

Aufbau und Betrieb einer Infraschallquelle

Detlef Krahe¹, Alexander Alaimo Di Loro², Ulrich Möhler², Christian Eulitz³,
Uwe Müller⁴ and Dirk Schreckenber⁵

¹Bergische Universität Wuppertal, krahe@wuppertal.de

²Möhler + Partner Ingenieure AG, info@mopa.de

³DLR Köln, Uwe.Mueller@dlr.de

⁴ZEUS GmbH, schreckenber@zeusgmbh.de

Einleitung

Der Aufbau und Betrieb der Infraschallquelle ist Teil des Projektes „Lärmwirkungen von Infraschallimmissionen“, das von Umweltbundesamt beauftragt wurde (UFOPLAN 2014; Forschungskennzahl: 3714 51 100 0). Andere Details zu diesem Projekt und Ergebnisse werden zu gegebener Zeit veröffentlicht.

Anspruch und Ziel bei der Konzeption der Infraschallquelle war - bei Pegeln um die Hörschwelle - eine Schallerzeugung mit möglichst geringen nichtlinearen Verzerrungen zu erreichen. Bei so anspruchsvollen Hörbedingungen müssen zudem akustische Störungen jeglicher Art vermieden werden. Deshalb ist für die Höruntersuchung ein Haus (Abb. 1) in sehr ruhiger Umgebung auf einem ehemaligen Marineflughafen angemietet und für die Untersuchung präpariert worden. Ein separates Haus bietet den Vorteil, alle Geräusche im Haus während des Hörversuches vermeiden zu können, seien es Laufgeräusche von Personen oder Anlagen.



Abbildung 1: Das für die Untersuchung angemietete Gebäude

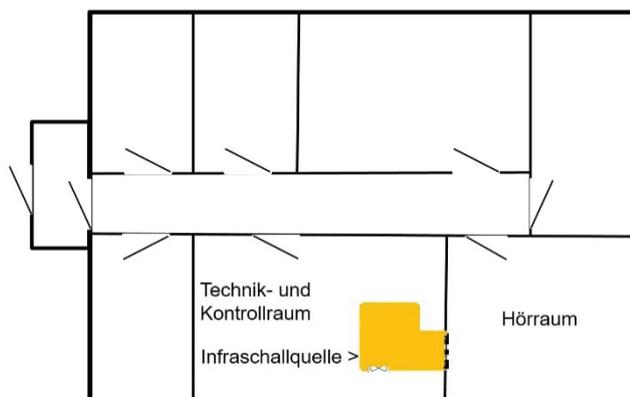


Abbildung 2: Skizze des Grundrisses des Gebäudes

Ausstattung des Gebäudes

Wie der Skizze in Abb. 2 zu entnehmen ist, enthält das Gebäude neben Räumen zu verschiedenen Zwecken einen Technik- und Kontrollraum und einen Hörraum. Im ersteren befindet sich auch die Infraschallquelle, die durch eine Öffnung in der gemeinsamen Wand den Hörraum beschallt. Abbildung 3 zeigt den Teil des Technik- und Kontrollraumes, der für die Erzeugung und Messung des Infraschalls belegt ist. In einem anderen Teil befinden sich Geräte für die Erfassung und Abspeicherung der EEG-Signale. Im Hintergrund ist der Aufbau der Infraschallquelle zu sehen.



Abbildung 3: Teil des Technik- und Kontrollraumes mit Infraschallquelle

Der Hörraum (Abb. 4) ist so angelegt, dass er sowohl von der Akustik wie von der Optik her einen gewissen Wohnzimmercharakter hat. Die Probanden haben die Möglichkeit aus dem Fenster zu sehen. Dieses Szenario ist gezielt so angestrebt worden, damit die Probanden, unter denen sich auch empfindliche Menschen befinden können, möglichst nicht durch eine ungewohnte Umgebung (Labor oder z.B. Bunker) bei den psychologisch orientierten Untersuchungen beeindruckt und negativ beeinflusst werden.



Abbildung 4: Teil des Hörraumes

Die Öffnung zur Infraschallquelle befindet sich hinter dem Regal, um eventuelle Irritationen durch die vermeintliche Ortung der Quelle zu vermeiden. Mit Blick auf das Regal sitzt der Proband / die Probandin an dem Tisch, um während des Hörversuchs u.a. Fragebogen auszufüllen. In Kopfnähe befindet sich bei der Untersuchung ein Mikrofon, mittels dessen die Beschallung erfasst und kontrolliert wird.

Aufbau der Infraschallquelle

Wesentlicher Bestandteil der Infraschallquelle ist der Rotary Subwoofer TRW-17 der Fa. Eminent Technology, im Prinzip ein Ventilator, der mittels eines Signals seine Flügelstellung verändern und damit die Luft vor- und zurückbewegen kann. Die Volumenschnelle und daraus folgend der Schalldruckpegel hängen von der konstant gehaltenen Drehzahl und von der Steilheit der Flügelstellung ab, die durch das Audiosignal bestimmt ist. Zur Vermeidung eines akustischen Kurzschlusses und zur Dämpfung von Betriebsgeräuschen des Motors sowie von höherfrequenten Luftabrisssgeräuschen wird von dem Hersteller ein Aufbau vorgeschlagen, in dem der TRW-17 die Luftbewegung einleitet. Abbildung 5 (links) zeigt, wie der TRW-17 am Aufbau positioniert ist, Abbildung 5 (rechts) den Aufbau im Schema, wie er vom Hersteller empfohlen wird.

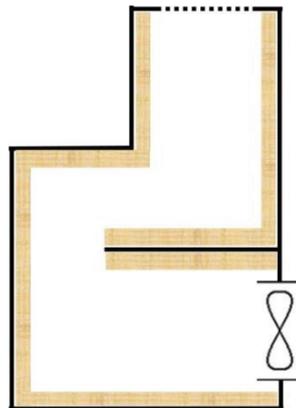


Abbildung 5: Positionierung des TRW-17 am Aufbau (links) und Schema des Aufbaus nach Herstellervorgaben; wie die Wände sind auch Boden und Decke mit schalldämpfendem Material zu belegen.

Neben der Belegung mit schalldämpfendem Material soll der Aufbau durch eine Anzahl von Querstreben versteift sein. In dieser Ausführung wurde der TRW-17 bei einem Kunden des Herstellers in den USA einem Test unterzogen. Zur Prüfung wurde u.a. ein Sinussignal mit der Frequenz 10 Hz benutzt, das der TRW-17 mit einem Schalldruckpegel von 100 dB abstrahlte. Abbildung 6 zeigt das dabei aufgenommene FFT-Spektrum.

Es ist eine Vielzahl von Oberwellen zu erkennen, die sicher nicht unter die Hörschwelle fallen. So hat z.B. die 50 Hz-Komponente einen relativen Pegel von -38 dB, absolut demnach einen Pegel von 62 dB. Die Hörschwelle nach DIN 45680 liegt aber bei ca. 40 dB. In dieser Form wäre der TRW-17 also nicht für die geplante Untersuchung zu verwenden. Trotzdem fiel die Entscheidung für das Gerät, da in Kenntnis gewisser technischer Maßnahmen eine deutliche Verbesserung als machbar erschien.

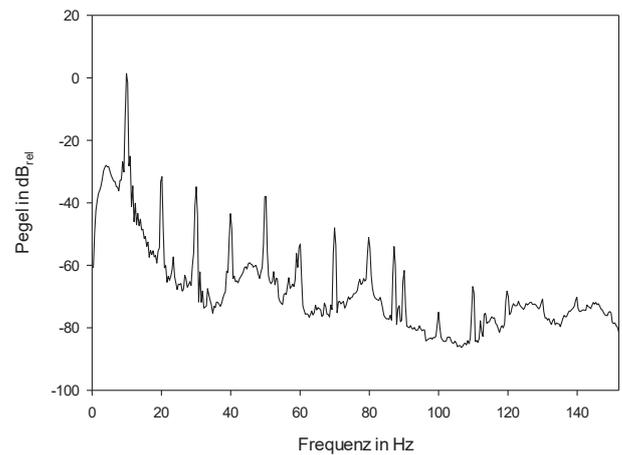


Abbildung 6: FFT-Spektrum bei Anlegen eines 10 Hz Sinussignal, das mit 100 dB wiedergegeben war, gemessen bei einer Prüfung des TRW-17 mit einem vom Hersteller vorgegebenen Aufbau

Verbesserung der akustischen Signalqualität

Zur Verbesserung der Signalqualität wurden passive Maßnahmen im Aufbau vorgenommen sowie ein aktives System in den Aufbau integriert.

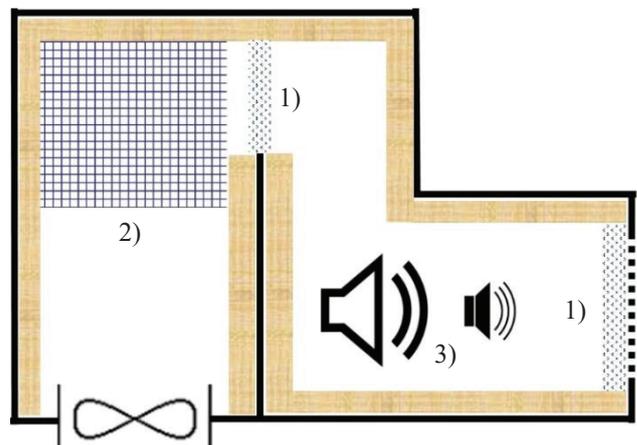


Abbildung 7: Modifizierter Aufbau der Infraschallquelle: als passive Maßnahmen Einfügen von offenporigem Material in den Durchgängen 1) und einem größeren Volumen absorbierendem Materials 2); als aktive Maßnahme Integration eines Gegenschallsystems 3)

Als eine passive Maßnahme ist in den Durchgängen offenporiges Material eingefügt worden, das teils schalldämpfend, teils schalldämmend insbesondere auf höhere Frequenzkomponenten wirkt. Als weitere passive Maßnahme ist ein größeres Volumen mit absorbierendem Material zur Dämpfung von sich andeutenden Resonanzen eingefügt worden. Die werden nicht durch ein Mitschwingen der Wände des Aufbaus hervorgerufen, wie Messungen gezeigt haben, sondern durch ein Anblasen des eingeschlossenen Luftvolumens (Helmholtz-Resonator), wie eine Berechnung offengelegt hat. Die angesprochenen Querverstrebungen machen deshalb auch keinen Sinn und sind weggelassen worden.

Das Gegenschallsystem ist darauf ausgelegt, die Obertöne und diskrete Komponenten in Form von Mischprodukten durch destruktive Interferenz im Pegel wesentlich zu senken,

also die nichtlineare Verzerrung zu kontrollieren. Seine Funktion wird deshalb im Folgenden mit Active Distortion Control (ADC) bezeichnet. Abbildung 8 stellt die drei eingesetzten Beschallungskomponenten gegenüber, Abbildung 9 den konzeptionellen Aufbau des ADC-Systems.



Abbildung 8: Eingesetzte Beschallungskomponenten

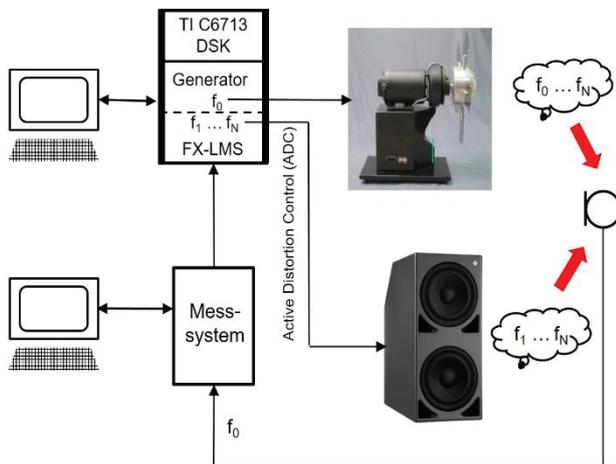


Abbildung 9: Konzeptioneller Aufbau des ADC-Systems

Kern des ADC-Systems ist ein Signalprozessorkit (DSK) TI C6713. Vor der jeweiligen Präsentation eines Signals (Stimulus) wird das Sollsignal mit der Frequenz f_0 und das Verzerrungssignal mit den bekannten Verzerrungsprodukten (Komponenten mit den Frequenzen f_1 bis f_N in den DSP geladen. Dadurch, dass beide Signale gleich getaktet werden, wird die strenge Synchronität beider Signale bei der Abstrahlung durch den TRW-17, der aber nur mit dem Sollsignal angesteuert wird, berücksichtigt bzw. genutzt.

Der Gegenschalllautsprecher KH 870 wird nur mit dem Verzerrungssignal gespeist. Das Ergebnis der Überlagerung beider Signale wird nahe beim Probanden mit einem Mikrophon kontrolliert, dessen Signal durch ein Messsystem geschleift wird, das alles protokolliert und das Signal an den Signalprozessor weiterleitet. Dort wird es nach dem FX-LMS-Algorithmus verarbeitet. Dieser regelt den Betrag und die Phase jeder einzelnen Komponente des Verzerrungssignals so nach, dass die Kreuzkorrelation zwischen dem Mikrofonsignal und dem Verzerrungssignal minimiert wird. Das ist erreicht, wenn das Mikrofonsignal nur noch die Komponenten mit der Frequenz f_0 enthält.

Messergebnisse

Als Stimuli sind Sinussignale mit der Frequenz 5 Hz und dem Schalldruckpegel 105 dB, 10 Hz / 95 dB, 18 Hz / 85 dB gewählt worden sowie ein mit 1 Hz modulierte Sinussignal mit der Trägerfrequenz 3 Hz und dem Schalldruckpegel 105 dB. Abbildung 10 zeigt das Ergebnis mit 10 Hz und abgeschaltetem ADC-System. Es kommen also zunächst nur die passiven Verbesserungen am Aufbau zu Geltung.

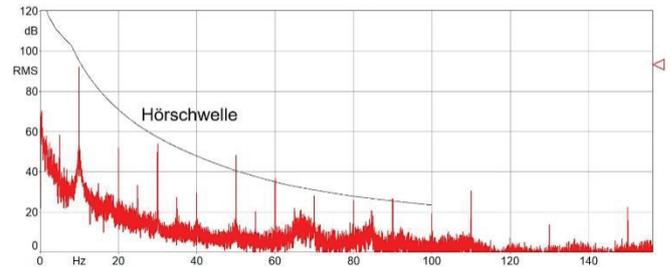


Abbildung 10: Gemessenes FFT-Spektrum bei Sinussignal mit der Frequenz 10 Hz und dem Schalldruckpegel 95 dB; ADC-System abgeschaltet; Hörschwelle nach DIN 45680 und Extrapolation unterhalb 8 Hz

Bei dem Vergleich mit dem Spektrum in Abb. 6 zeigt sich eine deutliche Absenkung der Anteile zu höheren Frequenzen hin sowie der Anteile, bei denen sich Resonanzen andeuten. Um 65 Hz und 85 Hz sind noch Reste zu erkennen. Die diskreten Frequenzkomponenten haben dagegen ähnliche Pegel wie in Abb. 6. Mit Einschalten des ADC-Systems werden diese so stark gemindert, dass die Störkomponenten nun deutlich unter der Hörschwelle liegen (Abb. 11).

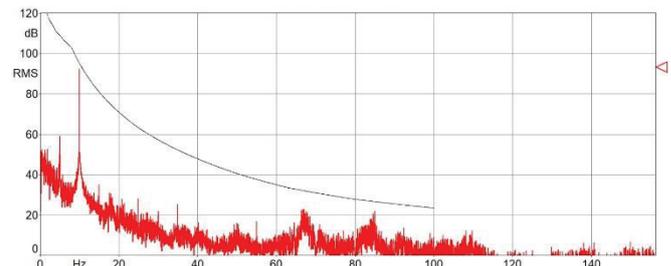


Abbildung 11: Gemessenes FFT-Spektrum bei Sinussignal mit der Frequenz 10 Hz und dem Schalldruckpegel 95 dB; ADC-System eingeschaltet

Abbildungen 12 a) und 12 b) zeigen entsprechende Spektren für die Frequenz 5 Hz und dem Schalldruckpegel 105 dB.

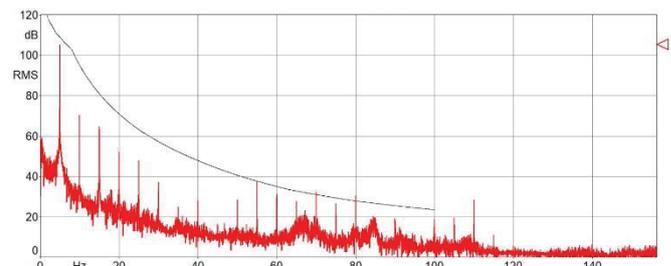


Abbildung 12 a): Gemessenes FFT-Spektrum bei Sinussignal mit der Frequenz 5 Hz und dem Schalldruckpegel 105 dB; ADC-System ausgeschaltet

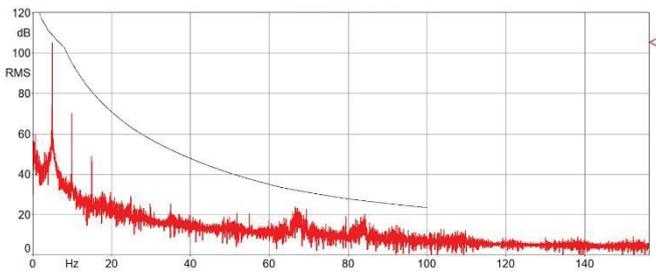


Abbildung 12 b): Gemessenes FFT-Spektrum bei Sinussignal mit der Frequenz 5 Hz und dem Schalldruckpegel 105 dB; ADC-System eingeschaltet

Bemerkenswert ist, dass auch noch die 15 Hz-Komponente deutlich abgesenkt werden kann.

Das Messergebnis in Abb. 13 bei einem 18 Hz-Signal unterscheidet sich dahingehend von den beiden vorangegangenen, dass hier nicht TRW-17 und KH 870 zusammenwirkten, sondern KH 870 und KH 120.

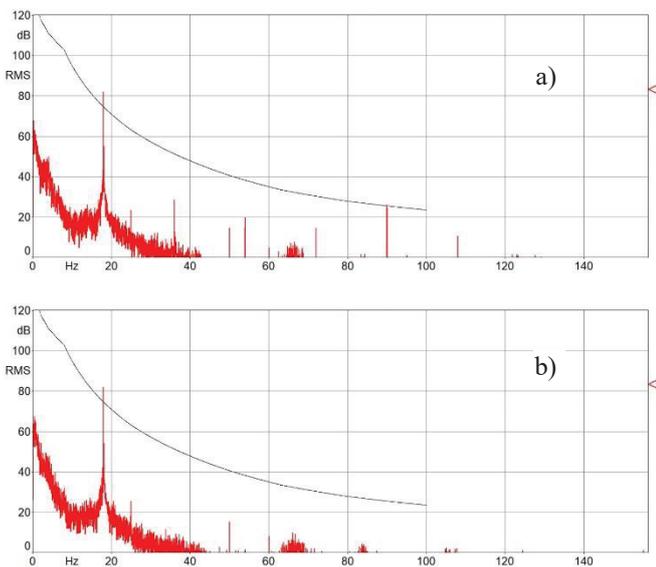


Abbildung 13: Gemessenes FFT-Spektrum bei Sinussignal mit der Frequenz 18 Hz und dem Schalldruckpegel 85 dB; a) ADC-System ausgesch. / b) ADC-System eingesch.

Die Verzerrung in Abb. 13 a) ist schon ohne ADC deutlich geringer als bei dem Betrieb mit dem TRW-17 zuvor, was aber nicht überraschend bei einem hochqualitativen Studio-Subwoofer wie dem KH 870 ist. Dennoch können auch hier durch ADC die Verzerrungskomponenten merklich abgesenkt werden (Abb. 13 b). Eine Anmerkung zu der 50 Hz-Komponente, die in Abb. 13 b) noch zu sehen: Hierbei handelt es sich nicht um ein Verzerrungsprodukt, sondern um das gelegentliche Geräusch einer elektrischen Komponente, die nicht abgeschaltet werden kann. Eine Kompensation wäre zwar auch hier möglich, aber doch etwas aufwändiger, da dieses Geräusch nicht ohne Weiteres synchron mit einer 50 Hz-Komponente wäre, die im DSP erzeugt würde. Da diese Komponente aber sehr deutlich unter der Hörschwelle liegt, ist auf weitere Maßnahmen verzichtet worden

Bei dem modulierten Sinussignal ($f_m=1\text{Hz}$, $f_c=3\text{Hz}$, $L_{p,eq}=105\text{dB}$) entstehen gewollt eine Reihe von Komponenten im 1Hz-Abstand. Mit ADC werden nur einige Komponenten höhere Frequenz niedrig gehalten (Abb. 14). Das Signal

könnte damit als eine erste Annäherung an das Geräusch einer Windenergieanlage (WEA) gesehen werden.

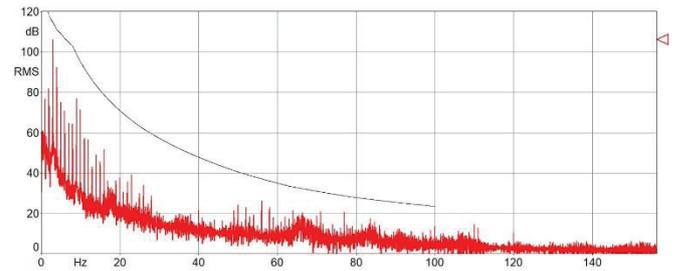


Abbildung 14: Gemessenes FFT-Spektrum bei 3 Hz-Sinussignal moduliert mit 1 Hz Sinussignal und dem Schalldruckpegel 85 dB; ADC-System eingeschaltet

Fazit und Ausblick

Der TRW-17 kann Schall bis hinunter zu 1 Hz mit einem Schalldruckpegel von über 110 dB erzeugen, was allerdings durch das Prinzip der Schallerzeugung mit deutlichen Verzerrungsprodukten verbunden ist. Durch eine aktive Kompensation können die Verzerrungsprodukte soweit abgesenkt werden, dass sie deutlich unter der Hörschwelle liegen.

Interessant über Hörversuche mit Sinussignalen im Infraschallbereich hinaus sind solche mit komplexeren Signalen, die nicht auf den Infraschallbereich beschränkt sein müssen, aber ihren Schwerpunkt im Infraschallbereich haben. Mit einem Signal wie in Abbildung 14 wurde ein Schritt in diese Richtung gemacht. Wünschenswert wäre im Weiteren das Spektrum im Infraschallbereich beliebig zu formen, also nicht nur unerwünschte Komponenten möglichst zu unterdrücken. Mit einem oder mehreren leistungsfähigeren Signalprozessorsystemen und einem komplexeren Algorithmus soll dies erreicht werden.

Die Signale müssen nicht unbedingt (streng) periodisch sein, sondern können auch stochastischer Natur sein. Trotzdem kann der Algorithmus weiterhin nach dem Feed-Forward-Prinzip arbeiten, da das Sollsignal vorgegeben wird und deshalb auch scheinbar nichtkausale Lösungen realisierbar sind. Die stabilere Lösung muss allerdings mit einer höheren Prozessorleistung erkaufte werden.

Das hier eingesetzte Signalprozessorkit TI C 6713 gilt als schon überholt, bietet aber in Verbindung mit einer Tochterkarte eine gewisse komfortable Funktionalität. Neuere DSP-Lösungen – meist Mehrprozessoren-Systeme – bieten einen höheren Datendurchsatz und größere Speicher. Damit kann nicht nur die Anzahl der Komponenten, die modifiziert werden sollen, deutlich erhöht werden, sondern auch die spektrale Auflösung. D.h. die Komponenten könnten sehr dicht den Frequenzbereich belegen.

Weitere Untersuchungen mit solchen Ansätzen wären sinnvoll, um mehr Erkenntnisse über die Wahrnehmung und Wirkung von Schall im Infraschallbereich zu gewinnen. Der wesentliche Vorteil beim Einsatz dieser Infraschallquelle: Der erzeugte Infraschall hat definierte Eigenschaften und ist reproduzierbar.