

# Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben beim Sound Design von Außengeräuschen für Elektrofahrzeuge

Markus Bodden, Torsten Belschner  
neosonic 45131 Essen, email: info@neosonic.eu

## Einleitung

Für Fahrzeuge mit Elektroantrieb wird die Erzeugung von Außengeräuschen in Zukunft gesetzlich vorgeschrieben. Die entsprechenden Gesetzesentwürfe weisen eine Reihe von einzuhaltenden Vorschriften auf, die im Prozess des Sound Designs berücksichtigt werden müssen und welche die gestalterische Freiheit des Sound Designs einschränken können. Erschwerend kommt hinzu, dass die Vorschriften der unterschiedlichen Staaten voneinander abweichen.

Auf der anderen Seite eröffnet die Synthese von Geräuschen endlich die Möglichkeit, einen wiedererkennbaren Brand Sound umzusetzen. Die nach außen abgestrahlten Geräusche sind aber teilweise auch innen hörbar, sollten zum Innengeräusch passen und die Geräuschqualität dort nicht negativ beeinflussen.

Die Erzeugung entsprechend typischer, interessanter und abwechslungsreicher Geräusche erfordert den Einsatz komplexer Geräuscherzeugungsverfahren, deren Einklang mit den gesetzlichen Vorgaben anschließend überprüft werden muss. Ein solch iterativer Prozess ist mühsam, zeitaufwendig und ineffizient.

Um den Zielkonflikt zwischen den gesetzlichen Vorgaben und dem Zielgeräusch zu minimieren muss eine Bewertung der Übereinstimmung des aktuell erzeugten Geräusches mit den gesetzlichen Vorgaben direkt in den Sound Design-Prozess integriert werden. Im neosonic Sound Design Tool werden hierzu die akustischen Übertragungsfunktionen des Geräuscherzeugungssystems und des Fahrzeuginbaus berücksichtigt. Die Übereinstimmung mit den gesetzlichen Vorschriften wird direkt im Design-Prozess abgeschätzt und eine Optimierung der Geräusche unterstützt. Der aktuelle Stand der Gesetzgebung und der Sound Design Prozess werden dargestellt.

## Gesetzliche Vorgaben

Die gesetzlichen Vorgaben über Mindest-Außengeräusche von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb sind in den meisten Staaten noch nicht endgültig verabschiedet, sondern liegen in Draft-Form vor. Der Status für die EU ist in [1] dargestellt, für die USA wurde im November 2016 eine neue Version vorgestellt ([2]) welche erheblich von dem bisherigen Entwurf ([3]) abweicht. Für China stand eine informelle Übersetzung des aktuellen Drafts ([4]) zur Verfügung. Diese entspricht weitgehend der EU-Regulierung, wobei die Mindestwerte jeweils 2 dB höher liegen.

## Fahrsituationen und Metriken

In Tabelle 1 sind die zu untersuchenden Fahrbedingungen dargestellt. Die Messmethodik entspricht der Standard-Vorbeifahrtmessung (2 Mikrofone im Abstand von 2 Metern von der Mittenlinie), wobei hier im Gegensatz zum Verbrenner-Außengeräusch nur Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit erfolgen.

	US Nov '16	EU	China
Stand	✓	-	-
10 km/h	✓	✓	✓
20 km/h	✓	✓	✓
30 km/h	✓	-	-
Rückwärts	✓	✓	✓

Tabelle 1: zu untersuchende Fahrsituationen

Die anzuwendenden Metriken sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Metrik	US Nov '16	EU	China
1: Minimaler Gesamtpegel	Option 2	✓	✓
2: Maximaler Gesamtpegel	-	forward	forward
3: Terzpegel	✓	✓	✓
4: Pitch Shift	-	✓	✓
5: Volume Shift	✓	-	-

Tabelle 2: : Übersicht über die verwendeten Metriken

Die US-Regulierung ermöglicht, zwischen 2 unterschiedlichen Anforderungen (Optionen 1 und 2) auszuwählen.

## Minimal-Gesamtpegel

Die minimal einzuhaltenden Gesamtpegel je Fahrsituation sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Für die USA gibt es keine expliziten Vorgaben, aufgrund der minimalen Terzpegel ergeben sich aber indirekt minimale Gesamtpegel.

Min levels dB(A)	US Opt. 1	US Opt. 2	EU	China
Idle	47-50*	48*		
10 km/h	53-56*	52*	50	52
20 km/h	59-62*	55*	56	58
30 km/h	63-67*	61*		
Reverse	50-53*	66*	47	49

Tabelle 3: Minimale Gesamtpegel. Die US-Regulierung schreibt keine direkten minimalen Gesamtpegel vor, die dargestellten Werte ergeben sich aus den Terzpegelvorgaben.

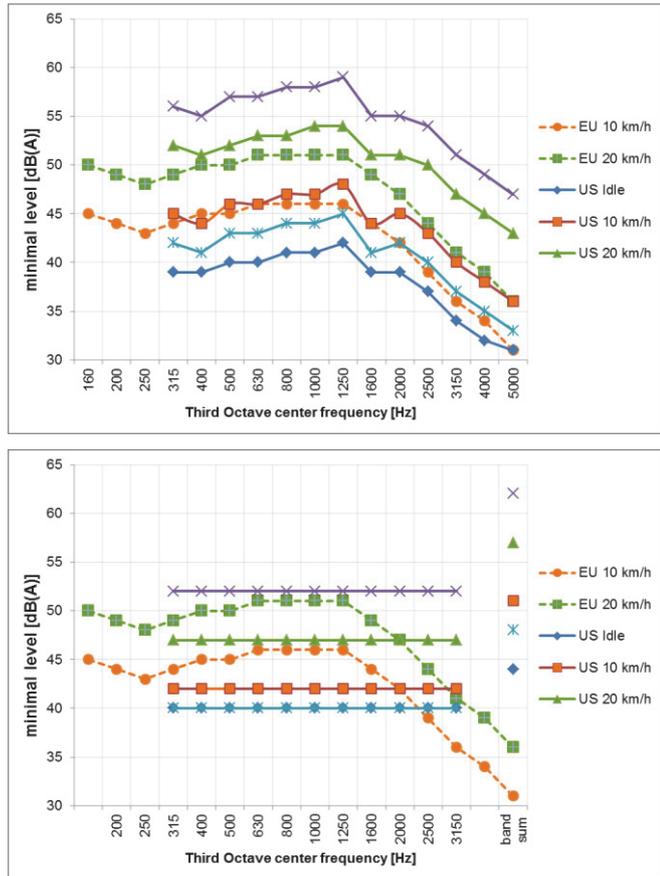
## Maximal-Gesamtpegel

Während die US-Regulierungen keinen Maximal-Grenzwert vorschreiben, muss nach dem EU-Draft der Gesamtpegel in jeder Fahrsituation vorwärts unter 75 dB(A) bleiben.

### Minimale Terzpegel

Die Gesetzgebungen schreiben die in Abb. 1 dargestellten unterschiedlichen minimal einzuhaltenden Terzpegel vor.

In der EU und China müssen nur jeweils 2 Bänder die Anforderungen erfüllen, wobei mindestens ein Band unter 1.6 kHz liegen muss. In dem USA-Entwurf sind die Vorgaben komplizierter, zumal hier zwei Optionen wählbar sind. In Option A (Abb. 1 oben) müssen insgesamt 4 nicht benachbarte Bänder, die insgesamt eine Breite von 9 Bändern aufspannen, die Minimalwerte erfüllen, in Option B (Abb. 1 unten) nur 2 nicht benachbarte Bänder, wobei eines unter 1000Hz und eines über 800Hz liegen, und zusätzlich der Bandsuppenpegel einen Grenzwert erreichen muss.



**Abbildung 1:** minimale Terzpegel nach den US und EU Drafts (China = EU + 2 dB). Oben: US Option A, unten US Option B. Nicht alle Bänder müssen erfüllt werden, Erklärung siehe Text.

### Pitch Shift

Ein Steigen der Tonhöhe bei Erhöhung der Geschwindigkeit (bzw. der Drehzahl des Motors) eines Fahrzeugs ist eine der grundlegendsten Eigenschaften eines Fahrgeräusches. Um ein Geräusch als ein Fahrzeuggeräusch zu erkennen ist dieses Merkmal notwendig. Die EU-Regulierung schreibt aus diesem Grunde eine Steigerung des Pitches um 0.8%/km/h vor, die US verzichtet in der neuesten Fassung jedoch darauf.

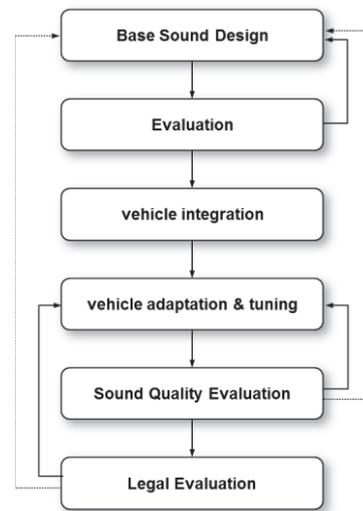
### Volume Shift

Die US-Vorgaben definieren stattdessen eine Pegelsteigerung von 3 dB pro 10 km/h.

## Standard-Prozess Außengeräusch Sound Design

Der Standardprozess der Gestaltung eines Außensounds entsprechend den gesetzlichen Vorgaben ist in Abb. 2 dargestellt.

Das grundlegende Sound Design findet zunächst unter Laborbedingungen statt, passende Soundgestalten bzw. Brand-Sound-Muster werden entworfen und iterativ evaluiert bis ein (in der Regel zunächst fahrzeugunabhängiges globales) Zielgeräusch vorliegt. In den folgenden Schritten werden das Soundsystem und der Sound in das Zielfahrzeug integriert, an die dynamischen Fahrparameter angepasst und die Erreichung der Geräuschqualitätszielwerte überprüft. Erst dann erfolgen im letzten Schritt die Abnahmemessungen, die dann zeigen ob die gesetzlichen Anforderungen erfüllt werden oder nicht. Im letzteren Fall muss je nach Art der Nichterfüllung eventuell sogar bis zum ersten Schritt zurückgegangen und der gesamte Prozess erneut komplett durchlaufen werden.



**Abbildung 2:** Standardprozess der Gestaltung eines Außengeräusches

Dieser Prozess ist aufwendig, langwierig und teuer, zumal zumeist kein direkter Zusammenhang zwischen den Parametern der Geräuscherzeugung und den abzu prüfenden gesetzlichen Vorgaben besteht.

## Integrierter Außengeräusch Sound Design Prozess

Der von neosonic entwickelte Sound Design Prozess integriert die Berücksichtigung der Fahrzeugeinflüsse und die Abschätzung der Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben in einen einheitlichen Designvorgang (Abb. 3).

Eine Anwendung des Prozesses ist auf zwei unterschiedlichen Plattformen möglich:

- einem PC-basierten Entwicklungstool (neosonic ProdSys)
- direkt auf dem Ziel-AVAS-Device auf dem die neosonic Sounderzeugung implementiert ist (z.B. [5]).

Der eigentliche Prozess erfolgt auf beiden Systemen identisch, so dass die Sound Signaturen und Parameter direkt ausgetauscht werden können. Beide Systeme können sowohl im Labor als auch im Fahrzeug verwendet werden, und sämtliche Parameter können in Echtzeit direkt während des Betriebs verändert werden.

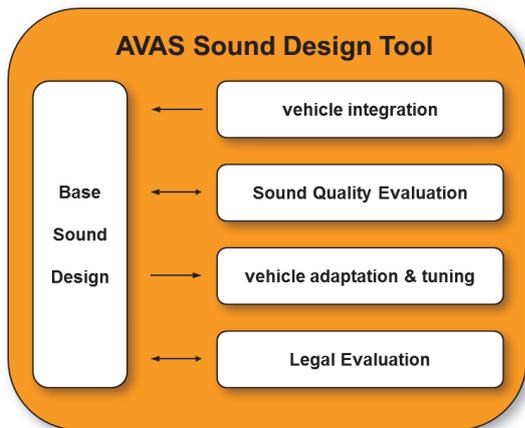


Abbildung 3: : neosonic Prozess zur Gestaltung eines Außengeräusches nach gesetzlichen Vorgaben

### Basis-Sound Design

Für die Gestaltung von Geräuschen von Elektrofahrzeugen (außen und innen) hat neosonic den Sound-Signatur-Ansatz entsprechend Abb. 4 entwickelt ([6], [7]).

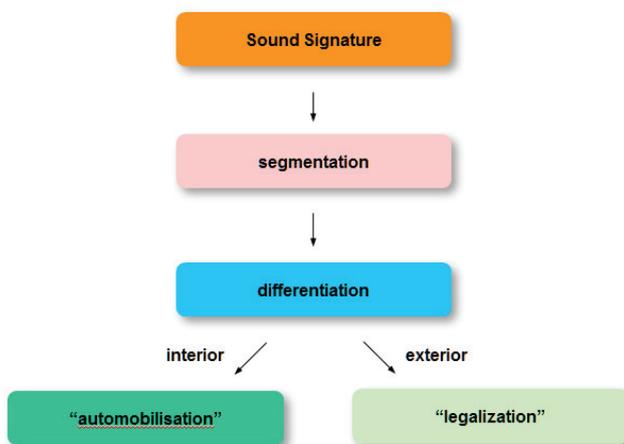


Abbildung 4: Aufbau des Sound-Signatur-Konzeptes.

Die Sound-Signatur beschreibt den Basischarakter des zu erzeugenden Geräusches, und eignet sich insbesondere zur Definition von Brand Sounds. Durch die Segmentierung auf das Zielfahrzeug entsteht die Fahrzeug-Sound-Signatur, die dann anschließend nach innen („Automobilisierung“) und außen („Legalisierung“) differenziert wird.

### Fahrzeugintegration

Neben der Signaturanpassung müssen die physikalischen Auswirkungen der Fahrzeugintegration berücksichtigt werden. Diese besteht aus zwei Teilen:

1. der Übertragungsfunktion des AVAS-Systems  $H_A$
2. dem Einfluss des Fahrzeugeinbaus  $H_V$

Durch diese Aufspaltung kann der generische Einfluss des AVAS-Devices direkt im Sound-Design-Prozess der Signatur berücksichtigt werden, während der Einfluss des Fahrzeugeinbaus automatisiert in einem separaten Schritt herausgerechnet werden kann. Die Transferfunktionen sind Teil der Fahrzeug-Signaturdefinition und können mit den Signaturparametern mitgespeichert werden.

### AVAS-Übertragungsfunktion

AVAS-Systeme sind aufgrund von Gewichts, Größen- und Kostengründen in der Regel kompakt und preiswert. Die verwendeten Lautsprecher sind entsprechend limitiert, und der Frequenzgang korrespondiert zu den gesetzlichen Vorgaben (typisch 160 bis 5000 Hz).

Bezüglich der Wiedergabequalität unterscheiden sie sich signifikant von den üblicherweise im Sound Design eingesetzten Abhörmonitoren. Aus diesem Grunde verwendet der neosonic-Ansatz auch in der ProdSys-Variante eine AVAS-Box als Wiederhabesystem oder nutzt die gemessene Übertragungsfunktion als Wiedergabefilter.

### Einfluss des Fahrzeugeinbaus

Der Einbau der AVAS-Boxen erfolgt OEM- und Fahrzeugspezifisch an den unterschiedlichsten Orten, die wiederum unterschiedliche Einflüsse auf die resultierende Übertragungsfunktion des Einbaus haben.

Die Übertragungsfunktion des AVAS-System im Fahrzeug ( $H_{AV}$ ) kann direkt mit dem Sound Design Tool erfolgen. Hieraus kann dann (bei bekannter Übertragungsfunktion  $H_A$  der AVAS-Box) die Übertragungsfunktion des Fahrzeugeinbaus  $H_V$  berechnet werden:

$$H_V = H_{AV} - H_A \quad (1)$$

Diese Übertragungsfunktion kann durch Setzung von Parametern von Filtern des Signalflusses in der AVAS-Box automatisiert kompensiert werden.

Ist demnach einmal eine Zielsignatur für eine Marke definiert, so kann diese sehr effizient auf andere Fahrzeugmodelle übertragen werden.

### Fahrzeuganpassung und -tuning

Eine Anpassung an die dynamischen Fahrzeugparameter kann entweder direkt während der Fahrt oder anhand einer Simulation durch gemessene oder frei generierte CAN-Daten erfolgen. Alle Parameter können direkt während des Betriebs in Echtzeit angepasst werden, wobei die meisten intuitiv in Kurvenform einfach grafisch eingegeben werden können.

### Evaluierung der Erfüllung gesetzlicher Vorgaben

Die Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben kann direkt während des Sound Designs abgeschätzt werden. Hierzu wird das Geräusch in den zu untersuchenden Fahrsituationen erzeugt und für eine Analyse zurückgeführt. Im ProdSys liegt das erzeugte Geräusche direkt vor, da die Erzeugung im PC erfolgt, bei Verwendung einer AVAS-Box muss diese über eine Rückführung des erzeugten Geräusches verfügen.

Die benötigten CAN-Daten (Geschwindigkeit, Last und ggf. Pedalstellung) stammen entweder aus Messungen des

Zielfahrzeugs oder aus Simulationen. Das zurückgeführte Geräusch wird mit der Übertragungsfunktion des AVAS-Systems im Fahrzeug  $H_{AV}$  gefiltert.

Das so aufbereitete Geräusch wird anschließend mit den vorne beschriebenen Analysemethoden evaluiert. Abb. 5 zeigt die Integration in das Sound Design Tool für eine Beispielsignatur.



Abbildung 5: Abschätzung der Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben im Sound Design Prozess.

Im linken Bereich werden die Übereinstimmungen der Analysen mit den jeweiligen Anforderungen in einer Tabelle farblich dargestellt (grün = erfüllt, rot = nicht erfüllt, grau = nicht relevant), so dass der Benutzer einen direkten Überblick über die Erfüllung der Vorgaben erhält.

Im rechten Bereich werden detaillierte Analysen der jeweils ausgewählten Fahrsituation und der jeweiligen Gesetzgebung dargestellt (hier oben absolute Pegel, unten Terzpegel), die direkt eine Erfassung der Abweichungen und eine Verbesserung des Sound Designs ermöglichen.

In allen Graphen sind jeweils die aktuellen Analysewerte (durchgezogene Linien) und die jeweiligen Grenzwerte (gestrichelte Linien) dargestellt. Mögliche Abweichungen von den Vorschriften werden hier verdeutlicht. So geben z.B. die Balken unter den Terzpegeln in Abb. 5 unten die Abweichungen von den geforderten Grenzwerten an.

Je nach Art der Abweichung und den Kreuz-Einflüssen können unterschiedliche, zum Teil automatisierte Gegenmaßnahmen eingeleitet werden:

- minimaler Gesamtpegel:  
Darstellung(Einstellung der notwendigen Verstärkung, Kreuzabgleich mit Maximalpegel (falls relevant)
- maximaler Gesamtpegel:  
Darstellung/Einstellung der notwendigen Abschwächung, dynamische Filter, Kreuzabgleich mit Terzpegeln
- minimale Terzpegel:  
dynamische Filter, füllen spektraler Löcher mit

zusätzlichen Geräuschen, Kreuzabgleich mit Maximalpegeln

- minimale Pitch-Shift:  
ist direkter Signaturparameter im Editor und kann während der Eingabe überprüft werden
- minimale Volume-Shift:  
ist direkter Signaturparameter im Editor und kann während der Eingabe überprüft werden.

Da in der Regel das Ziel in einer Erfüllung der Vorgaben aller Staaten besteht, muss der Kreuzabgleich jeweils auf alle Metriken und auf alle Gesetzgebungen erfolgen.

## Zusammenfassung

Der vorgestellte Prozess zur Gestaltung von Außen-Warngeräuschen für Elektro- und Hybridfahrzeuge integriert eine Berücksichtigung der Auswirkungen der Fahrzeugintegration und eine Abschätzung der Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben direkt in einen geschlossenen Sound Design Ablauf.

Die Gestaltung gesetzteskonformer Geräusche wird somit erheblich vereinfacht und beschleunigt, da die Auswirkungen sofort während des Designs überprüft und langwierige Iterationsschleifen eingespart werden können.

## Literatur

- [1] United Nations, Economic Commission for Europe, Inland Transportation Committee, Proposal for a new Regulation concerning the approval of quiet road transport vehicles (QRTV), ECE/TRANS/WP.29/2016/26, 22. Dec. 2015
- [2] National Highway Traffic Safety Administration. (2016, November). Minimum sound requirements for hybrid and electric vehicles: Final environmental assessment (Document submitted to Docket Number NHTSA-2011-0100. Report No. DOT HS 812 347). Washington, DC..
- [3] NHTSA Docket Number NHTSA-2011-0100, "Minimum sound requirements for hybrid and electric vehicles. Draft environmental assessment, U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration Washington, DC, January 2013
- [4] Technical requirements for acoustic vehicle alerting system of electric vehicles running at low speed, exposure draft, NTCAS(SAC/TC114), 12/2016.
- [5] MHE press release, [http://www.mandohella.com/eng/support/notice\\_view.asp?intSeq=1953](http://www.mandohella.com/eng/support/notice_view.asp?intSeq=1953)
- [6] Bodden, M.; Belschner, T.: Sound Design for Silent Vehicles: Security - Identity - Emotion. Audio Branding Congress Proceedings 2010, 69-85
- [7] Bodden, M.; Belschner, T.: Principles of Active Sound Design for electric vehicles, Proc. of the Internoise 2016, 1693-1697