50. Jahrestagung
25.-29.9.2000 Karl-Franzens Universität Graz
Physik-Event ÖPG 2000
Jahrestagung der ÖPG
FA-Akustik
gemeinsam mit
der Österreichischen Akustischen Gesellschaft (AAA)

# Analyse, Resynthese und Interpolation von KFZ-Innengeräuschen

Christian Feldbauer
EMAIL: feldbauer@iem.kug.ac.at, http://iem.kug.ac.at/˜feldbauer/
Robert Höldrich
EMAIL: robert.hoeldrich@kug.ac.at, www.kug.ac.at/iem/info/personal/rh.htm

Universität für Musik und Darstellende Kunst
Institut für Elektronische Musik und Akustik
Inffeldgasse 10, 8010 Graz, Austria

## 1 Abstract

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines KFZ-Innengeräusch-Simulators für Echtzeitbetrieb, um die in der Automobilindustrie üblichen Labor-Hörversuche realitätsnäher und effizienter durchführen zu können. Es ist dazu erforderlich, zwischen den Geräuschsignalen verschiedener Betriebszustände zu interpolieren. Für die Modellierung wird das Geräuschsignal in eine deterministische und eine stochastische Komponente zerlegt. Dazu wurden verschiedene Methoden, wie zB. SMS [1] oder QUASAR [2] untersucht. Da bei KFZ-Innengeräuschen die deterministische Komponente zum größten Teil durch den Motor erzeugt wird, ist sie harmonisch und somit leicht mit Heterodyne-Filtern zu extrahieren und isoliert zu resynthetisieren. Die stochastische Komponente wird als Residuum durch eine Subtraktion im Zeitbereich gebildet und mittels LPC oder FFT-basierten Methoden modelliert. Eine Interpolation zwischen Signalen bei unterschiedlichen Betriebszuständen kann dadurch einfach durchgeführt werden.

## 2 Lastzustandsmodell und -interpolation

Als Ausgangsmaterial für diesen Simulator dienen Aufnahmen von Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen bei verschiedenen, jeweils konstanten Gaspedalstellungen. Im weiteren betrachten wir nur einen konstanten Gang und setzen konstante Straßenverhältnisse, wie z.B. Steigung voraus. In Abbildung 1 wird ein

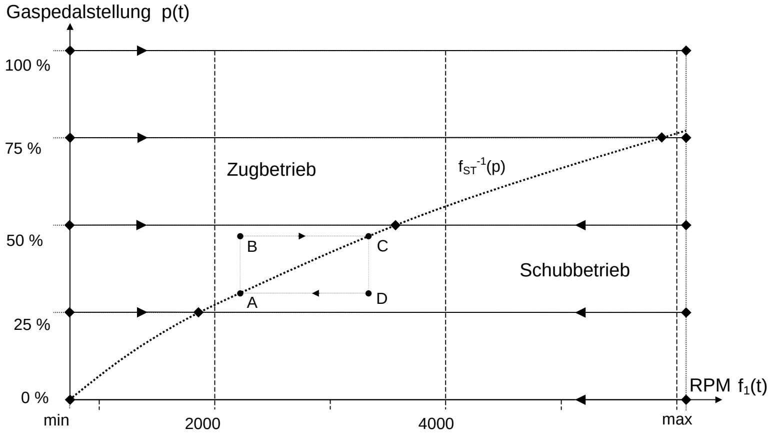


Abb. 1: Das Lastzustandsmodell

einfaches Lastzustandsmodell gezeigt. Lediglich Motordrehzahl RPM bzw. $f_1(t)$ und Gaspedalstellung $p$ bestimmen den Lastzustand. In dieser Ebene läßt sich die sogenannte Stationärlinie $f_{ST}^{-1}(p)$ einzeichnen, die jeder Gaspedalstellung eine bestimmte Stationärdrehzahl bzw. Stationärgeschwindigkeit zuordnet. Oberhalb dieser Linie liegen Beschleunigungszustände, unterhalb Verzögerungszustände. Aufnahmen von Zug- bzw. Schubgeräuschen bei gleichbleibender Gaspedalstellung können als horizontale Linien dargestellt werden, die meist bei der Stationärlinie enden. Das Ziel ist nun, Geräusche für beliebige Gaspedalstellungen

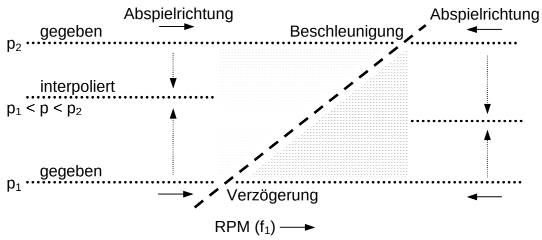


Abb. 2: Die Lastzustandsinterpolation

zu berechnen, wie es in Abbildung 2 illustriert wird. Wir verwenden hierzu für alle Signalparameter eine lineare Interpolation zwischen Frames gleicher Drehzahlwerte (siehe Gleichung (1), wo $w$ für einen beliebigen Parameter des Signalmodells steht).

$$w_p = w_{p_1}(m_1) + \Big(w_{p_2}(m_2) - w_{p_1}(m_1)\Big)\frac{p - p_1}{p_2 - p_1} \tag{1}$$

Es ist also erforderlich, die Geräuschsignale, die für den Simulator als Ausgangsmaterial dienen, entsprechend einem einfachen Signalmodell zu parametrisieren. Mehr dazu ist in Abschnitt 4 zu finden.

Um die Frames mit den richtigen Drehzahlwerten finden zu können, sind für die vorliegenden Sounds die Umkehrfunktionen der zeitlichen Drehzahlverläufe erforderlich: $m_1 = m_{p_1}(f_1)$ und $m_2 = m_{p_2}(f_1)$.

Die markierte Fläche in Abbildung 2 hebt jenen Bereich hervor, in dem diese Interpolation nicht angewendet werden kann, da nur mehr ein Soundfile Frames bei diesen Drehzahlwerten bereit stellt. Auf keinen Fall darf eine Interpolation zwischen einem Zug- und einem Schubgeräusch durchgeführt werden. Eine einfache Lösung dieses Problems ist die Verwendung von Frames des Stationärpunkts beim "kürzeren" Geräusch.

# 3 Simulator

In Abbildung 3 wird der Algorithmus des Echtzeit-Simulators illustriert. Zu

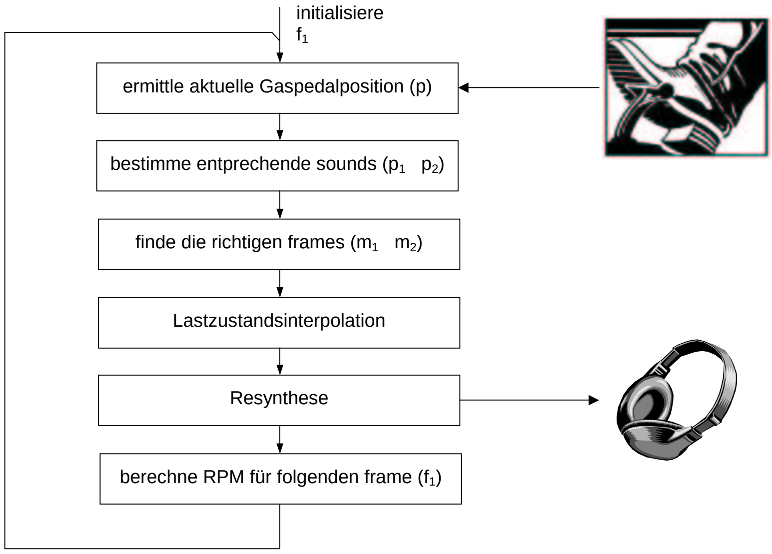


Abb. 3: Das Struktogramm des Echtzeit-Simulators

Beginn muß ein Drehzahlwert gewählt werden, danach wird eine Endlosschleife durchlaufen. Die Dauer eines Durchlaufs entspricht der Framedauer $T_F$, die zwischen 20 und 50 ms liegt. In jedem Zyklus muß die aktuelle Gaspedalposition $p$ abgerufen werden, damit im nächsten Schritt die entsprechenden gegebenen Geräusche, die zur Lastzustandsinterpolation herangezogen werden sollen, ermittelt werden können. Mit Hilfe der Umkehrfunktionen der zeitlichen Drehzahlverläufe können die richtigen Frames gefunden werden, womit nun die Lastzustandsinterpolation nach Gleichung (1) durchgeführt werden kann. Anschließend kann die Resynthese erfolgen, auf die in Abschnitt 6 genauer eingegangen wird. Als letzter Schritt muß die Drehzahl für den folgenden Zyklus berechnet werden.

Auch hierzu wird eine lineare Interpolation verwendet:

$$f_1 = f_1^{p_1}(m_1+1) + \left(f_1^{p_2}(m_2+1) - f_1^{p_1}(m_1+1)\right)\frac{p-p_1}{p_2-p_1} \tag{2}$$

# 4 Signalmodell

Wir betrachten ein reellwertiges Geräuschsignal $x(n)$ als Summe aus deterministischer $det(n)$ und stochastischer Signalkomponente $res(n)$:

$$x(n) = det(n) + res(n) \tag{3}$$

Da die deterministische Komponente zum größten Teil aus dem Motorgeräusch besteht, sehen wir diese als harmonisches Signal an. Zur Beschreibung reicht deshalb der Grundfrequenzverlauf $f_1(n)$ und die Momentanamplituden der $K$ Teiltöne $A_k(n)$.

$$det(n) = \sum_{k=1}^{K} A_k(n)\cos\left(2\pi k\sum_{u=0}^{n-1} f_1(u)T + \varphi_k\right) \tag{4}$$

$T$ ist das Abtastintervall und $\varphi_k$ die Phasenverschiebung des $k$-ten Teiltones.

Der erste Schritt zur Analyse ist die Schätzung des Grundfrequenzverlaufs $\hat{f}_1(n)$. Hierzu kann entweder eine Drehzahlreferenz (aufgezeichnetes Zündsignal) zur Hilfe genommen werden, oder man bedient sich einer Kurzzeit-Fourier-Transformierten und anschließender Peak-Detection [3][1]. Die Teiltonamplituden können bei vorliegendem Grundfrequenzverlauf einfach mittels Heterodyne-Filter bestimmt werden.

Die stochstische Signalkomponente interpretieren wir als zeitvariant gefärbtes Rauschen.

# 5 Heterodyne-Filter

Ein Heterodyne-Filter läßt sich als Demodulator beschreiben. Durch die Ringmodulation mit der konjugiert komplexen Trägerschwingung wird der Teilton im Spektrum an die Stelle 0 Hz geschoben. Das anschließende Tiefpaßfilter $h_{LP}(n)$ eliminiert die höherfrequenten Anteile, die langsam veränderliche Teilton-Amplitude $\hat{A}_k(n)$ bleibt übrig.

$$\hat{A}_k(n) = \left(x_{dec}(n)\, e^{-j\varphi_k(n)}\right) \otimes h_{LP}(n) \tag{5}$$

Das Ergebnis $\hat{A}_k(n)$ ist komplexwertig, es beinhaltet auch die Phasendifferenz zur Momentanphase des Teilton-Trägers $\varphi_k(n)$. Letztere läßt sich aus der Schätzung des Grundfrequenzverlaufes berechnen mit $\varphi_k(n) = 2\pi k\sum_{u=0}^{n-1}\hat{f}_1(u)T_{dec}$. $T_{dec}$

ist das Abtastintervall des abtastreduzierten Signals $x_{dec}(n) = \text{decimate}(x(n))$. Diese Dezimation kann stattfinden, da bei KFZ-Innengeräuschen die Teiltöne meist bereits ab 2 kHz vom Rauschen verdeckt werden.

Als Tiefpaß soll ein nullphasiges Filter verwendet werden, um anschließende zeitliche Korrekturen überflüßig zu machen. Die Wahl der Bandbreite ist ein wichtiger Punkt. Zum Einen soll sie so gering sein, daß kein benachbarter Teilton berührt wird, auch soll nicht zu viel Rauschen eingefangen werden. Zum Anderen soll sie groß genug sein, um rasche Amplitudenänderungen abbilden zu können.

# 6 Analyse/Resynthesesystem

Abbildung 4 zeigt das Blockschaltbild des Analysevorgangs. Die Analyse wird offline berechnet.

Nach der Dezimation kommen die Heterodyne-Filter für die einzelnen Teiltöne zum Einsatz. Anschließend kann die deterministische Komponente isoliert mittels komplexwertiger additiver Synthese resynthetisiert werden:

$$det_{dec}(n) = 2\,\text{real}\left(\sum_{k=1}^{K} \hat{A}_k(n) e^{j\varphi_k(n)}\right) \tag{6}$$

Nach der anschließenden Interpolation $det(n) = \text{interpolate}(det_{dec}(n))$ liegt dieses Signal wieder bei ursprünglicher Abtastrate vor, womit nun mit einer Subtraktion im Zeitbereich das Residuum gebildet werden kann: $res(n) = x(n) - det(n)$. Diese Subtraktion erklärt die Notwendigkeit der komplexwertigen Resynthese und die der nullphasigen Filter, denn es muß phasenexakt gearbeitet werden. Das Residuum wird als die stochastische Komponente betrachtet und mittels Linearer Prädiktion (LPC) oder FFT-basierten Methoden parametrisiert [3]. LPC liefert Filterkoeffizienten für ein Filter der Ordnung $p$ (Reflexionskoeffizienten $\tilde{k}_i(m)$ für $i = 1, ..., p$ und Gain $\tilde{G}(m)$). Um die Parameter-Sätze klein zu halten, wird für die deterministische Komponente nicht das Ergebnis der Heterodyne-Filter abgespeichert, sondern wir nehmen den zweifachen Absolutbetrag der zeitlich langsam veränderlichen Teiltonamplituden und dezimieren auf die gleiche Framedauer wie bei LPC: $\tilde{A}_k(m) = 2|\hat{A}_k(mT_F)|$. Auch eine dezimierte Version der Schätzung des Grundfrequenzverlaufs wird gespeichert. Das Resyntheseverfahren wird in Abbildung 5 illustriert. Um die Signalparameter wieder bei ursprünglicher Abtastrate zu erhalten, wird eine lineare Interpolation durchgeführt:

$$v'(n) = v\left(\left\lfloor \frac{n}{H} \right\rfloor\right) + \left(v\left(\left\lfloor \frac{n}{H} \right\rfloor + 1\right) - v\left(\left\lfloor \frac{n}{H} \right\rfloor\right)\right)\frac{n - \left\lfloor \frac{n}{H} \right\rfloor H}{H} \tag{7}$$

$v$ in Gleichung (7) meint einen beliebigen Signalparameter und H ist die Hopsize bei ursprünglicher Samplerate ($T_F = H\,T$). Diese Interpolation ist der Grund für eine Latenz von einer Framedauer $T_F$.

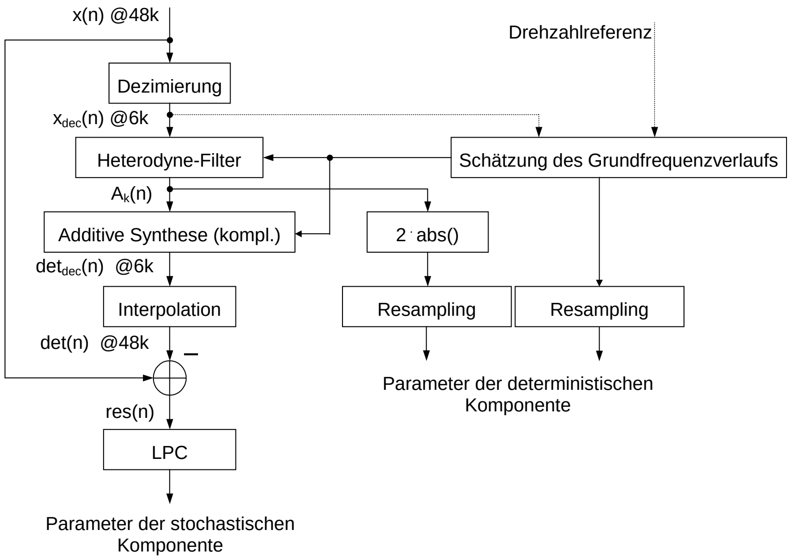


Abb. 4: Das Blockschaltbild des Analysesystems

Die deterministische Komponente erhalten wir durch eine einfache (diesmal reellwertige) additive Synthese:

$$det'(n) = \sum_{k=1}^{K} A'_k(n) \cos\left(2\pi \sum_{u=0}^{n-1} \left(k\, f'_1(u) + jit(u)\right) T\right) \tag{8}$$

Es empfiehlt sich das Hinzufügen eines Jitters $jit(n)$ zur Momentanfrequenz, d.h. das Erzeugen einer leichten Inharmonizität, um den Verlust der Phaseninformation auszugleichen. Besonders bei geringer Drehzahl ist dies von Bedeutung.

Für die stochastische Komponente wird weißes Rauschen mittels zeitvariantem Lattice-Filter gefiltert.

# 7 Conclusio

In dieser Arbeit wurde ein Analyse/Resyntheseverfahren für KFZ-Innengeräusche entwickelt, das extrem wenig Speicherplatz für die Signalparameter benötigt. Nehmen wir als realistisches Beispiel für die Anzahl der Teiltöne $K$ den Wert 30 und für die LPC-Ordnung $p$ ebenfalls den Wert 30 an, dann benötigt dieses System lediglich 62 Zahlen pro Frame, der 50 ms des Zeitsignals beschreibt.

Weiters wurde ein einfaches Lastzustandsmodell vorgestellt, das eine Interpolation zwischen Geräuschen bei verschiedenen Gaspedalstellungen erlaubt und schließlich ein Algorithmus für einen KFZ-Innengeräusch-Simulator für Echtzeitbetrieb.

Hörbeispiele zu dieser Arbeit sind unter http://iem.kug.ac.at/~feldbauer/ zu finden.

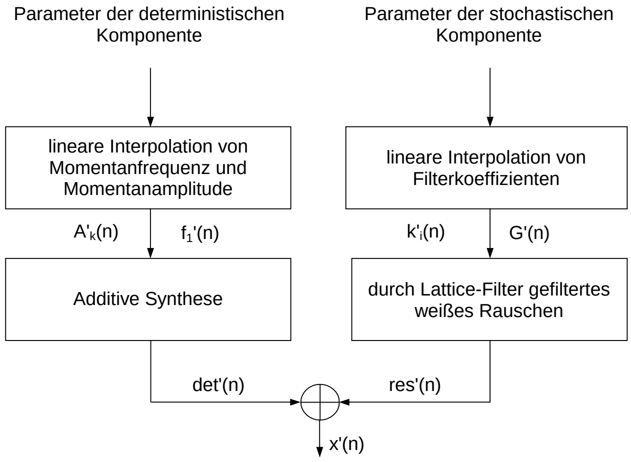


Abb. 5: Das Blockschaltbild des Resynthesesystems

# Quellen


[1] Xavier Serra: *A System for Sound Analysis/Transformation/Synthesis based on a Deterministic plus Stochastic Decomposition*, Dissertation, Dep. of Music, Stanford University (1989)

[2] Yinong Ding, Xiaoshu Qian: *Processing of Musical Tones Using a Combined Quadratic Polynomial-Phase Sinusoid and Residual (QUASAR) Signal Model*, Journal of the Audio Engineering Society, Vol. 45, No. 7/8, July/August 1997 (1996)

[3] Christian Feldbauer: *Analyse, Resynthese und Interpolation von KFZ-Innengeräuschen*, Diplomarbeit am Institut für Elektronische Musik und Akustik der Universität für Musik und Darstellenden Kunst Graz (2000)