

## Geräuschesynthesizer für rotierende Maschinen

Felix Gärner<sup>1</sup>, Robert Henneberger<sup>2</sup>, Stefan Schubert<sup>3</sup>, Stefan Sentpali<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Hochschule München, 80335 München, Deutschland, Email: gaerner@hm.edu

<sup>2</sup> Mdynamix/Hochschule München, 80335 München, Deutschland, Email: robert.henneberger@hm.edu

<sup>3</sup> BMW AG, 80788 München, Deutschland, Email: Stefan.SB.Schubert@bmw.de

<sup>4</sup> Mdynamix/Hochschule München, 80335 München, Deutschland, Email: stefan.sentpali@hm.edu

### Einleitung

Die Gestaltung der akustischen Eigenschaften von Fahrzeugen ist ein wichtiger Bestandteil der Entwicklung. Sowohl der Wirkung nach außen (Lärmbelastigung, Erkennbarkeit eines sich nahenden Fahrzeugs) als auch der Wirkung im Innenraum des Fahrzeugs (Ablenkung der/des Fahrer/in, Fahrkomfort) kommen große Bedeutung in praktischen und ästhetischen Gesichtspunkten zu.

Neben dem Motorgeräusch sind die Schallimmissionen durch Nebenaggregate, wie Fensterheber, Lüftung oder Stellmotoren von großer Relevanz. Die Umsetzung der akustischen Qualität erfolgt in der Entwicklungsphase durch lärmarme Konstruktion oder sekundären Geräuschminderungsmaßnahmen.

Gerade in der Entwicklungsphase der Produktentstehung sind aber z.B. die Ausprägungen der akustischen Eigenschaften von Motoren noch gar nicht bekannt. Es liegt daher nahe zuerst die Möglichkeiten für die akustische Gestaltung einer Maschine simulativ zu bewerten und die Rückschlüsse in den Entwicklungsprozess mit einfließen zu lassen.

Für diesen Zweck wurde ein Softwaresynthesizer für rotierende Maschinen entwickelt der es ermöglicht anhand von weithin bekannten Kenngrößen den Klang dieser Maschinen nachzubilden und zu manipulieren. Das Programm wurde zusammen mit einer grafischen Benutzeroberfläche in Matlab umgesetzt.

### Kenngrößen

Die Klangsynthese erfolgt nicht aufgrund eines physikalischen Modells, sondern aufgrund von bekannten Kenngrößen, welche die Akustik eines Motors beschreiben. Im speziellen wurden folgende Akustikelemente umgesetzt:

- Motorordnungen mit auswählbarer Amplitude und Signalform
- Frequenzmodulation zur Nachbildung eines unruhigen Motorlaufs
- Stochastische Drehzahländerungen
- Amplitudenmodulation
- Rauschen, z.B. für Lager- oder Turbulenzgeräusche

- Umrichtergeräusche mit dazugehörigen Größen wie z.B. Schaltfrequenzen
- Eigenfrequenzen mit Mittenfrequenz, Amplitude und Dämpfung
- Luftschallübertragung aufgrund einfacher Strahlermodelle

### Beschreibung der Kenngrößen

Das Ausgangssignal wird rein digital erzeugt. Im folgenden werden die verschiedenen Kenngrößen und ihre Berechnung genauer beschrieben.

#### Motorordnungen

Grundbaustein des erzeugten Geräusches bilden die verschiedenen Motorordnungen. Hierbei können beliebige Motorordnungen ausgewählt und mit einstellbarer Amplitude erzeugt werden, wobei verschiedene Signalformen (Sinus, Dreieck, Rechteck) ausgewählt werden können. Zudem ist es möglich nicht nur stationäre Signale, sondern auch Sweeps (auch mehrstufig) zu erzeugen.

Die Berechnung erfolgt hierbei aufgrund von Sinusfunktionen, deren Argument über das zeitliche Integral über die Momentanfrequenz bestimmt wird.

$$\sin(2 \cdot \pi \cdot \int f_{mom}(t) dt) \quad (1)$$

Für z.B. eine harmonische Schwingung ist die Momentanfrequenz eine Konstante und für einen Upsweep eine linear ansteigende Funktion. Die Auswertung des Integrals wird hierbei numerisch durchgeführt.

Die verschiedenen Signalformen werden mittels Fourier-synthese aus diesen Sinusfunktionen erzeugt.

#### Frequenzmodulation

Die Frequenzmodulation dient zur Darstellung von unruhigen Motorläufen, hierbei werden Frequenzhub und Modulationsfrequenz angegeben. Der angegebene Frequenzhub ist dabei relativ zu verstehen, was z.B. bedeutet, dass wenn ein Frequenzhub 10Hz in der Grundordnung beträgt, die erste Ordnung einen Hub von 20Hz aufweist. Analog ändert sich der absolute Frequenzhub auch im Laufe der Sweeps.

Die Frequenzmodulation ist direkt in die Erzeugung der Ordnungssignale implementiert und wird im Ausdruck

der Momentanfrequenz durch eine Sinuskomponente (mit im Falle von Sweeps sich ändernder Amplitude und Frequenz) berücksichtigt.

$$f_{mom}(t) = f_{mom_{alt}}(t) + m_f \cdot (f_0 + k \cdot t) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot arg_{var}) \quad (2)$$

Hierbei ist  $m_f$  die relative Frequenzhubangabe,  $f_0$  die Frequenz, bei der der Sweep beginnt,  $k$  die Steigung der Momentanfrequenz,  $f_v$  die angegebene Modulationsfrequenz und  $arg_{var}$  das Argument der modulierenden Schwingung, das sich selbst wieder über Momentanfrequenzen, entsprechend der Eingaben, berechnet.

### Stochastische Drehzahländerungen

Stochastische Drehzahländerungen auf einer kleinen zeitlichen Skala tragen durch "Verschmieren" des Signals im Frequenzbereich zu einem realistischen Eindruck bei. Einstellgröße ist hierbei eine Schwankungsgröße, die als relative Änderung der Frequenz und damit als Grad der Breite der "Verschmierung" angesehen werden kann.

Wie auch bei der Frequenzmodulation ist die Schwankung direkt umgesetzt. Hierbei wird zu jedem Zeitpunkt ein Zufallswert  $X$ , dem eine Normalverteilung zugrunde liegt, auf die Momentanfrequenz addiert.

$$f_{mom}(t) = f_{mom_{alt}}(t) + X(t); X(t) \sim \mathcal{N}(0, c \cdot f_{mom}(t)) \quad (3)$$

Wobei  $c$ , das Maß zur Ausprägung der Drehzahlschwankung ist.

### Amplitudenmodulation

Für eine Amplitudenmodulation können Modulationsgrad und -frequenz ausgewählt werden, aufgrund derer die Signalamplitude sinusförmig verändert wird.

### Rauschen

Für Rauschphänomene wird ein bandbegrenztetes Rauschen erzeugt, dessen ober und untere Grenzfrequenz gewählt werden kann. Die Erzeugung geschieht hierbei durch Filterung eines Zufallssignals, basierend auf einer Gleichverteilung, mit einem Bandpass.

### Umrichtergeräusche

Für den Einfluss von Umrichtern (insbesondere solche mit Pulsweitenmodulation) kann die Schaltfrequenz des Umrichters angegeben werden. Erzeugt wird ein Signal, das aus der Schaltfrequenz des Umrichters, sowie der Spiegelung (im Frequenzbereich) des Ordnungssignals an der Schaltfrequenz besteht. Damit wird der erste Oberton eines Signals erzeugt, das nicht kontinuierlich, sondern aus einer Treppenfunktion gebildet ist. Dem Nutzer ist es überlassen welche Ordnungen gespiegelt werden.

Berechnet wird das Signal durch die Addition einer Sinusschwingung, deren Frequenz der Schaltfrequenz entspricht, mit dem frequenzverschobenen Ordnungssignal  $o(t)$ .

$$\sin(2 \cdot \pi \cdot f_{schalt} \cdot t) \cdot (1 + o(t)) \quad (4)$$

### Eigenfrequenzen

Mit den Eigenfrequenzen sollen strukturbedingte Amplitudenüberhöhungen bei bestimmten Frequenzen nachgebildet werden, besonders interessant ist dies für den Höreindruck von Hoch- bzw. Runterläufen. Hierbei können jeweils die Frequenz und eine Amplitude gewählt werden.

Für die Berechnung wird eine Filterbank erzeugt. Jeder Eigenfrequenz wird ein FIR-Filter zugeordnet, der eine gedämpfte Schwingung mit der angegebenen Frequenz beschreibt und einen Bandpass darstellt. Durch die Amplitudeneinstellung werden die Koeffizienten des Filters skaliert, während die Frequenz die Mittenfrequenz des dazugehörigen Bandpasses beschreibt. Die Dämpfung (und damit die Bandbreite des Filters) wird programmintern festgelegt.

$$e(t) = \sum_{i=1}^n h_{bp}^i(t) * f(t) \quad (5)$$

Wobei  $f(t)$  das Signal ohne Beachtung der Eigenfrequenzen ist und  $h_{bp}^i$  die Impulsantwort des Bandpasses für die  $i$ -te Eigenfrequenz darstellt.

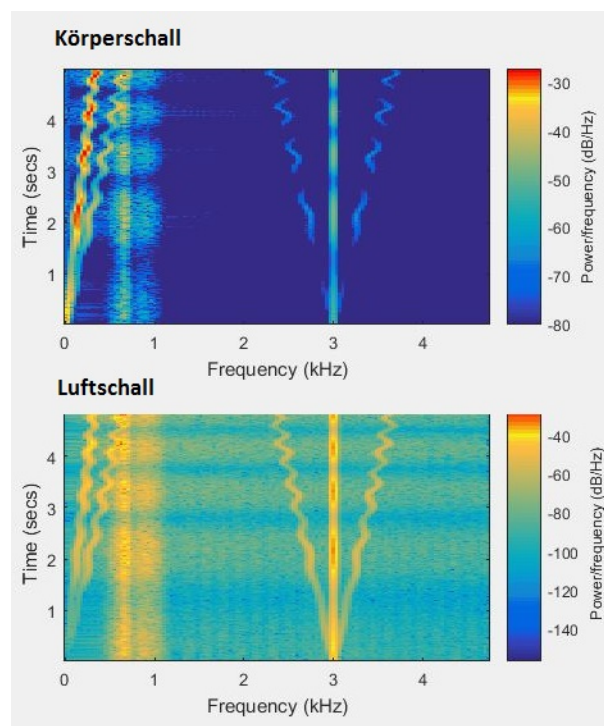


Abbildung 1: Spektrogramm eines Demonstrationssignals.

### Luftschallübertragung

Für erstellte Signale kann eine Luftschallübertragung aufgrund von Elementarstrahlern modelliert werden. Ausgewählt werden können hier der Strahlertyp (Kugel oder Zylinder), sowie die Strahlerordnung.

Die Luftschallübertragung wird durch eine frequenzabhängige Gewichtung durchgeführt. Da Kugelstrahler

einen Abfall von 20dB pro Dekade pro Ordnung aufweisen, wurden hierfür Butterworthfilter verwendet. Das Zylinderstrahlermodell hingegen wird im Frequenzbereich berechnet. Effekte wie Leistungsübertragung werden nicht beachtet.

Abb.1 zeigt das Spektrum ein Signals, das generiert wurde um die Möglichkeiten zur Einstellung der Signalerzeugung zu verdeutlichen. Zu sehen sind zwei Motorordnungen, sowie eine Frequenz- und Amplitudenmodulation. Desweiteren sind ein bandbegrenztetes Rauschen und ein Umrichtersignal vorhanden, wobei hier nur die zweite Ordnung gespiegelt wurde. Zuletzt erkennt man in der Körperschalldarstellung, vor allem im Bereich hoher Amplituden ein Rauschen um die Ordnungssignale herum, dies ist auf die stochastische Drehzahländerung zurückzuführen. Körper- und Luftschallsignal unterscheiden sich dadurch, dass beim Luftschallsignal die höheren Frequenzbereiche deutlich stärker gewichtet sind als beim Körperschallsignal.

Wie die einzelnen Kenngrößen miteinander kombiniert werden ist in Abb.2 zu sehen.

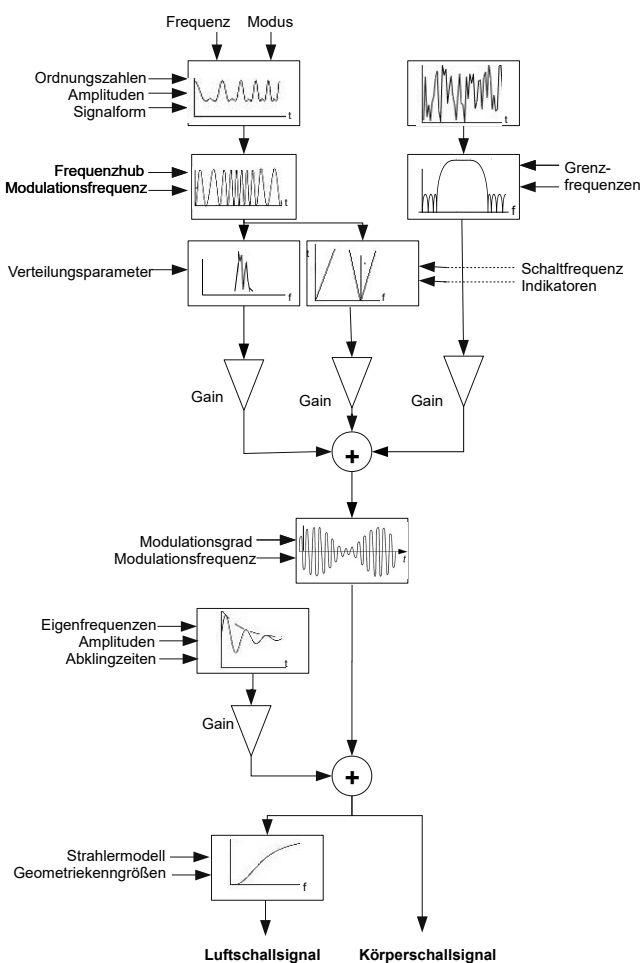


Abbildung 2: Signalfussgraph zur Erzeugung der Signale aus den Nutzereingaben

### Benutzerschnittstellen

Die Eingabe der Parameter erfolgt über eine grafische Benutzeroberfläche. Nach der Berechnung ist es dem Benutzer möglich die generierten Signale in einem Spektrogramm oder FFT-Plot zur betrachten, abzuspielen und zu speichern. Außerdem ist es möglich getätigte Einstellungen als sogenannte Presets abzuspeichern und zu laden.

### Test und Validierung des Synthesizers

Zum Test wurde das Signal einer echten Messung mithilfe des Synthesizers nachgestellt. Dies stellt zwar keine detailgenaue Nachbildung dar, aber aufgrund erster subjektiver Einschätzungen klingt das Ergebnis durchaus realistisch. In Abb.3 sind das Referenzsignal und das entsprechende synthetische Signal zu sehen. Die Komplexität der Nachbildung wurde hier beschränkt, die dominantesten Motorordnungen und Struktureffekte (drei Peaks bei 4000-6000Hz) sind jedoch deutlich zu erkennen.

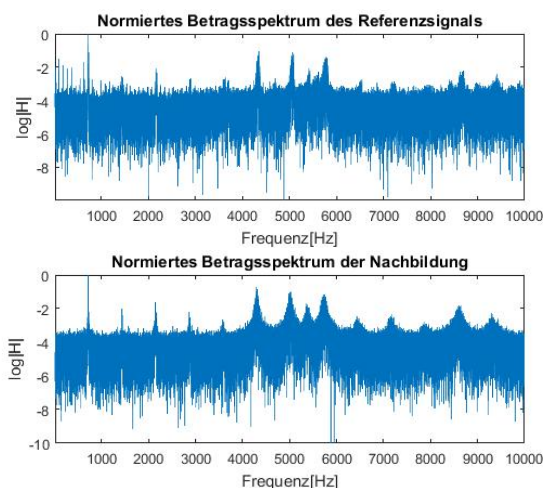


Abbildung 3: Amplitudennormiertes Betragsspektrum der Referenzmessung und des danach aufgebauten synthetischen Signals.

### Zusammenfassung

Es wurde ein Softwaresynthesizer entwickelt mit dessen Hilfe man aus bekannten Kenngrößen den Klang rotierender Maschinen durch mathematische Funktionen nachbilden und zur subjektiven Bewertung abspielen kann. Die Bedienung folgt hierbei über eine grafische Benutzeroberfläche.