren. Maßnahmen bei denen die Lärmemission schon im nahen Umfeld gesenkt wird, werden auch Auswirken auf die weitere Umgebung haben und so eine zusätzliche Reduktion der Lärmbelästigung der Bevölkerung begünstigen. Simple Schallschutzmauern, wie sie z.B. zur Abschirmung von Wohngebieten von Straßenlärm eingesetzt werden, scheiden aufgrund der Art und Weise der Nutzung der Werftflächen als Option von vornherein aus.

3.9 Helipad

3.9.1 Grundlagen

3.9.1.1 Ausgangssituation

Neben den erwähnten Möglichkeiten, die die ADAC Luftfahrt Technik GmbH ihrerseits besitzt, die Schallimmission in Hangelar zu reduzieren, können weitere Überlegungen zum Schallschutz der Mitarbeiter der Werft getroffen werden. Bei diesen gilt es die vorherrschenden Begebenheiten mit in die Gedankengänge einzubinden und zu berücksichtigen. So spielen sowohl die baulichen Begebenheiten vor Ort eine Rolle als auch die Abläufe von innerbetrieblichen Arbeitsschritten oder die Möglichkeiten in der Handhabung der Hubschrauber selber. Unter diesen Gesichtspunkten gilt es ein schallreduzierendes Konzept zu erarbeiten, welches einerseits eine ausgeglichene Kosten-Nutzen-Bilanz aufweist als auch eine möglichst einfache Handhabbarkeit durch das Personal gewährleistet.

Aus Sicht der ADAC Luftfahrt Technik GmbH geht es dabei primär um eine effiziente Lärmreduzierung auf dem Werftgelände, die vor allem den Schutz der Werftmitarbeiter vor einer zu hohen Lärmbelastigung zum Ziel hat. So geht es zwar nicht primär darum, den im Wohngebiet einfallenden Schall zu reduzieren, jedoch haben Maßnahmen, die das Schallfeld schon vor Ort mindern zweifellos auch positive Auswirkungen auf die Lärmeinwirkung im Ort.

3.9.1.2 Rahmenbedingungen

Im Mittelpunkt des zu entwickelnden Konzeptes zur Lärminderung steht der Werft- und Wartungsbetrieb der ADAC Luftfahrt Technik GmbH. Andere denkbare Interventionen, etwa im Bereich des Flugbetriebes oder der Hubschraubertechnik lassen sich aufgrund der vorgegebenen Platzrunde bzw. des hohen Kostenaufwandes nicht ohne weiteres realisieren. Für den ersten Entwurf eines Konzeptes zur Lärminderung sollen die folgenden Rahmenbedingungen gelten:

1. Der Hubschrauber muss ohne weitere Probleme in bzw. aus dem Werftgebäude befördert werden können
2. Hubschrauber müssen weiterhin ungehindert auf dem Werftgelände gestartet und gelandet werden können
3. Der Hubschrauber befindet sich auf dem Werftgelände im Standbetrieb
4. Der Boden der Werft besteht aus Asphalt und Beton
5. Die Entfernung der Hubschrauberfront zur Werftaußenwand beträgt ca. 15 m
6. Das vom Hubschrauber emittierte Schallfeld nach Druck und Frequenz ist bekannt

Aufgrund der erforderlichen Mobilität zwischen Werftgebäude und Werftgelände (siehe oben Punkt 1) scheidet die Option der Errichtung von Schallschutzwänden oder Ähnlichem von vornherein aus. Stattdessen sollen insbesondere die Bedingungen 3 und 4 bei der Entwicklung eines Konzeptes zu Lärminderung betrachtet werden. Nach Punkt 3 befindet sich der Hubschrauber im Standbetrieb und damit an einer fixen Position auf dem Werftgelände. Dies lässt die Möglichkeit offen das Schallschutzsystem zum Hubschrauber zu bringen oder auch den Hubschrauber zum Schallschutzsystem. Es kann demnach eine fest positionierte oder eine mobile Einrichtung in Frage kommen. Eine fest positionierte Schallschutzvorrichtung kann jedoch unter Umständen in Verbindung mit der Bedingung 5 und den vorliegenden Platzverhältnissen den Forderungen aus der ersten Bedingung widersprechen. Eine mobile Einrichtung sollte daher die bessere Variante darstellen. Zudem gewährleistet eine mobile Auslegung ein ungehindertes Starten und Landen der Hubschrauber (Rahmenbedingung 2). Gemäß Bedingung 4 besteht der Boden des Werftgeländes aus Beton und Asphalt. Die Fläche auf der der Hubschrauber demnach betrieben wird ist äußerst schallhart, weist also eine hohe Impedanz auf. Er ist also von sich aus wenig dämpfend, da der ausgesandte Schall am Boden vollständig reflektiert wird.

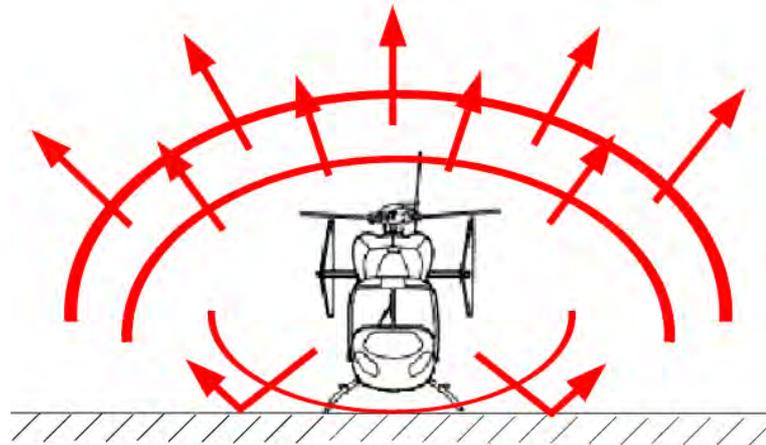


Abbildung 3.37: Reflexion am schallharten Boden

Durch die Reflexion des Schallfeldes am Boden halbiert unter der Annahme eines Monopolcharakters, die Kugeloberfläche, auf der sich der Schall ausbreitet. Nach Gleichung 3.2 bedeutet dies, eine Verdopplung der Schallintensität ($I_2 = 2 I_1$), die wiederum einer Verdoppelung der akustischen Leistung entspricht. Diese wirkt sich in der Zunahme des Schallpegels um + 3 dB aus.

$$\Delta L_{P_{Ak}} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{2}\right) = + 3 \text{ dB} \quad (3.9)$$

Das vom Hubschrauber emittierte Frequenzspektrum (Rahmenbedingung 6) ist aus den akustischen Vermessungen bereits bekannt. Aus diesen Untersuchungen geht hervor, dass der dominierende Frequenzbereich bei beiden Hubschraubern zwischen 500 und 8000 Hz liegt. Damit können nach folgender Gleichung die relevanten Wellenlängen λ dieser Frequenzen bestimmt werden.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.10)$$

Dabei entspricht c der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft bei einer Temperatur von 20°C und beträgt 343 m/s.

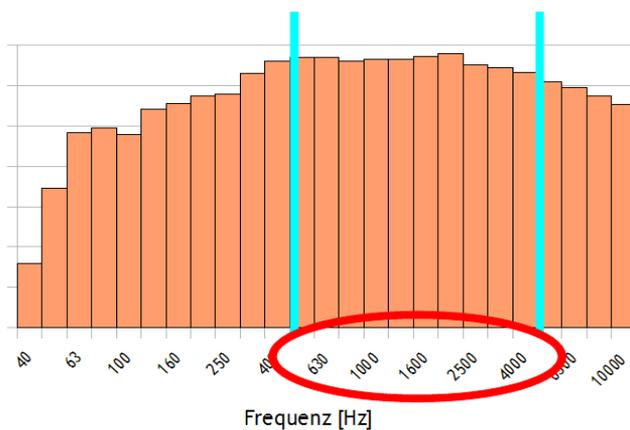


Abbildung 3.38: Dominierender Frequenzbereich

| Frequenz [Hz] | Wellenlänge [m] |
|---------------|-----------------|
| 500 | 0,686 |
| 630 | 0,544 |
| 800 | 0,429 |
| 1000 | 0,343 |
| 1250 | 0,274 |
| 1600 | 0,214 |
| 2000 | 0,172 |
| 2500 | 0,137 |
| 3150 | 0,109 |
| 4000 | 0,086 |
| 5000 | 0,069 |
| 6300 | 0,054 |
| 8000 | 0,043 |

Tabelle 3.14: Relevante Wellenlängen

Die Wellenlängen der relevanten Frequenzen liegen somit zwischen 0,69 und 0,04 m. Hierdurch wird vor allem durch die niedrigeren Frequenzanteile eine relativ dicke Dämmschicht erforderlich. Des weiteren sollte auch die verstärkte Schallemission an der rechten Hubschrauberseite durch geeignete Maßnahmen berücksichtigt werden.

3.9.1.3 Anforderungen an die Konstruktion

Unter Berücksichtigung der Ausgangssituation und der vorliegenden Rahmenbedingungen lassen sich für die zu konstruierende Schallschutzmaßnahme folgende Punkte zusammenfassen:

- Die Konstruktion sollte mobil sein
- Die Konstruktion sollte problemlos von wenigen Leuten bedient werden können
- Die Konstruktion sollte die Reflexion am schallharten Boden unterbinden
- Die Konstruktion sollte die relevanten Frequenzanteile akkurat dämpfen
- Die Konstruktion sollte die Erkenntnisse der Richtcharakteristiken berücksichtigen

3.9.2 Entwurfsskizze

Die Rahmenbedingung und Anforderungen an das Schallschutzsystem führten zum Entwurf eines modifizierten Helipads. Dabei wird der Hubschrauber auf diesem Helipad aufgesetzt und kann dort für die Standläufe betrieben werden.

Zur Sicherstellung einer vernünftigen Abströmung der Luft, wird der Rahmen des Helipads aus Gitterelementen konstruiert. Zwischen diesen Gitterelementen sind Breitbandabsorber eingelassen, welche die dominierenden Frequenzanteile des durchströmenden Schalles dämpfen sollen. Dazu werden sogenannte poröse Absorber verwendet, welche die Schallenergie durch Reibung der Luftmoleküle im Absorber in Wärme umwandeln (Dissipation). Die Vorteile dieser porösen Absorber liegen in einer hohen Schallabsorption im mittleren und oberen Frequenzbereich. Der Nachteil besteht im allgemeinen in einer geringen Absorption bei tiefen Frequenzen. Hier könnte die Auslegung der Struktur der Gitterelemente, im Bezug auf Lochabstand und Größe gezielt auf die niedrigeren Frequenzen abgestimmt werden, so dass auch die Frequenzen mit einer für die Absorber zu großen Wellenlänge gefiltert werden. Bei einer gesetzten Grenzfrequenz von 1000 Hz könnte die Höhe der Breitbandabsorber somit auf 34 cm begrenzt werden und müsste nicht wie für die tieferen Frequenzen von 500 Hz die erforderlichen 64 cm betragen. Hierdurch würde die Dicke des Helipads signifikant sinken. Des weiteren werden zu dem eigentlichen Helipad sowohl an den Seiten als auch an der Front weitere dieser so eben beschriebenen Baugruppen montiert. Diese werden dabei leicht nach oben angestellt um mit dem zentralen Helipad eine Art Schale zu bilden in der sich der Hubschrauber befindet. Hierdurch wird dem sich ausbreitenden Schall nach der Reflexion an den Gitterelementen die weitere Ausbreitungsrichtung aufgezwungen. Diese Ausbreitungsrichtung entspricht dann nicht mehr einer weit streuenden sondern einer zentral nach innen bzw. nach oben gerichteten. Zudem wird zur Reduzierung des verstärkt emittierten Schalles auf der Rechten Hubschrauberseite eine Abschirmwand auf der Höhe des Heckrotors angebracht.

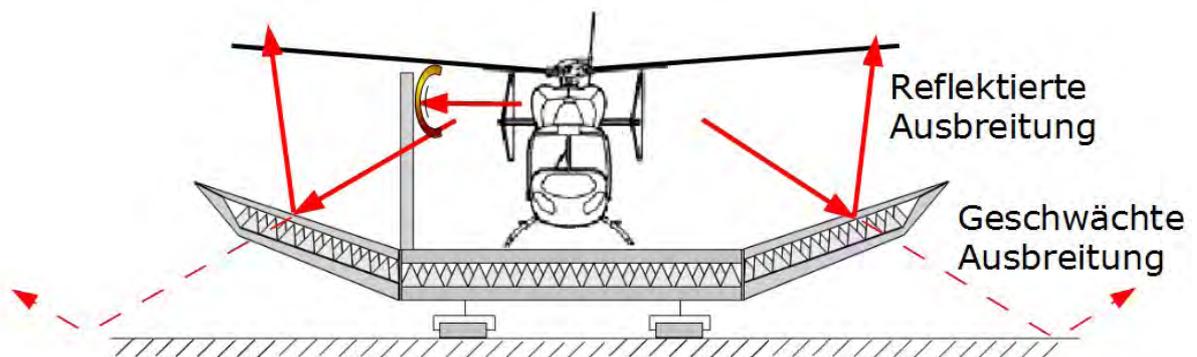


Abbildung 3.39: Prinzipskizze des modifizierten Helipads

Zur Gewährleistung der Mobilität soll das gesamte System auf Rollen gelagert werden. Es ist zudem zu überlegen ob eine Montage und Demontage der seitlichen bzw. der frontalen Baugruppe(n) der Konstruktion ermöglicht werden sollte um eine einfachere Handhabung zu gewährleisten. Zudem könnte die Zerlegbarkeit des Systems, eine einfachere Unterbringung in der Montagehalle des Werftgebäudes, ermöglichen.

Die letztlich erzielte Schallschutzgüte des Systems hängt dabei jedoch noch von den jeweiligen Parametern der einzelnen Komponenten ab. Einige Beispiele hierfür seien in der Folge genannt:

Breitbandabsorber:

- Material
- Porosität
- Strukturfaktor
- Strömungsresistenz

Heckschirm

- Form
- Größe
- Position

Rost:

- Größe
- Lochabstand
- Lochgröße
- Dicke

Winkelprofile:

- Anstellwinkel
- Tiefe

Eine zusätzliche Option wäre es den Heckschirm der den seitlichen Schall abfangen soll ebenfalls als Gitterstruktur auszulegen und eventuell mit porösen Absorbern auszustatten. Allerdings würde dies zusätzliche Kosten mit sich bringen. Ein Kosten-Nutzen-Vergleich könnte Aufschluss über die Notwendigkeit bzw. Sinnhaftigkeit dieser Maßnahme geben.

3.9.3 3D- Modell

Für eine bessere Vorstellung des beschriebenen Helipads wurden dreidimensionale Modelle erstellt. Diese sollen die Struktur und den Aufbau veranschaulichen. Der in diesem Modell dargestellte Hubschrauber ist im Vergleich zum Rest des Systems jedoch nicht maßstabsgetreu dargestellt. Er dient vornehmlich der besseren Veranschaulichung des Modells.

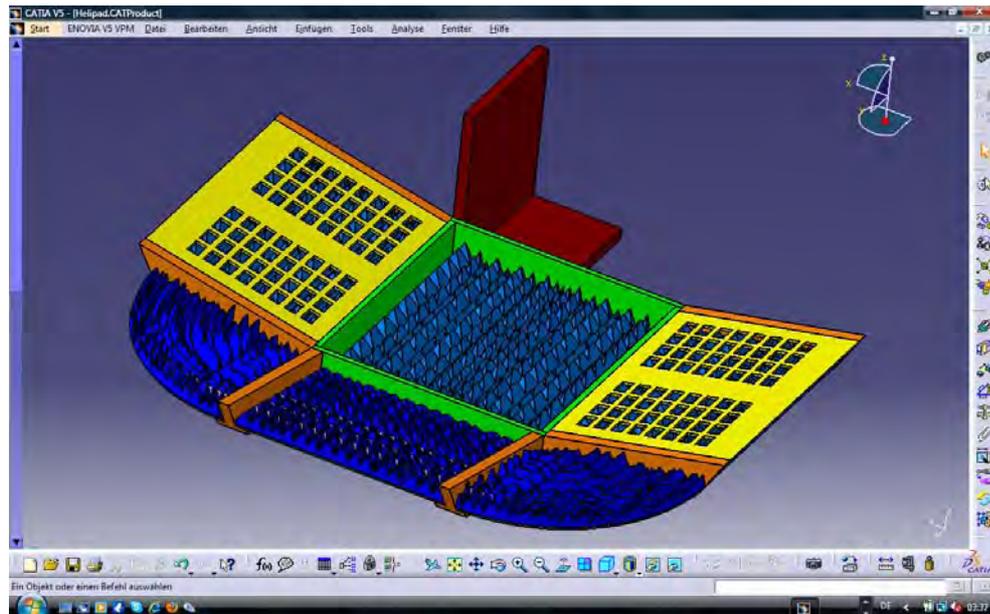


Abbildung 3.40: Geöffnetes Helipad

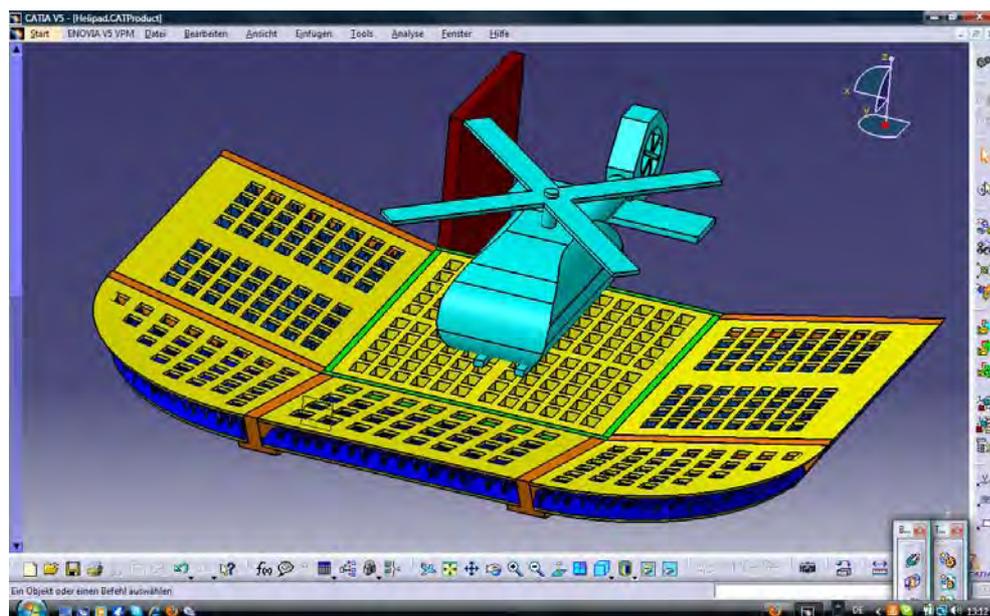


Abbildung 3.41: Helipad

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 2.1: Dezibelskala | 7 |
| Abbildung 2.2: 10 dB-down-time | 9 |
| Abbildung 2.3: Kurven gleicher Lautstärkepegel | 10 |
| Abbildung 2.4: Zusammenhang von Phon und Sone | 11 |
| Abbildung 2.5: Sone/Phon- Skalar | 11 |
| Abbildung 2.6: Bewertungsfiterkurven | 12 |
| Abbildung 2.7: Einfluss der Tonhaltigkeit auf die Hörschwelle | 13 |
| | |
| Abbildung 3.1: PULSE Multi-Analyser | 17 |
| Abbildung 3.2: Modulschallpegelmesser | 17 |
| Abbildung 3.3: AIP- Flughafenkarte Bonn-Hangelar | 18 |
| Abbildung 3.4: Lage der Messstationen | 20 |
| Abbildung 3.5: Beispiel des Messaufbaus (hier: Messstation 4) | 20 |
| Abbildung 3.6: Die untersuchte BK 117 (D - HBRB) | 21 |
| Abbildung 3.7: 3-Seitenansicht der BK 117 | 23 |
| Abbildung 3.8: Lärmzeugnis der BK 117 B - 2 | 24 |
| Abbildung 3.9: Die untersuchte EC 135 (D - HLDM) | 25 |
| Abbildung 3.10: 3-Seitenansicht der EC 135 | 27 |
| Abbildung 3.11: Lärmzeugnis der EC 135 P2 | 28 |
| Abbildung 3.12: Südliche Platzrunde und Flugrichtung | 29 |
| Abbildung 3.13: Messstationen für den Flugbetrieb und Lage zur Flugroute | 30 |
| Abbildung 3.14: Messstation 1, EC 135, Start | 31 |
| Abbildung 3.15: Messstation 3, EC 135, Start | 31 |
| Abbildung 3.16: Messaufbau an Messstation 3, die Werft im Hintergrund | 34 |
| Abbildung 3.17: Betriebspositionen auf dem Werftgelände | 35 |
| Abbildung 3.18: Vermessene Stationen für den Werft- und Wartungsbetrieb | 36 |
| Abbildung 3.19: Messstation 2, BK 117, Betriebspos. 2, Standbetrieb | 37 |
| Abbildung 3.20: Messstation 5, EC 135, Betriebspos. 1, Standbetrieb | 37 |
| Abbildung 3.21: Offenes Gelände zur Messstation 3 | 40 |
| Abbildung 3.22: Lage der Messpunkte für die Hubschraubervermessung | 41 |
| Abbildung 3.23: Monopolcharakteristik | 42 |
| Abbildung 3.24: Emittierte Schalldruckpegel der BK 117 | 45 |
| Abbildung 3.25: Emittierte Schalldruckpegel der EC 135 | 45 |
| Abbildung 3.26: Richtwirkung der BK 117 | 47 |
| Abbildung 3.27: Differenz von Volllast zu Idle | 47 |
| Abbildung 3.28: Terzbandspektrum, EC 135, Messp. 5 | 50 |
| Abbildung 3.29: Terzbandspektrum, BK 117, Messp. 5 | 50 |
| Abbildung 3.30: Abschirmung durch die Werft | 53 |
| Abbildung 3.31: Hauptschallrichtung der Hubschrauber | 54 |
| Abbildung 3.32: Optimale Ausrichtung der Hubschrauber auf dem Werftgelände | 55 |
| Abbildung 3.33: Schallausbreitungsrichtung und Ortsrand | 55 |
| Abbildung 3.34: Aufgespannte Winkel in Abhängigkeit der Betriebsposition | 56 |
| Abbildung 3.35: Betriebspositionsabhängige Abschirmwinkel und Lage Messstation 3 | 56 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 3.36: Kombinierte Maßnahmen | 58 |
| Abbildung 3.37: Reflexion am schallharten Boden | 61 |
| Abbildung 3.38: Dominierender Frequenzbereich | 62 |
| Abbildung 3.39: Prinzipskizze des modifizierten Helipads | 63 |
| Abbildung 3.40: Geöffnetes Helipad | 65 |
| Abbildung 3.41: Helipad | 65 |
| | |
| Abbildung 4.1: Kopfnachbildung mit aussenliegenden Messmikrofonen | 67 |
| Abbildung 4.2: Kugelflächenmikrofon der Firma Schoeps Mikofone | 68 |
| Abbildung 4.3: Gehörgang eines Kunstkopfes inklusive Messmikrofon | 69 |
| Abbildung 4.4: Messaufbau des Kunstkopf-Messsystems | 71 |
| Abbildung 4.5: Frequenzabhängige Dämmwerte am Beispiel von Bilsom 303 Ohrstöpseln | 73 |
| Abbildung 4.6: Untersuchte Gehörschutzsysteme | 74 |
| Abbildung 4.7: KORG Guitar/Bass Tuner GA - 30 | 75 |
| Abbildung 4.8: Frequenzspektren der verwendeten Schallsignale | 76 |
| Abbildung 4.9: Messaufbau für die Gehörschutzmessung | 77 |
| Abbildung 4.10: Der Kunstkopf mit den aufgesetzten Gehörschutzsysteme | 78 |
| Abbildung 4.11: SPL links, SPL rechts und BSPL | 79 |
| Abbildung 4.12: Frequenzschalldruckpegel und Dämpfung bei Signal b | 81 |
| Abbildung 4.13: Binaurale Schalldruckpegel der verwendeten Signale | 82 |
| Abbildung 4.14: Schalldruckpegel bei Signal A | 83 |
| Abbildung 4.15: Schalldruckpegel bei Signal D | 83 |
| Abbildung 4.16: Dämpfung Fliegerhelm | 85 |
| Abbildung 4.17: Dämpfung Kapselohrschützer | 85 |
| Abbildung 4.18: Dämpfung Ohrschutzstöpsel | 85 |
| Abbildung 4.19: Start BK 117 ohne Schutz | 86 |
| Abbildung 4.20: Start BK 117 mit Fliegerhelm | 86 |
| Abbildung 4.21: Start BK 117 mit Kapselohrschützer | 86 |
| Abbildung 4.22: Start BK 117 mit Ohrschutzstöpseln | 86 |
| Abbildung 4.23: FFT des Startgeräusches aus der Tonspur | 87 |
| Abbildung 4.24: Terzbandspektrum aus der Hubschraubervermessung | 87 |
| Abbildung 4.25: Frequenzschalldruckpegel und Dämpfung beim Startgeräusch einer BK 117 | 89 |
| Abbildung 4.26: Pegel-Zeit-Verlauf des Startsignales | 90 |
| Abbildung 4.27: Dämpfung beim Start | 90 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 2.1: Beziehung von Pegel, Energie- und Feldgrößen | 6 |
| Tabelle 2.2: Verhältnis von Schalldruck und Schalldruckpegel | 7 |
| Tabelle 3.1: Geografische Lage der Messstationen | 19 |
| Tabelle 3.2: Lage der Messpunkte zum Flugbetrieb | 30 |
| Tabelle 3.3: Ergebnisse aus dem Werkstattflugbetrieb | 33 |
| Tabelle 3.4: Lage der Messpunkte zum Werftbetrieb | 36 |
| Tabelle 3.5: Ergebnisse aus dem Werft- und Wartungsbetrieb | 38 |
| Tabelle 3.6: Gemessene Schalldruckpegel in dB(A) | 42 |
| Tabelle 3.7: Distanz Mikrofon - Rotorachse | 43 |
| Tabelle 3.8: Emittierte Schalldruckpegel in dB(A) | 44 |
| Tabelle 3.9: Differenzwerte der emittierten Schalldruckpegel in dB(A) | 44 |
| Tabelle 3.10: Änderung des Schalldruckpegels | 46 |
| Tabelle 3.11: Emittierte Frequenzspektren | 49 |
| Tabelle 3.12: Differenzen der emittierte Frequenzspektren | 51 |
| Tabelle 3.13: Drehzahlen und Frequenzen der rotierenden Komponenten | 52 |
| Tabelle 3.14: Relevante Wellenlängen | 62 |
| Tabelle 4.1: Signal-Schalldruckpegel | 82 |
| Tabelle 4.2: Dämpfungswerte der jeweiligen Gehörschütze | 84 |
| Tabelle 4.3: Minderungsfaktor bezogen auf das Ausgangssignal | 91 |

Quellenverzeichnis

- [1] *Also sprach Zarathustra - Ein Buch für Alle und Keinen*, Friedrich Nietzsche
Reclam Verlag, ISBN-13: 978-3150071113
- [2] *Goethe, 4 Bde.*, Johann Wolfgang von Goethe
Neuer Kaiser Verlag; ISBN-13: 978-3704390103
- [3] *Wider dem Lärm*, Eduard Spranger
Würzburg 1956
- [4] *Akustik – Eine Einführung*, H. Kutruff
S. Hirzel Verlag Stuttgart Leipzig, ISBN 3-7776-1244-8
- [5] *Technische Akustik*, Michael Möser
Springer Verlag, ISBN 978-3-540-71386-9
- [6] *Technische Akustik*, Ivar Veit
Vogel Fachbuch Verlag, ISBN 3-8343-3013-2
- [7] *Flugzeuglärm*, G. Neuwerth
Vorlesungsskript RWTH Aachen WS 2005/06
- [8] *Akustik 2*, J. Blauert
Vorlesungsskript Ruhr-Universität Bochum
- [9] *Datenblatt HMS II.3 (1230) - Kunstkopf-Messsystem mit Ohrsimulator und künstlichen Mund*, HEAD acoustics GmbH, Technisches Datenblatt
- [10] *Datenblatt BEQ II.1 (1347) - Binauraler digitaler Equalizer mit 24-bit-Technologie und USB Anschluss*, HEAD acoustics GmbH, Technisches Datenblatt,
- [11] <http://www.sengpielaudio.com/>
Internetforum für Mikrofonaufnahmetechnik und Tonstudioteknik
- [12] <http://hearing.siemens.com>
Internet-Firmenportal der Siemens Hearing Instruments
- [13] <http://www.bksv.com>
Internet-Firmenportal der Brüel & Kjær Sound- & Vibration Measurement A/S
- [14] <http://www.lfe.mw.tum.de>
Internetpräsenz des Lehrstuhles für Ergonomie der Technischen Universität München
- [15] <http://www.head-acoustics.de>
Internet-Firmenportal der HEAD acoustics GmbH

Quellenverzeichnis

- [16] <http://www.earplugs.de>
Internet-Firmenportal der Sonic Shop Ear protection
- [17] <http://www.wikipedia.org>
Internetpräsenz Wikipedia - die freie Enzyklopädie
- [18] <http://www.hubschraubermuseum.de>
Internetpräsenz des Hubschrauerschraubermuseums Bückeburg des Hubschrauberzentrums e.V. Bückeburg
- [19] <http://www.luftverkehr.com>
Internetinformationsplattform für Flugbetrieb
- [20] <http://www.schoeps.de>
Internet-Firmenportal der Schoeps GmbH für Mikrofontechnik
- [21] <http://www.korg.com>
Internet-Firmenportal der KORG INC.

Anhang

A-1 Messstationen



Abbildung A-1.1: Lage der Messstationen 1 bis 5



Abbildung A-1.2: Messstation 1



Abbildung A-1.3: Messstation 2



Abbildung A-1.4: Messstation 3



Abbildung A-1.5: Messstation 4



Abbildung A-1.6: Messstation 5

A-2 Werkstattflugbetrieb

MS 1, EC 135, Start

Indizes:
Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel
eq: Äquivalter Dauerschallpegel; St: inklusive Störeindrücke

| $L_{A\text{Umg}}$ | $L_{A\text{Max}}$ | $L_{A\text{Max St}}$ | $L_{A\text{eq}}$ | $L_{A\text{eq St}}$ | [dB(A)] |
|-------------------|-------------------|----------------------|------------------|---------------------|---------|
| 49,19 | 59,17 | 63,25 | 55,15 | 55,15 | |



Lärmrichtung:

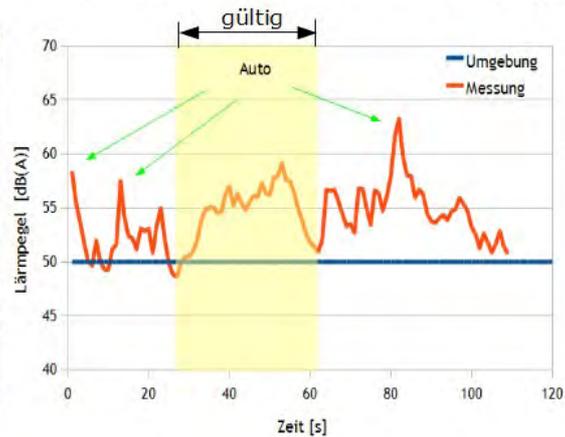


Abbildung A-2.1: Messstation 1, EC 135, Start

MS 1, EC 135, Landung

Indizes:
Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel
eq: Äquivalter Dauerschallpegel; St: inklusive Störeindrücke

| $L_{A\text{Umg}}$ | $L_{A\text{Max}}$ | $L_{A\text{Max St}}$ | $L_{A\text{eq}}$ | $L_{A\text{eq St}}$ | [dB(A)] |
|-------------------|-------------------|----------------------|------------------|---------------------|---------|
| 49,19 | 61,22 | 65,17 | 56,43 | 56,44 | |



Lärmrichtung:

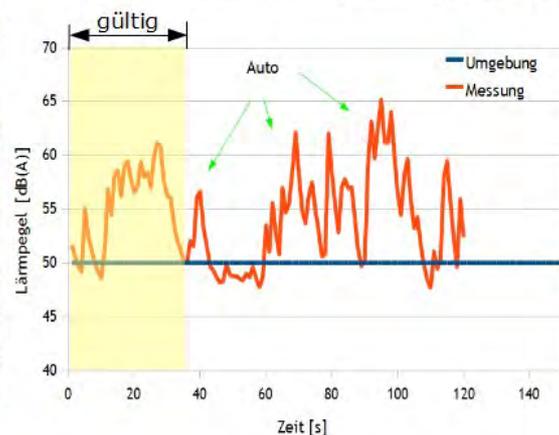


Abbildung A-2.2: Messstation 1, EC 135, Landung

MS 2, EC 135, Start

Indizes:
Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel
eq: Äquivalter Dauerschallpegel; St: inklusive Störeindrücke

| $L_{A\text{Umg}}$ | $L_{A\text{Max}}$ | $L_{A\text{Max St}}$ | $L_{A\text{eq}}$ | $L_{A\text{eq St}}$ | [dB(A)] |
|-------------------|-------------------|----------------------|------------------|---------------------|---------|
| 47,67 | 50,56 | 63,55 | 48,73 | 52,63 | |



Lärmrichtung: →

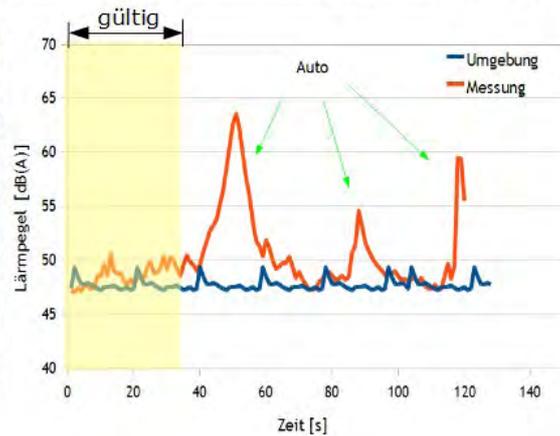


Abbildung A-2.3: Messstation 2, EC 135, Start

MS 2, EC 135, Landung

Indizes:
Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel
eq: Äquivalter Dauerschallpegel; St: inklusive Störeindrücke

| $L_{A\text{Umg}}$ | $L_{A\text{Max}}$ | $L_{A\text{Max St}}$ | $L_{A\text{eq}}$ | $L_{A\text{eq St}}$ | [dB(A)] |
|-------------------|-------------------|----------------------|------------------|---------------------|---------|
| 47,67 | 55,4 | 55,4 | 52,08 | 51,11 | |



Lärmrichtung: →

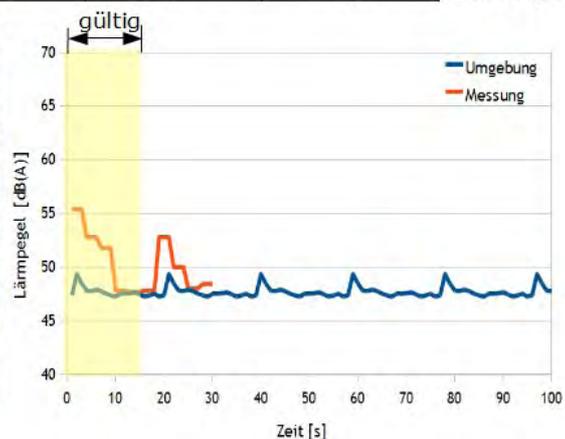


Abbildung A-2.4: Messstation 2, EC 135, Landung

MS 3, EC 135, Start

Indizes:
Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel
eq: Äquivalter Dauerschallpegel; St: inklusive Störeindrücke

| $L_{A\text{Umg}}$ | $L_{A\text{Max}}$ | $L_{A\text{Max St}}$ | $L_{A\text{eq}}$ | $L_{A\text{eq St}}$ | [dB(A)] |
|-------------------|-------------------|----------------------|------------------|---------------------|---------|
| 48,88 | 61,38 | 64,71 | 55,68 | 56,01 | |



Lärmrichtung:

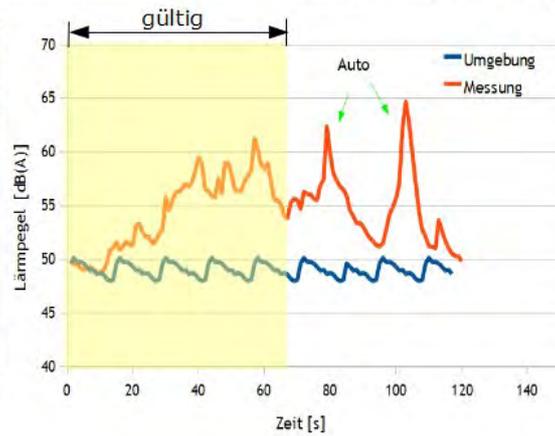


Abbildung A-2.5: Messstation 3, EC 135, Start

MS 3, EC 135, Landung

Indizes:
Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel
eq: Äquivalter Dauerschallpegel; St: inklusive Störeindrücke

| $L_{A\text{Umg}}$ | $L_{A\text{Max}}$ | $L_{A\text{Max St}}$ | $L_{A\text{eq}}$ | $L_{A\text{eq St}}$ | [dB(A)] |
|-------------------|-------------------|----------------------|------------------|---------------------|---------|
| 48,88 | - | - | - | - | |



Lärmrichtung:

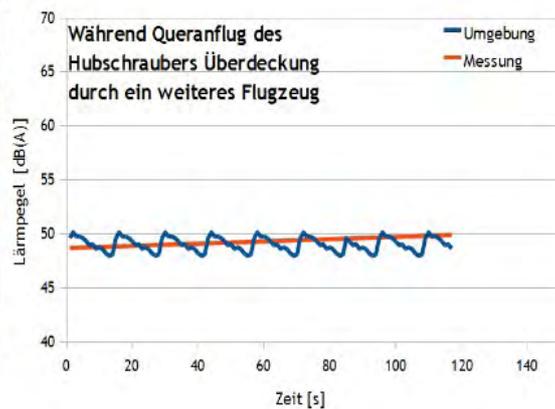
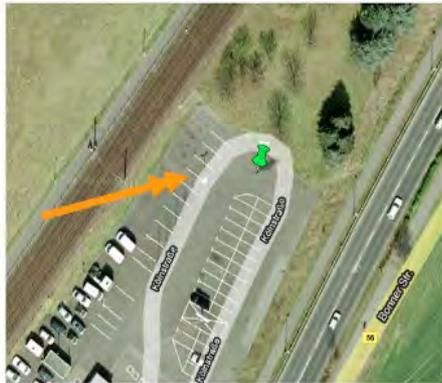


Abbildung A-2.6: Messstation 3, EC 135, Landung

MS 4, EC 135, Start

Indizes:
Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel
eq: Äquivalter Dauerschallpegel; St: inklusive Störeindrücke

| $L_{A\text{Umg}}$ | $L_{A\text{Max}}$ | $L_{A\text{Max St}}$ | $L_{A\text{eq}}$ | $L_{A\text{eq St}}$ | [dB(A)] |
|-------------------|-------------------|----------------------|------------------|---------------------|---------|
| 58,09 | 60,93 | 66,9 | 58,52 | 60,93 | |



Lärmrichtung: →

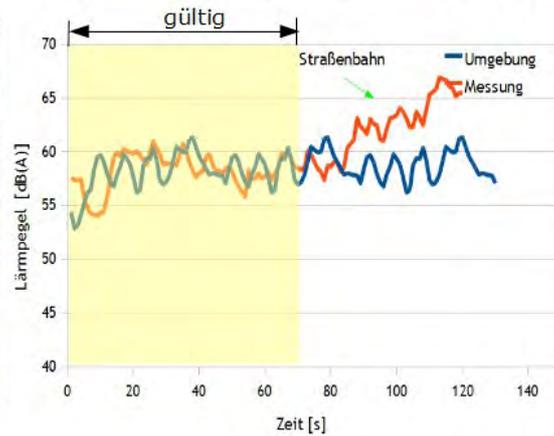


Abbildung A-2.7: Messstation 4, EC 135, Start

MS 4, EC 135, Landung

Indizes:
Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel
eq: Äquivalter Dauerschallpegel; St: inklusive Störeindrücke

| $L_{A\text{Umg}}$ | $L_{A\text{Max}}$ | $L_{A\text{Max St}}$ | $L_{A\text{eq}}$ | $L_{A\text{eq St}}$ | [dB(A)] |
|-------------------|-------------------|----------------------|------------------|---------------------|---------|
| 58,09 | - | - | - | - | |



Lärmrichtung: →

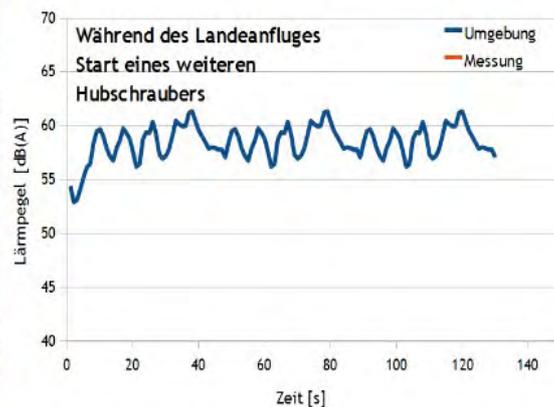


Abbildung A-2.8: Messstation 4, EC 135, Landung

MS 1, BK 117, Start

Indizes:
 Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel
 eq: Äquivalter Dauerschallpegel; St: inklusive Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ | $L_{A\text{ eq}}$ | $L_{A\text{ eq St}}$ | [dB(A)] |
|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|---------|
| 47,99 | 58,36 | 68,34 | 53,09 | 61,01 | |



Lärmrichtung: →

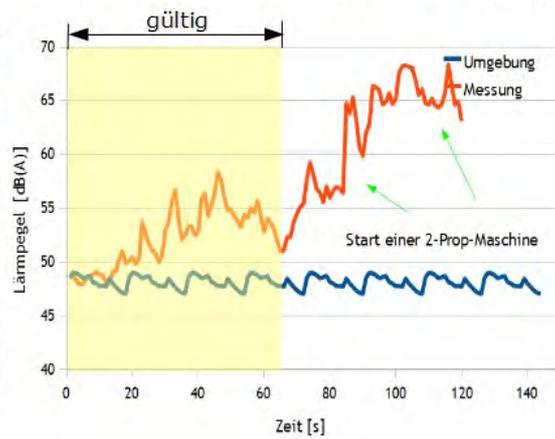


Abbildung A-2.9: Messstation 1, BK 117, Start

MS 1, BK 117, Landung

Indizes:
 Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel
 eq: Äquivalter Dauerschallpegel; St: inklusive Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ | $L_{A\text{ eq}}$ | $L_{A\text{ eq St}}$ | [dB(A)] |
|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|---------|
| 47,99 | - | - | - | - | |



Lärmrichtung: →

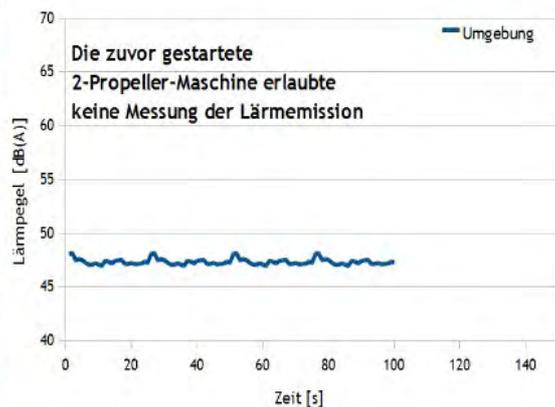


Abbildung A-2.10: Messstation 1, BK 117, Landung

MS 2, BK 117, Start

Indizes:
 Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel
 eq: Äquivalter Dauerschallpegel; St: inklusive Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ | $L_{A\text{ eq}}$ | $L_{A\text{ eq St}}$ | [dB(A)] |
|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|---------|
| 47,56 | 61,3 | 66,82 | 55,09 | 55,68 | |



Lärmrichtung:

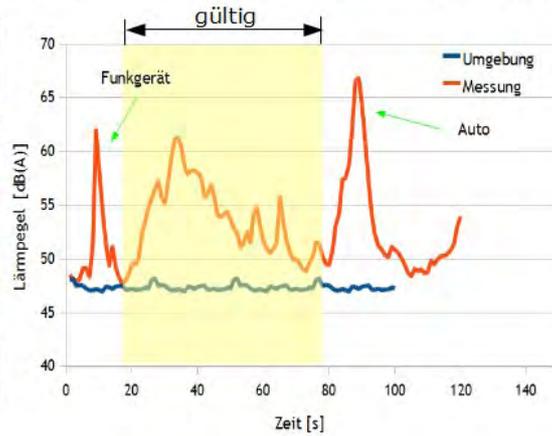


Abbildung A-2.11: Messstation 2, BK 117, Start

MS 2, BK 117, Landung

Indizes:
 Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel
 eq: Äquivalter Dauerschallpegel; St: inklusive Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ | $L_{A\text{ eq}}$ | $L_{A\text{ eq St}}$ | [dB(A)] |
|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|---------|
| 47,56 | 55,62 | 63,09 | 51,28 | 52,52 | |



Lärmrichtung:

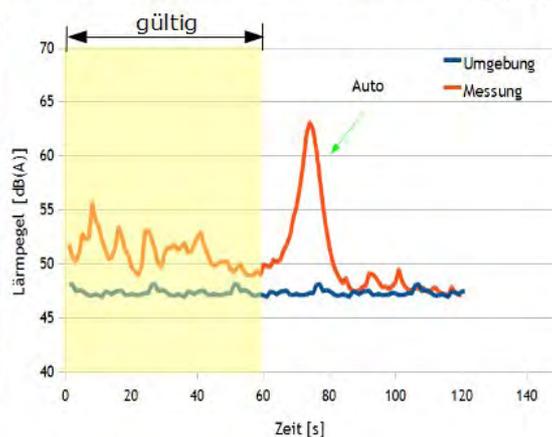


Abbildung A-2.12: Messstation 2, BK 117, Landung

MS 3, BK 117, Start

Indizes:
 Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel
 eq: Äquivalter Dauerschallpegel; St: inklusive Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ | $L_{A\text{ eq}}$ | $L_{A\text{ eq St}}$ | [dB(A)] |
|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|---------|
| 46,95 | 68,34 | 70,38 | 62,94 | 59,92 | |



Lärmrichtung:

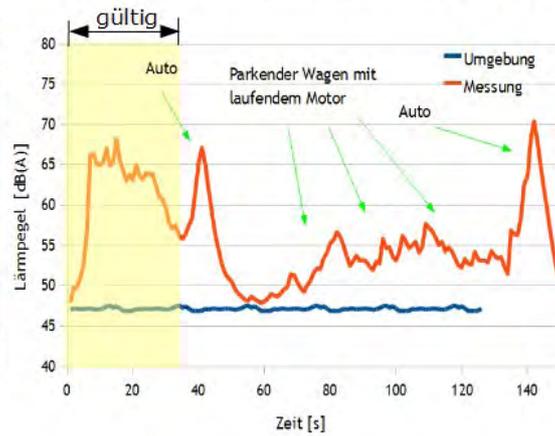


Abbildung A-2.13: Messstation 3, BK 117, Start

MS 3, BK 117, Landung

Indizes:
 Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel
 eq: Äquivalter Dauerschallpegel; St: inklusive Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ | $L_{A\text{ eq}}$ | $L_{A\text{ eq St}}$ | [dB(A)] |
|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|---------|
| 46,95 | - | 68,01 | - | 58,8 | |



Lärmrichtung:

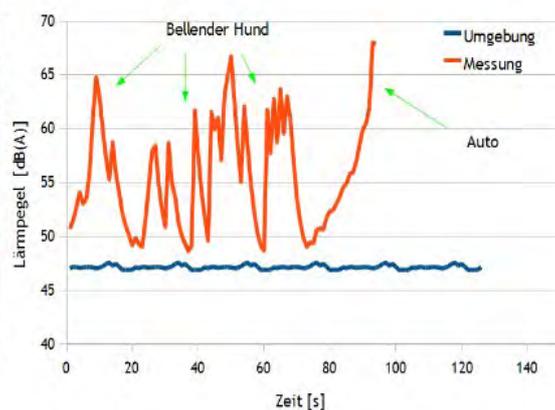


Abbildung A-2.14: Messstation 3, BK 117, Landung

MS 4, BK 117, Start

Indizes:
Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel
eq: Äquivalter Dauerschallpegel; St: inklusive Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ | $L_{A\text{ eq}}$ | $L_{A\text{ eq St}}$ | [dB(A)] |
|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|---------|
| 59,11 | 79,42 | 84,44 | 82,20 | 79,57 | |



Lärmrichtung: →

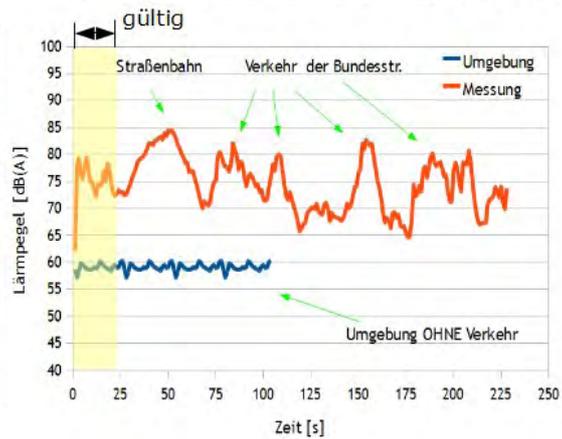


Abbildung A-2.15: Messstation 4, BK 117, Start

MS 4, BK 117, Landung

Indizes:
Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel
eq: Äquivalter Dauerschallpegel; St: inklusive Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ | $L_{A\text{ eq}}$ | $L_{A\text{ eq St}}$ | [dB(A)] |
|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|---------|
| 59,11 | - | - | - | - | |



Lärmrichtung: →



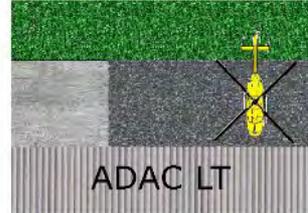
Abbildung A-2.16: Messstation 4, BK 117, Landung

A-3 Werft- und Wartungsbetrieb

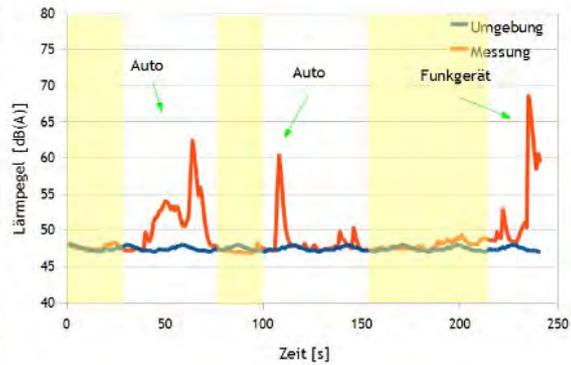
MS 2, BK 117, Standbetrieb

Indizes: Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel; St: inkl. Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ |
|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 47,5 | 47,9 | 68,6 |



[dB(A)]



Lärmrichtung:

Abbildung A-3.1: Messstation 2, BK 117, Betriebsposition 1, Standbetrieb

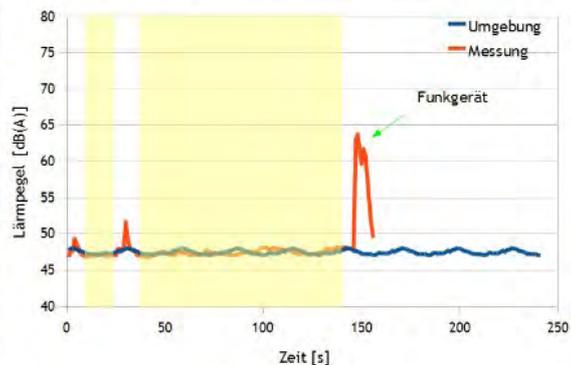
MS 2, BK 117, Standbetrieb

Indizes: Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel; St: inkl. Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ |
|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 47,5 | 48,1 | 63,8 |



[dB(A)]



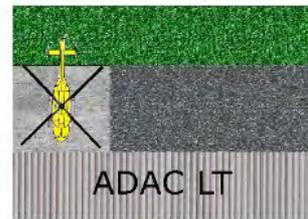
Lärmrichtung:

Abbildung A-3.2: Messstation 2, BK 117, Betriebsposition 2, Standbetrieb

MS 2, BK 117, Standbetrieb

Indizes: Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel; St: inkl. Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ |
|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 47,5 | 50,6 | 64,6 |



Lärmrichtung:

[dB(A)]

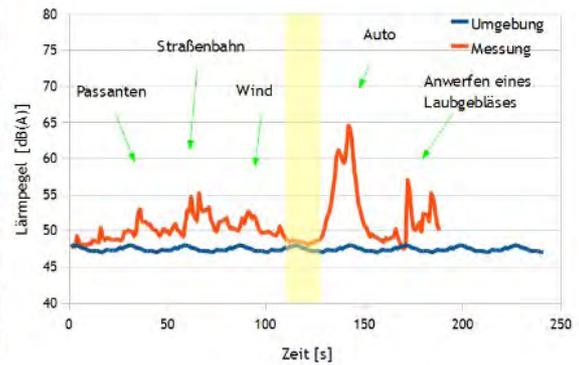
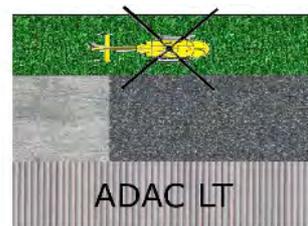


Abbildung A-3.3: Messstation 2, BK 117, Betriebsposition 3, Standbetrieb

MS 2, BK 117, Hoverbetrieb

Indizes: Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel; St: inkl. Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ |
|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 47,5 | 47,5 | 63,0 |



Lärmrichtung:

[dB(A)]

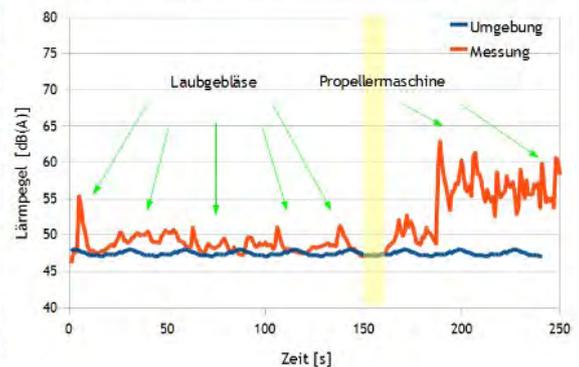


Abbildung A-3.4: Messstation 2, BK 117, Betriebsposition 4, Hoverbetrieb

MS 3, BK 117, Standbetrieb

Indizes: Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel; St: inkl. Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ |
|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 47,4 | 48,3 | 53,7 |



Lärmrichtung:

[dB(A)]

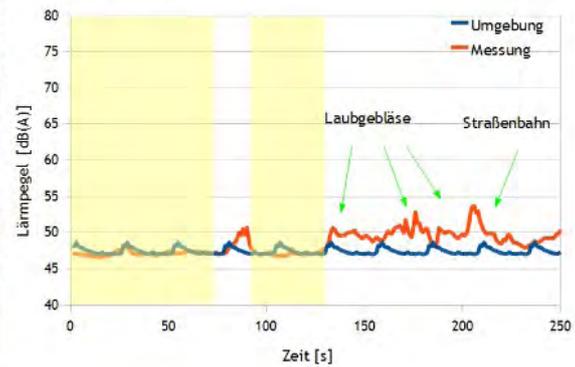


Abbildung A-3.5: Messstation 3, BK 117, Betriebsposition 1, Standbetrieb

MS 3, BK 117, Standbetrieb

Indizes: Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel; St: inkl. Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ |
|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 47,4 | 49,0 | 66,0 |



Lärmrichtung:

[dB(A)]

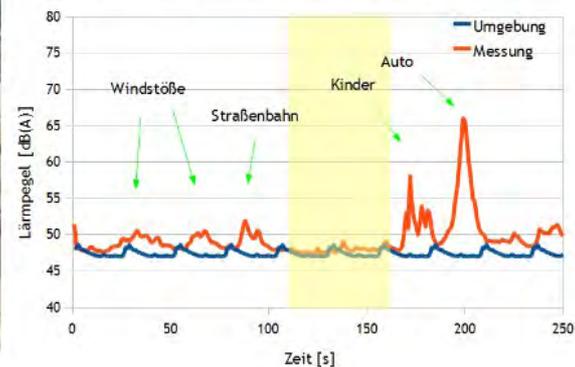
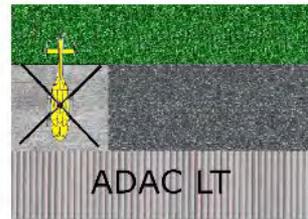


Abbildung A-3.6: Messstation 3, BK 117, Betriebsposition 2, Standbetrieb

MS 3, BK 117, Standbetrieb

Indizes: Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel; St: inkl. Störeindrücke

| L_A Umg | L_A Max | L_A Max St |
|-----------|-----------|--------------|
| 47,4 | 48,3 | 69,1 |



Lärmrichtung:

[dB(A)]

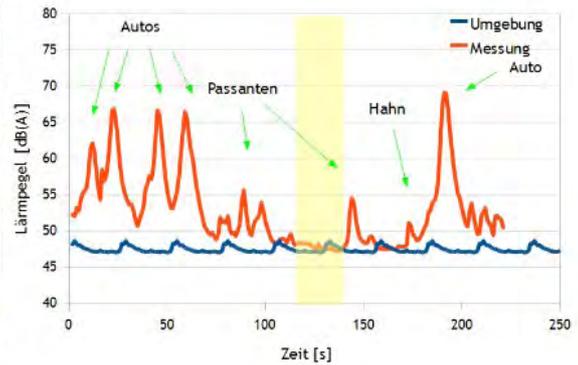


Abbildung A-3.7: Messstation 3, BK 117, Betriebsposition 3, Standbetrieb

MS 3, BK 117, Hoverbetrieb

Indizes: Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel; St: inkl. Störeindrücke

| L_A Umg | L_A Max | L_A Max St |
|-----------|-----------|--------------|
| 47,4 | 51,3 | 64,4 |



Lärmrichtung:

[dB(A)]

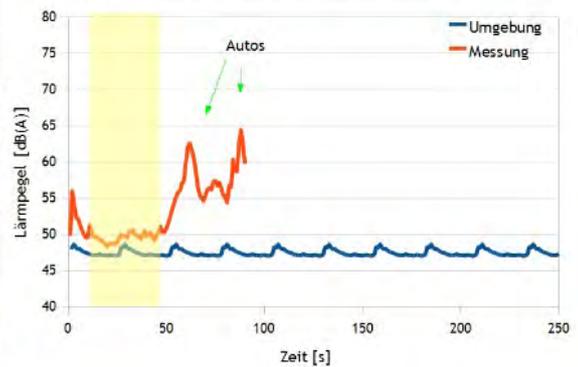
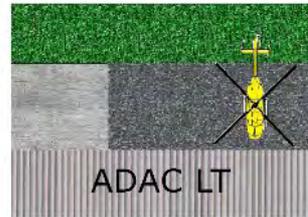


Abbildung A-3.8: Messstation 3, BK 117, Betriebsposition 4, Hoverbetrieb

MS 3, EC 135, Standbetrieb

Indizes: Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel; St: inkl. Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ |
|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 48,6 | 48,4 | 63,8 |



Lärmrichtung:

[dB(A)]

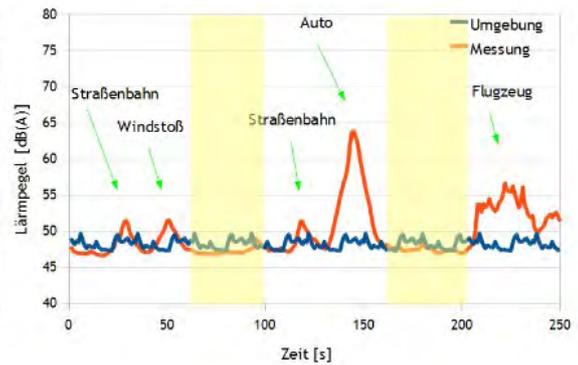


Abbildung A-3.9: Messstation 3, EC 135, Betriebsposition 1, Standbetrieb

MS 3, EC 135, Standbetrieb

Indizes: Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel; St: inkl. Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ |
|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 48,6 | 50,8 | 68,5 |



Lärmrichtung:

[dB(A)]

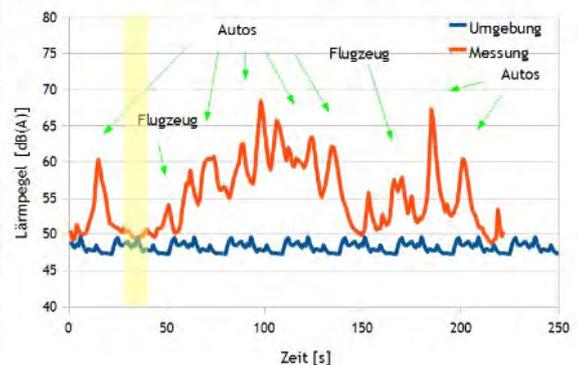
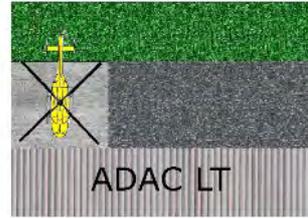


Abbildung A-3.10: Messstation 3, EC 135, Betriebsposition 2, Standbetrieb

MS 3, EC 135, Standbetrieb

Indizes: Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel; St: inkl. Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ |
|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 48,6 | 50,7 | 74,5 |



Lärmrichtung:

[dB(A)]

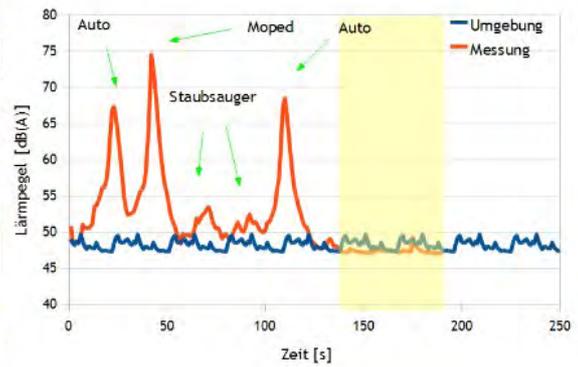
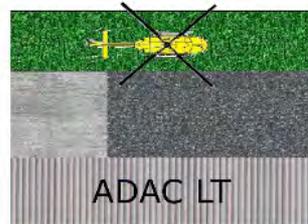


Abbildung A-3.11: Messstation 3, EC 135, Betriebsposition 3, Standbetrieb

MS 3, EC 135, Hoverbetrieb

Indizes: Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel; St: inkl. Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ |
|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 48,6 | 50,1 | 68,6 |



Lärmrichtung:

[dB(A)]

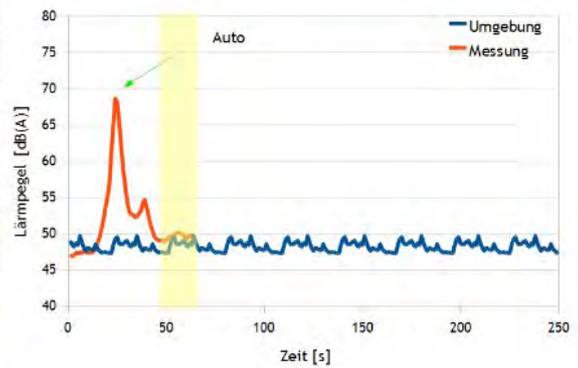
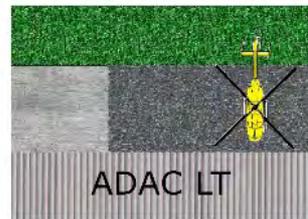


Abbildung A-3.12: Messstation 3, EC 135, Betriebsposition 4, Hoverbetrieb

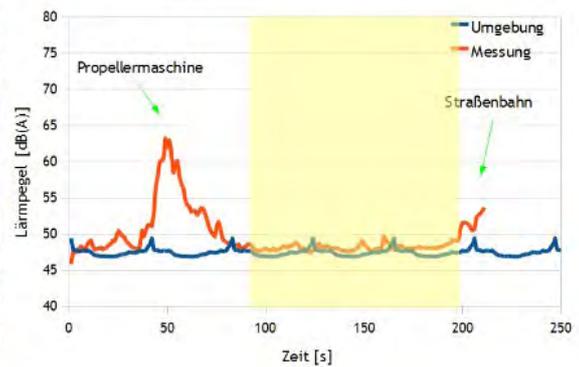
MS 5, EC 135, Standbetrieb

Indizes: Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel; St: inkl. Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ |
|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 47,4 | 48,8 | 63,3 |



[dB(A)]



Lärmrichtung:

Abbildung A-3.13: Messstation 5, EC 135, Betriebsposition 1, Standbetrieb

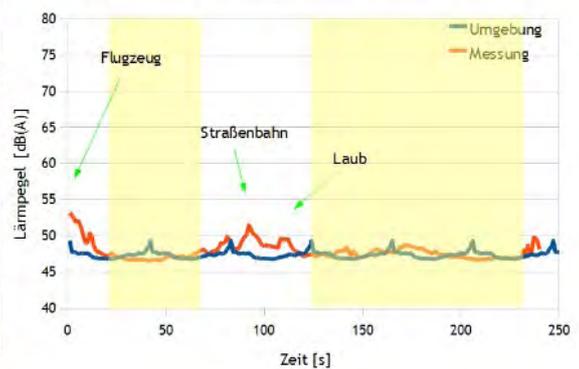
MS 5, EC 135, Standbetrieb

Indizes: Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel; St: inkl. Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ |
|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 47,4 | 48,8 | 53,3 |



[dB(A)]



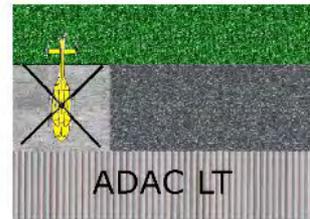
Lärmrichtung:

Abbildung A-3.14: Messstation 5, EC 135, Betriebsposition 2, Standbetrieb

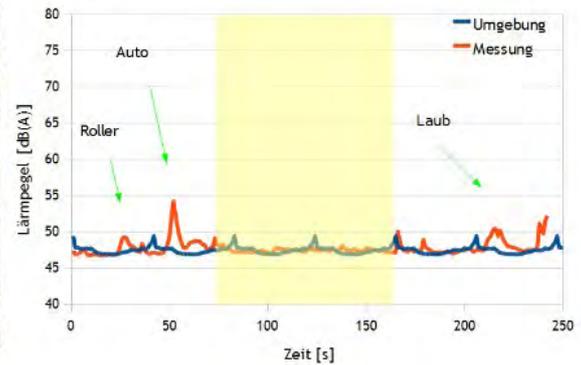
MS 5, EC 135, Standbetrieb

Indizes: Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel; St: inkl. Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ |
|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 47,4 | 48,0 | 54,2 |



[dB(A)]



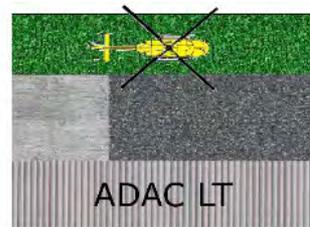
Lärmrichtung:

Abbildung A-3.15: Messstation 5, EC 135, Betriebsposition 3, Standbetrieb

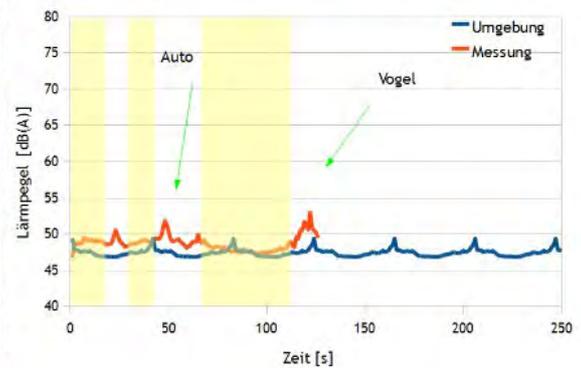
MS 5, EC 135, Hoverbetrieb

Indizes: Umg: Umgebung; Max: Spitzenpegel; St: inkl. Störeindrücke

| $L_{A\text{ Umg}}$ | $L_{A\text{ Max}}$ | $L_{A\text{ Max St}}$ |
|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 47,4 | 48,8 | 53,0 |



[dB(A)]



Lärmrichtung:

Abbildung A-3.16: Messstation 5, EC 135, Betriebsposition 4, Hoverbetrieb

A-4 Richtcharakteristik

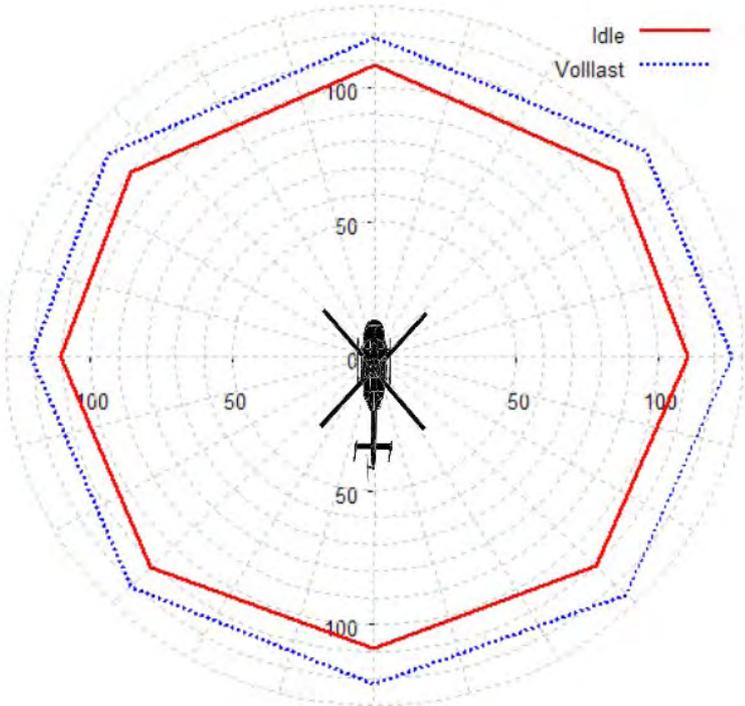


Abbildung A-4.1: Richtcharakteristik BK 117

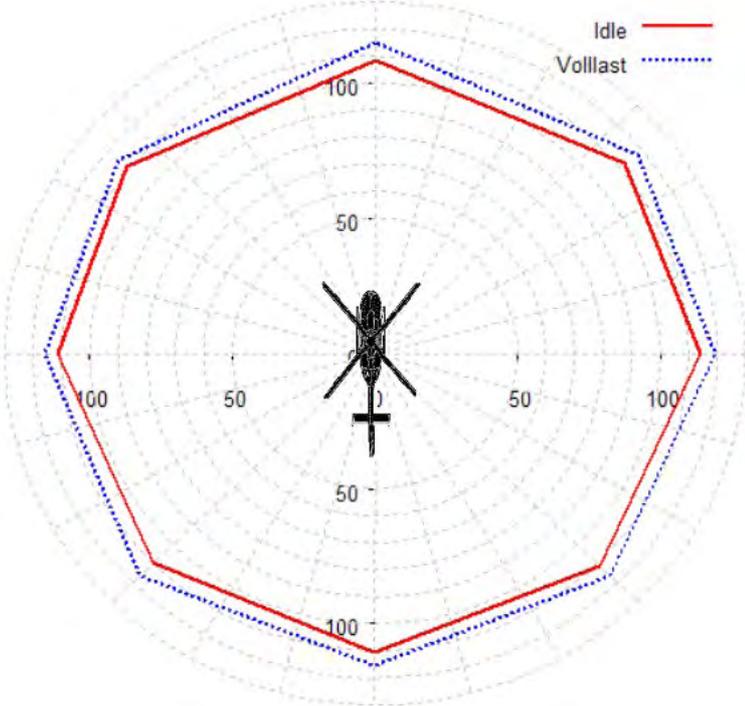


Abbildung A-4.2: Richtcharakteristik EC 135

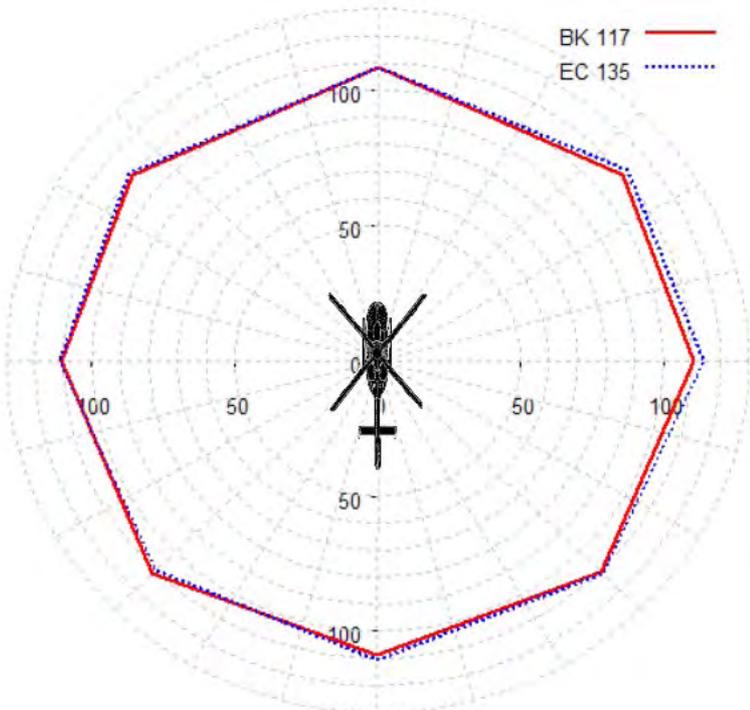


Abbildung A-4.3: Richtcharakteristik Idle

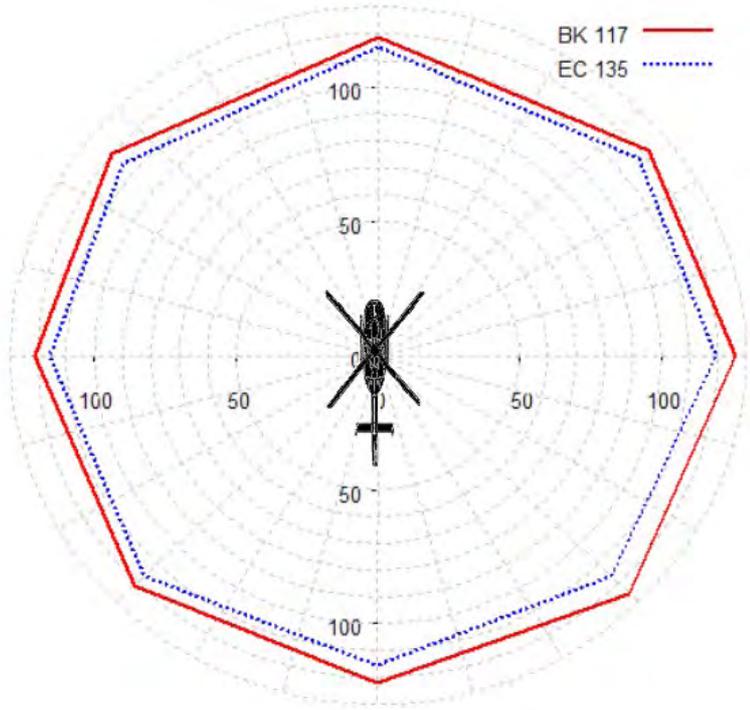


Abbildung A-4.4: Richtcharakteristik Vollast

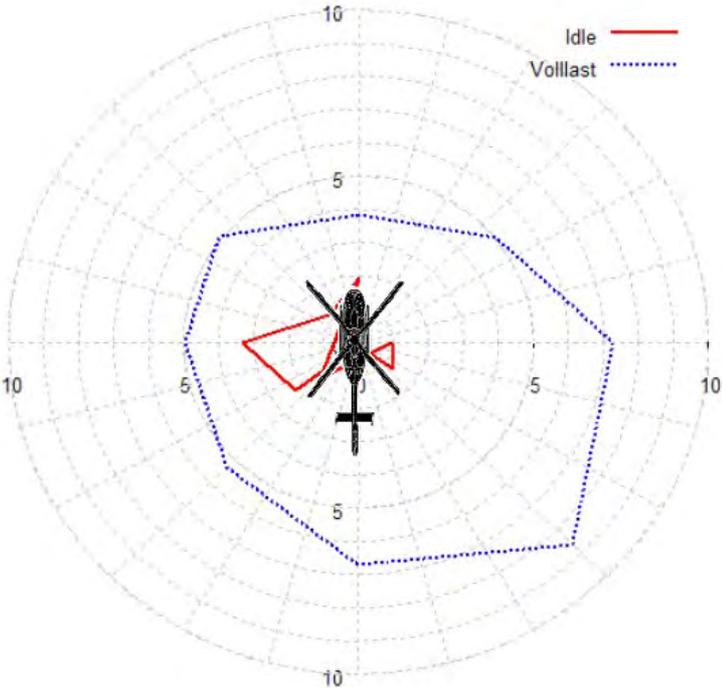


Abbildung A-4.5: Differenz Hubschrauber

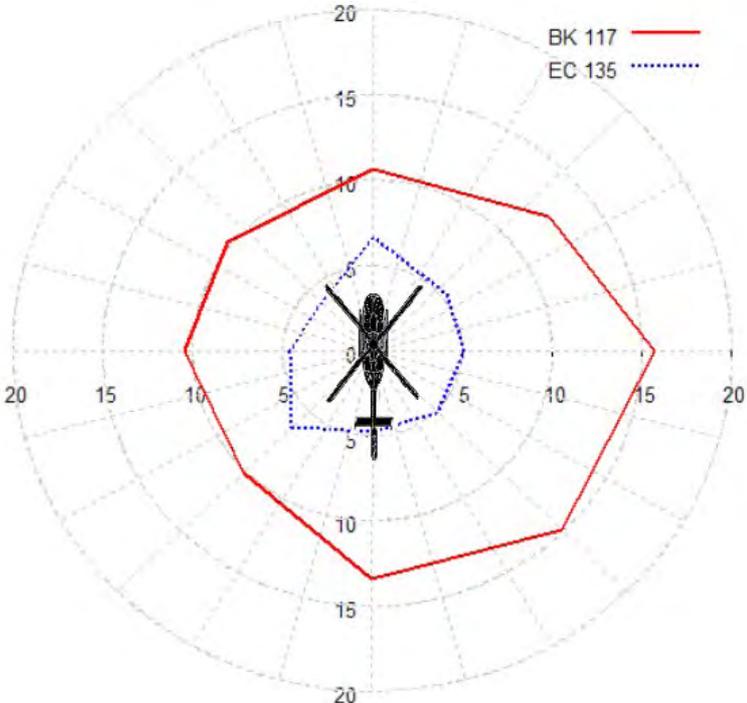


Abbildung A-4.6: Differenz Betriebszustand

A-5 Terzbandspektrum

Messpunkt 1

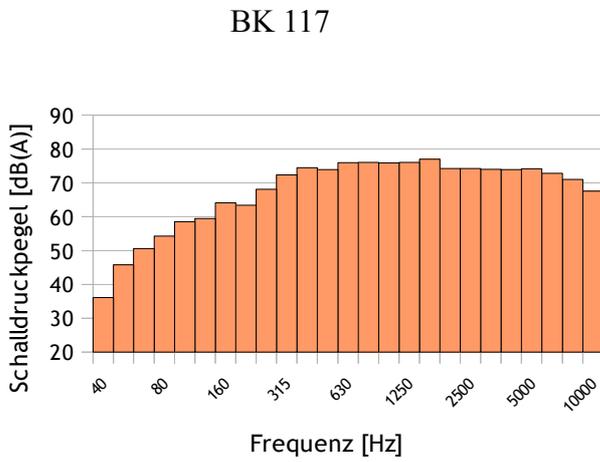


Abbildung A-5.1: MP 1, BK 117, Idle

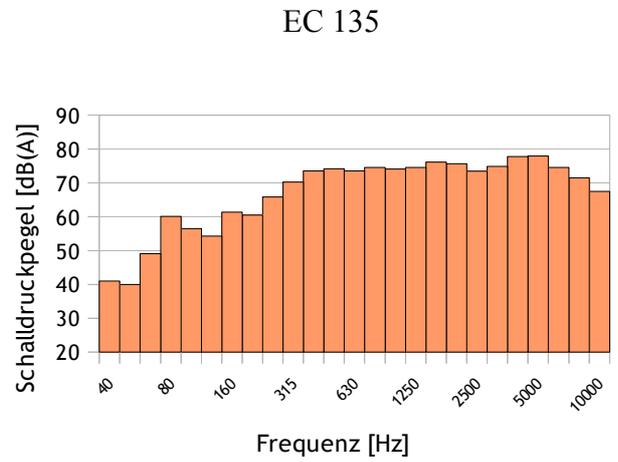


Abbildung A-5.4: MP 1, EC 135, Idle

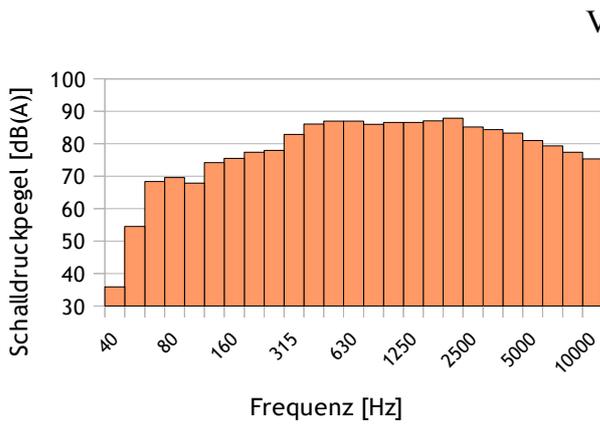


Abbildung A-5.2: MP 1, BK 117, Volllast

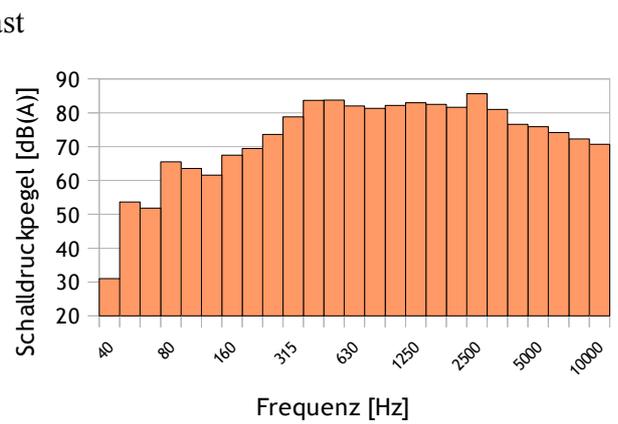


Abbildung A-5.5: MP 1, EC 135, Volllast

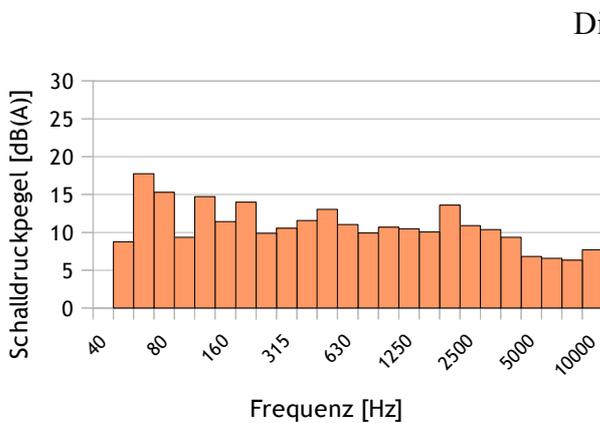


Abbildung A-5.3: MP 1, BK 117, Differenz

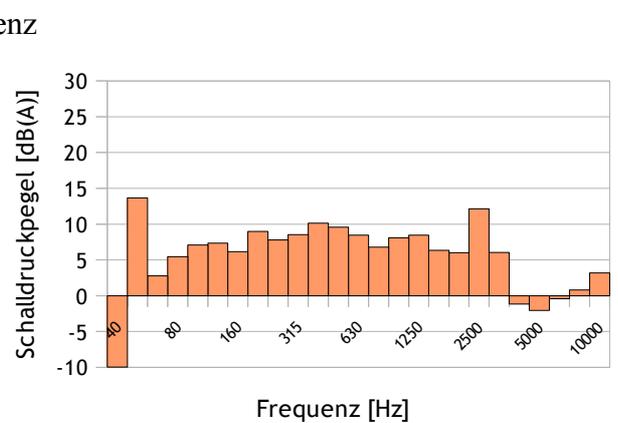


Abbildung A-5.6: MP 1, EC 135, Differenz

Messpunkt 2

BK 117

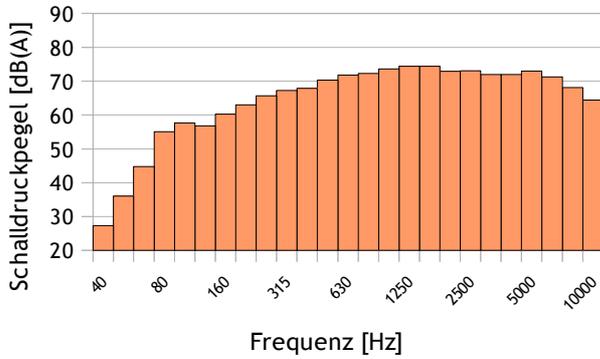


Abbildung A-5.7: MP 2, BK 117, Idle

EC 135

Idle

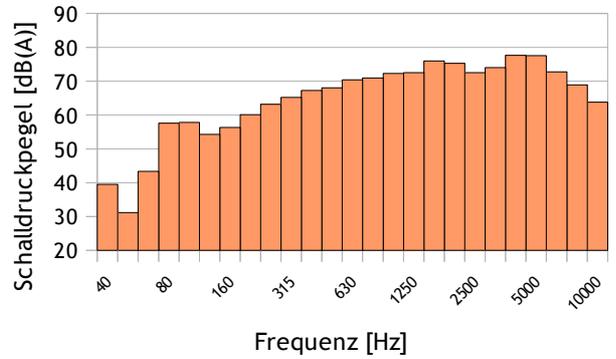


Abbildung A-5.10: MP 2, EC 135, Idle

Vollast

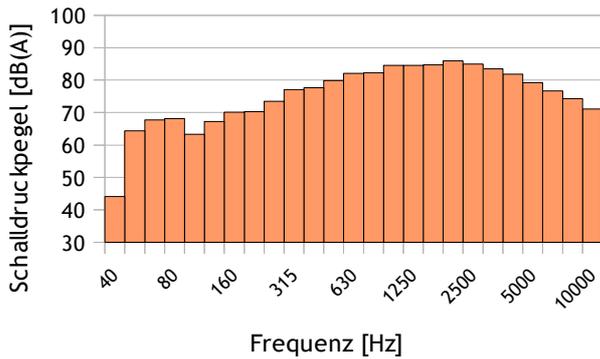


Abbildung A-5.8: MP 2, BK 117, Vollast

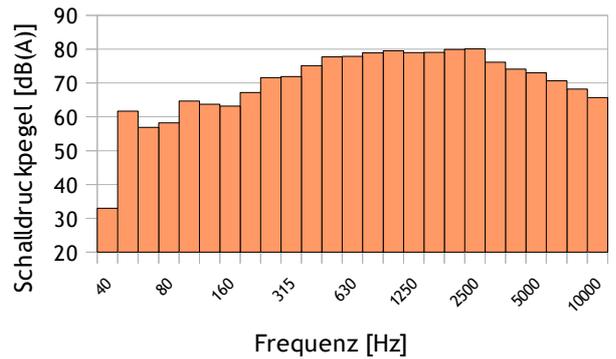


Abbildung A-5.11: MP 2, EC 135, Vollast

Differenz

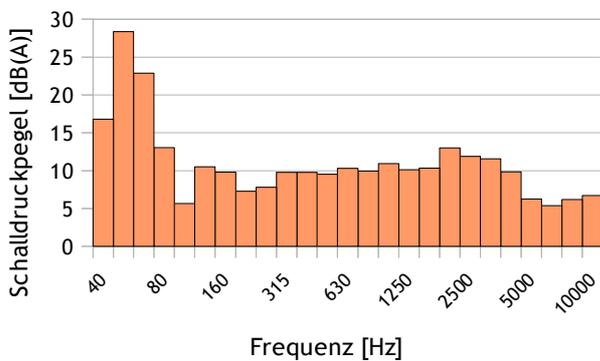


Abbildung A-5.9: MP 2, BK 117, Differenz

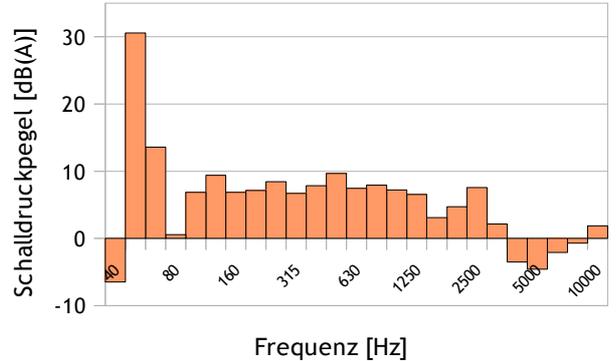


Abbildung A-5.12: MP 2, EC 135, Differenz

Messpunkt 3

BK 117

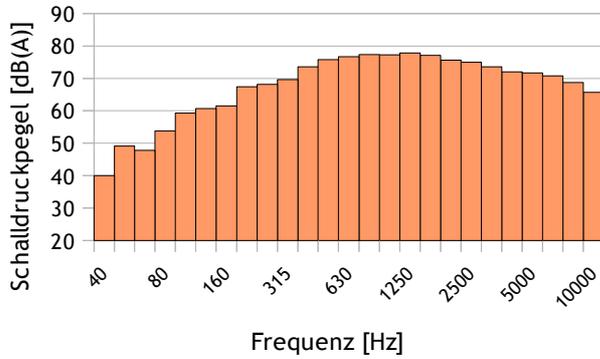


Abbildung A-5.13: MP 2, BK 117, Idle

EC 135

Idle

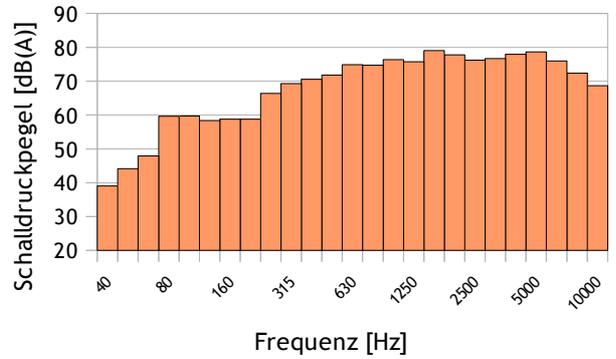


Abbildung A-5.16: MP 3, EC 135, Idle

Vollast

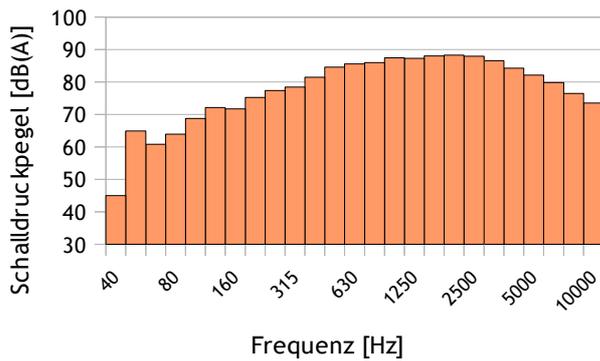


Abbildung A-5.14: MP 3, BK 117, Vollast

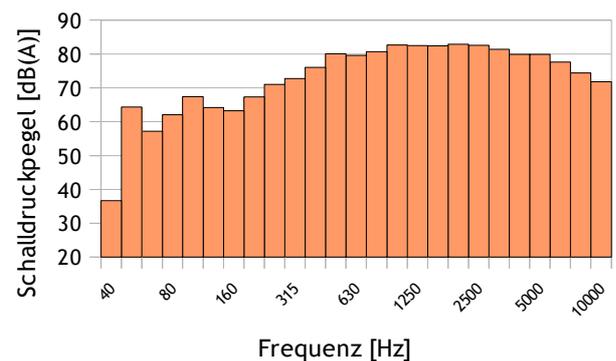


Abbildung A-5.17: MP 3, EC 135, Vollast

Differenz

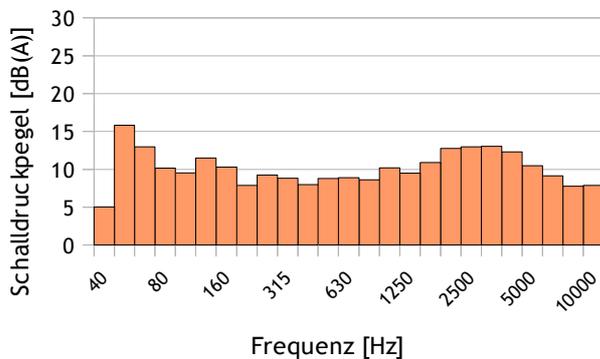


Abbildung A-5.15: MP 3, BK 117, Differenz

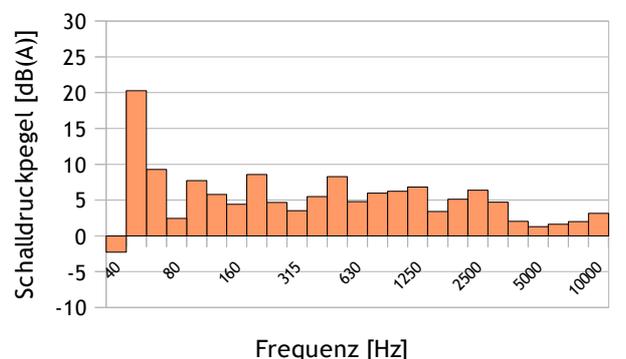


Abbildung A-5.18: MP 3, EC 135, Differenz

Messpunkt 4

BK 117

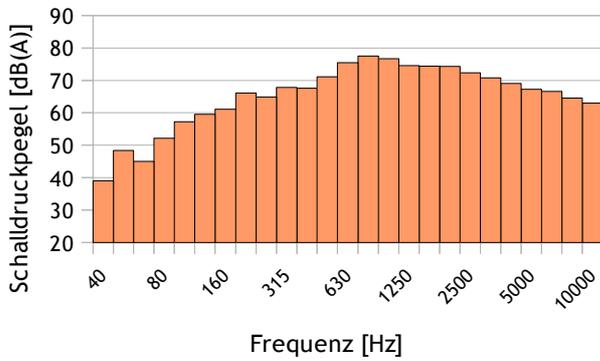


Abbildung A-5.19: MP 4, BK 117, Idle

EC 135

Idle

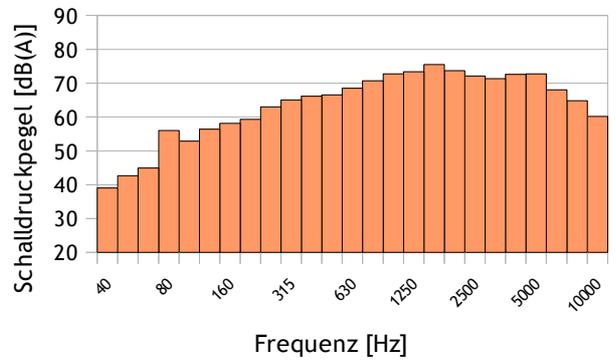


Abbildung A-5.22: MP 4, EC 135, Idle

Vollast

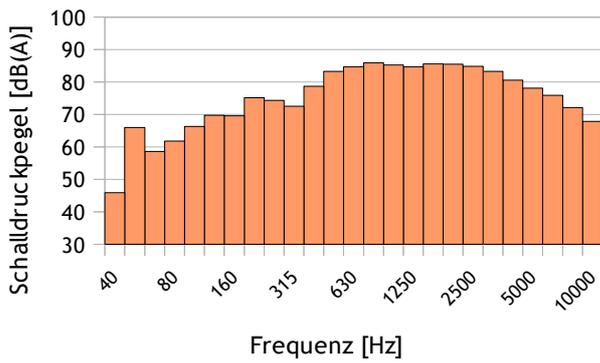


Abbildung A-5.20: MP 4, BK 117, Vollast

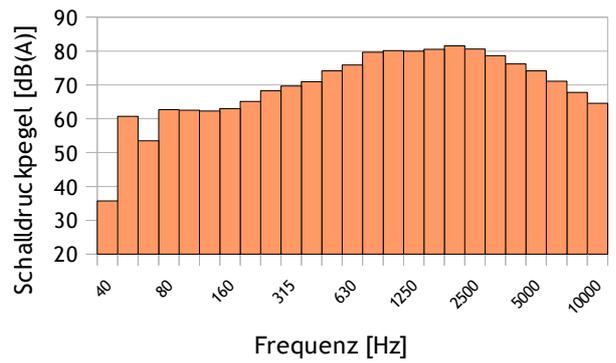


Abbildung A-5.23: MP 4, EC 135, Vollast

Differenz

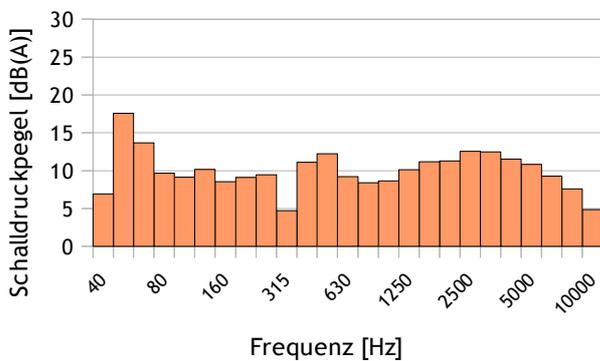


Abbildung A-5.21: MP 4, BK 117, Differenz

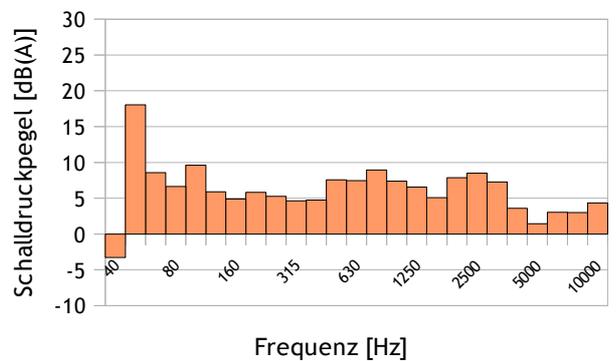


Abbildung A-5.24: MP4, EC 135, Differenz

Messpunkt 5

BK 117

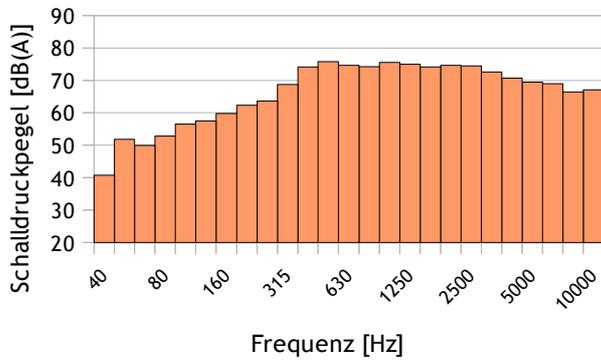


Abbildung A-5.25: MP 5, BK 117, Idle

EC 135

Idle

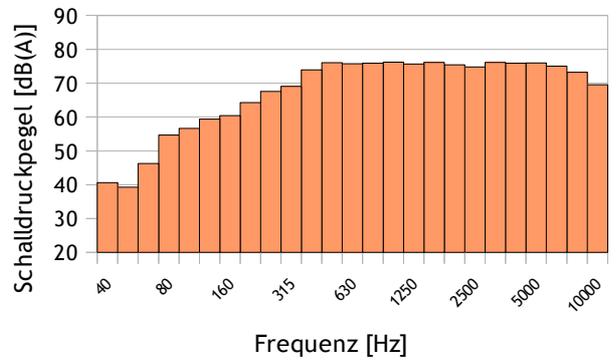


Abbildung A-5.28: MP 5, EC 135, Idle

Vollast

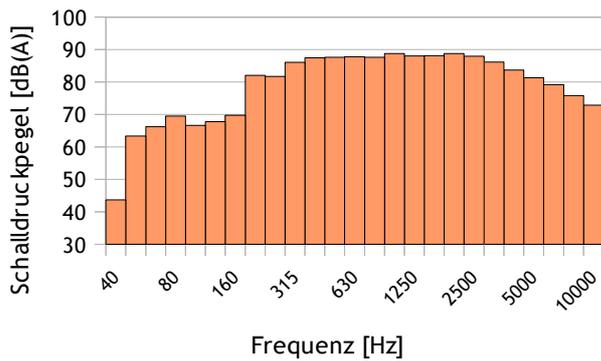


Abbildung A-5.26: MP 5, BK 117, Vollast

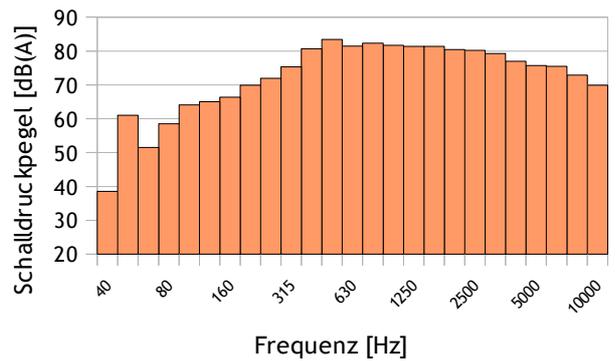


Abbildung A-5.29: MP 5, EC 135, Vollast

Differenz

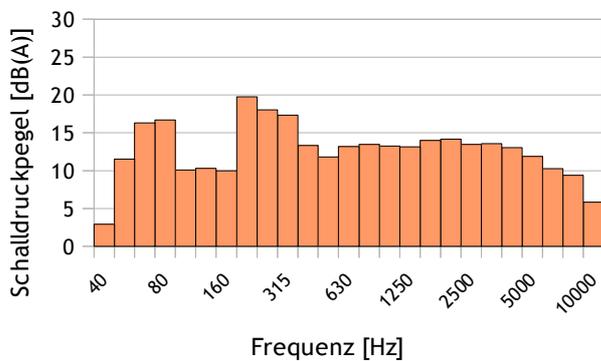


Abbildung A-5.27: MP 5, BK 117, Differenz

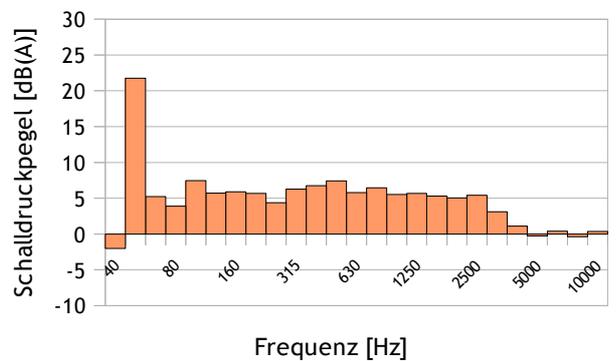


Abbildung A-5.30: MP 5, EC 135, Differenz

Messpunkt 6

BK 117

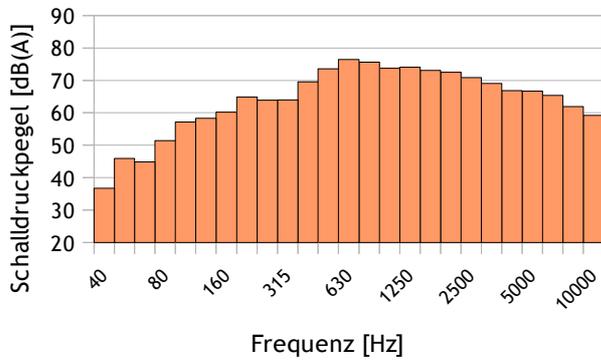


Abbildung A-5.31: MP 6, BK 117, Idle

EC 135

Idle

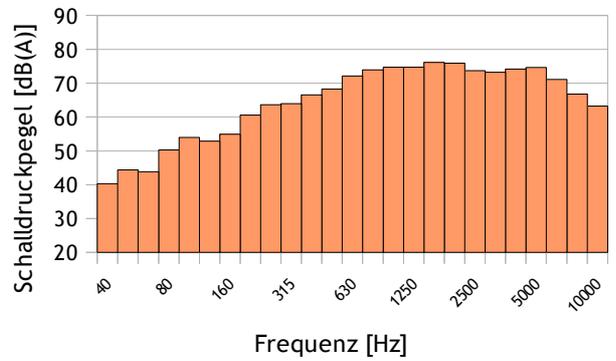


Abbildung A-5.34: MP 6, EC 135, Idle

Vollast

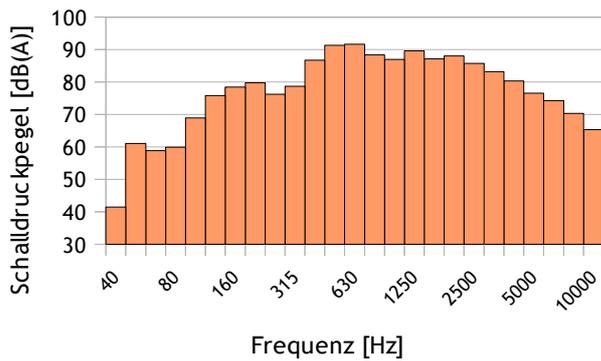


Abbildung A-5.32: MP 6, BK 117, Vollast

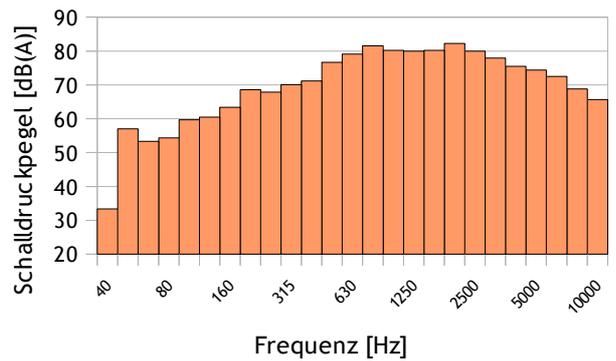


Abbildung A-5.35: MP 6, EC 135, Vollast

Differenz

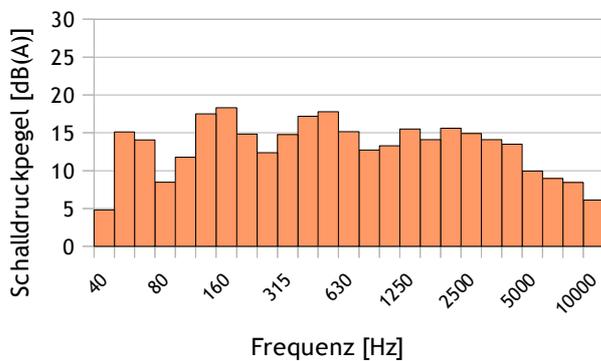


Abbildung A-5.33: MP 6, BK 117, Differenz

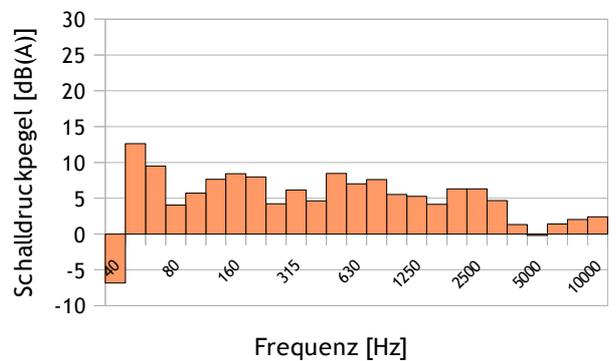


Abbildung A-5.36: MP 6, EC 135, Differenz

Messpunkt 7

BK 117

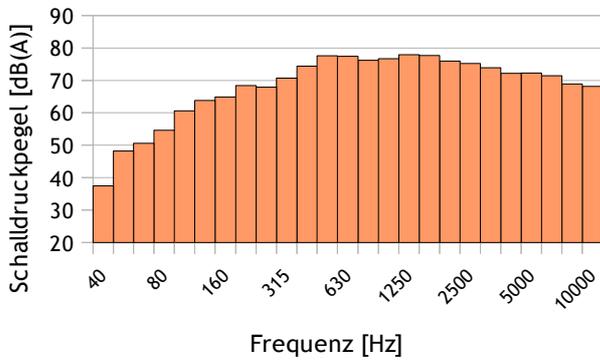


Abbildung A-5.37: MP 7, BK 117, Idle

EC 135

Idle

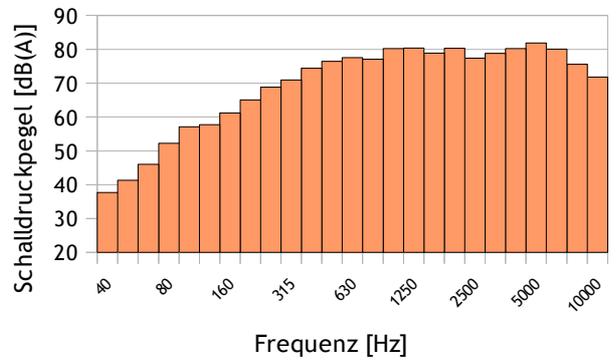


Abbildung A-5.40: MP 7, EC 135, Idle

Vollast

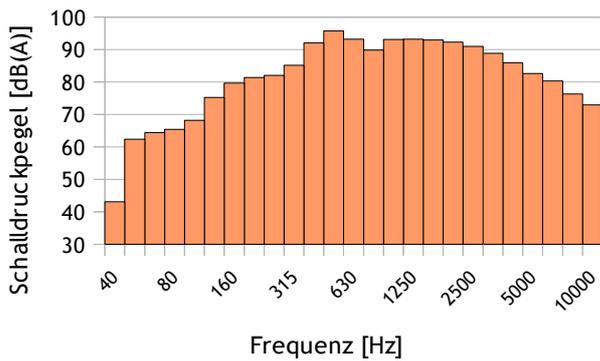


Abbildung A-5.38: MP 7, BK 117, Vollast

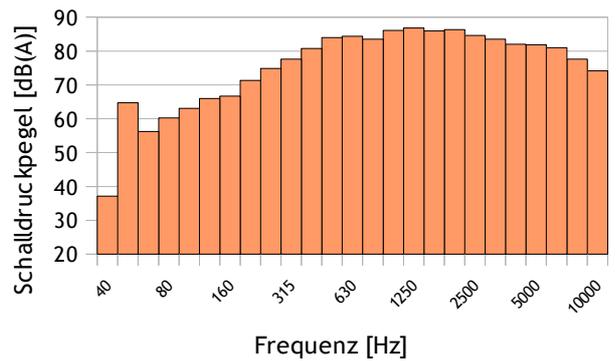


Abbildung A-5.41: MP 7, EC 135, Vollast

Differenz

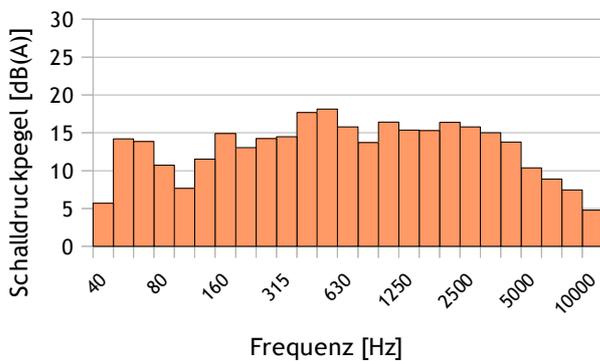


Abbildung A-5.39: MP 7, BK 117, Differenz

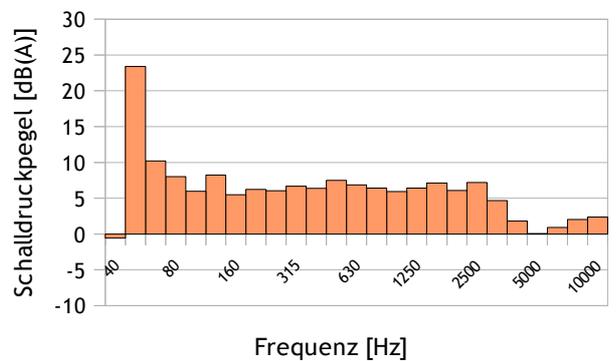


Abbildung A-5.42: MP 7, EC 135, Differenz

Messpunkt 8

BK 117

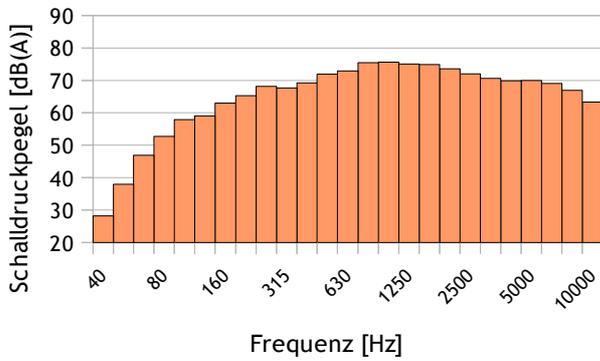


Abbildung A-5.43: MP 8, BK 117, Idle

EC 135

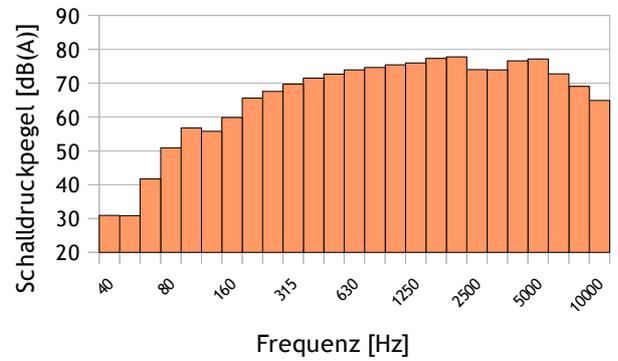


Abbildung A-5.46: MP 8, EC 135, Idle

Volllast

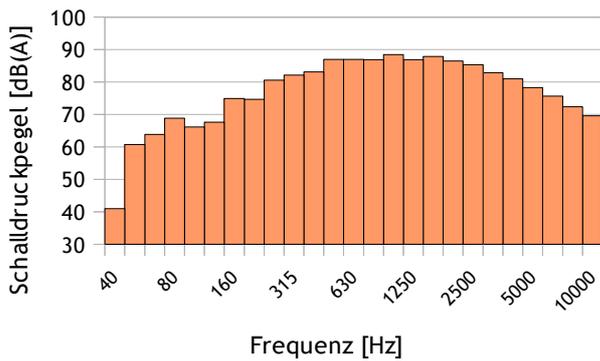


Abbildung A-5.44: MP 8, BK 117, Volllast

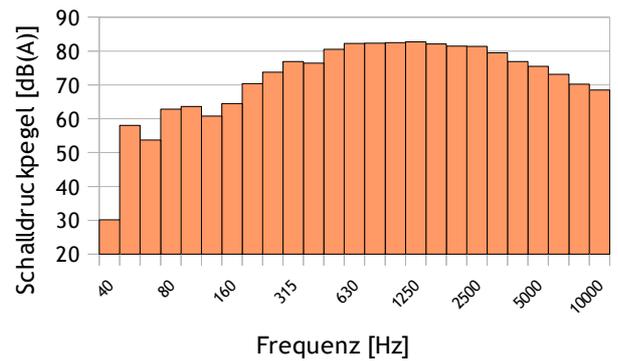


Abbildung A-5.47: MP 8, EC 135, Volllast

Differenz

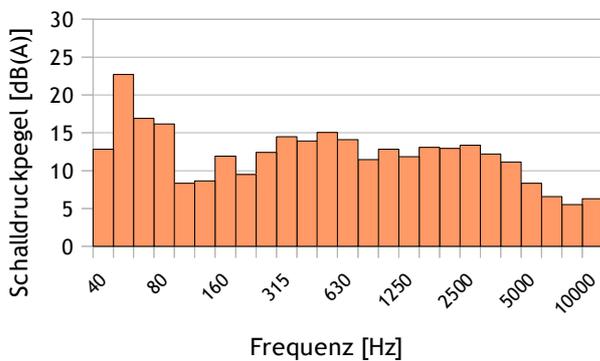


Abbildung A-5.45: MP 8, BK 117, Differenz

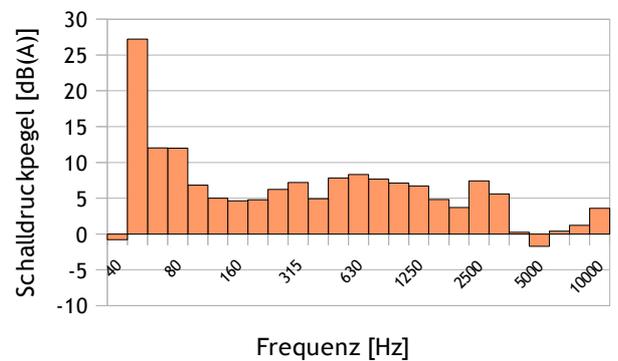


Abbildung A-5.48: MP 8, EC 135, Differenz