

The background of the top half of the page features a dark grey road with white dashed lines. On the road, there are several stylized vehicles: a white truck on the left, a white car in the upper center, a blue car on the left, and a red car in the center. The red car has orange sound waves emanating from its rear, directed towards a pedestrian on the right. The pedestrian is depicted as a stick figure. To the right of the road is a crosswalk with white stripes. In the bottom left corner, there is a small illustration of a hand holding a plug. The Siemens logo is in the top left corner.

SIEMENS

Ingenuity for life

Siemens Digital Industries Software

Akustisches Fahrzeugwarnsystem

Entwickeln des passenden Außengeräuschs
und Bewerten der Leistung durch
Integration von Simulationen und Prüfungen

Kurzdarstellung

Das Fehlen eines Außengeräuschs bei Hybrid- und Elektrofahrzeugen, insbesondere bei niedriger Geschwindigkeit, beschäftigt Automobilhersteller und Regulierungsbehörden, denn es gefährdet die Sicherheit von Fußgängern, insbesondere von Fußgängern mit Sehbehinderung. In vielen Ländern weltweit sind daher Bestrebungen im Gange, ein akustisches Fahrzeugwarnsystem (Acoustic Vehicle Alerting System, AVAS) für Elektrofahrzeuge gesetzlich vorzuschreiben^{1,2} und einen Mindestgeräuschpegel vorzugeben.^{3,8} In der Europäischen Union zum Beispiel müssen Hybrid- und Elektrofahrzeuge bereits seit September 2019 über ein AVAS verfügen. Die USA werden Mitte 2020 folgen.¹

Inhalt

- Übersicht 3
- Warngeräusche für mehr Sicherheit 4
- Leise Fahrzeuge mit Geräuschen ausstatten 5
- Entwickeln eines Sounds für das AVAS-System 7
- Virtuelle Evaluierung unterschiedlicher AVAS-Konzepte 10
 - Passive Richtcharakteristik:
 - Optimieren der Lautsprecherposition..... 11
 - Adaptive Richtcharakteristik:
 - Beamforming mit Lautsprecher-Arrays..... 12
- Validieren und Feinabstimmen der Geräuschmodelle auf Prototypen oder Technikträgern 14
- Einhalten der Regelungen..... 15
- Fazit 17

Übersicht

Wird ein Fahrzeug mit einem Geräuschgenerator ausgestattet, der bei langsamer Fahrt ein Geräusch abgibt, wird das Fahrzeug besser wahrgenommen. Somit erhöht sich die Sicherheit für Verkehrsteilnehmer in der Umgebung. Doch wie laut sollte das Geräusch sein und, was noch wichtiger ist, welches Geräusch kommt gut an? Geht es nur darum, der AVAS-Pflicht nachzukommen, oder kann über denselben Lautsprecher auch gleichzeitig ein charakteristischer Markensound erzeugt werden? Und sollte das erzeugte Geräusch in allen Richtungen rund um das Fahrzeug hörbar sein? Ist eine gleichmäßige Geräuschabstrahlung im 360-Grad-Winkel der richtige Weg oder ist eine wohldosierte, räumlich gerichtete Geräuschabgabe an den betreffenden Fußgänger oder Radfahrer vorzuziehen?

Fragen wie diese lassen sich durch das Entwickeln passender Geräusche für Fahrzeuge und das anschließende Experimentieren mit diesen Geräuschen, Lautsprechersystemen, Lautsprecherpositionen und Steuergeräten beantworten. In diesem White Paper wird beschrieben, wie unterschiedliche Geräusche entwickelt und von Juroren bewertet werden können. Anschließend geht es darum, wie dieses AVAS-System am besten im Entwicklungsfahrzeug geprüft und implementiert und wie die Einhaltung der Regelungen überprüft werden kann. Um diesen Prozess weiter zu beschleunigen und zu verbessern, wird in diesem White Paper auch erläutert, wie sich verschiedene Experimente mit Simulationslösungen (zumindest teilweise) in der virtuellen Welt durchführen lassen, um die geometrisch-akustischen und Steuerungsaspekte zu optimieren.

Warngeräusche für mehr Sicherheit

Wenn Elektro- und Hybridfahrzeuge im rein elektrischen Modus fahren, kann das Fehlen eines wahrnehmbaren Motorgeräuschs und damit einer Warnung vor sich annähernden Fahrzeugen ungeschützte Verkehrsteilnehmer, (Vulnerable Road Users, VRU) wie Radfahrer, Fußgänger und Sehbehinderte, gefährden. Besonders wichtig ist dies bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit unter 30 Kilometern pro Stunde (km/h), bei der keine Reifenabroll- oder Windgeräusche vernehmbar sind.

Immer öfter werden Mindestgeräuschpegel gesetzlich vorgegeben und Automobilhersteller sind aufgerufen, zu untersuchen, wie Warnsignale im Außenbereich geräuscharmer Fahrzeuge zur Sicherheit anderer Verkehrsteilnehmer beitragen können.

Der Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS) 141 schreibt gesetzlich vor, dass alle neuen Hybrid- und Elektrofahrzeuge in den USA bei einer Geschwindigkeit unter 31 Kilometern pro Stunde (km/h) ein hörbares Annäherungswarnsignal abgeben müssen. Bei höherer Geschwindigkeit ist dies nicht erforderlich, da Fußgänger und Radfahrer dann durch andere Geräusche wie Reifenabroll- und Windgeräusche hinreichend akustisch gewarnt werden. In der Europäischen Union und anderen Mitgliedstaaten der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) gilt die UNECE-Regelung 138.

Das erzeugte Geräusch hat nicht nur die Funktion, Präsenz, Richtung und Position leiser Fahrzeuge besser wahrnehmbar zu machen, sondern muss auch wichtige Betriebsarten wie konstante Geschwindigkeit, Beschleunigung und Verlangsamung für ungeschützte Verkehrsteilnehmer unterscheidbar machen.

Ein Fahrzeug mit künstlichen Geräuschen auszustatten, stellt Automobilhersteller vor eine wichtige Herausforderung: Wenn ihr Fahrzeug schon gezwungen ist, in Stadtrandgebieten Geräusche zu erzeugen, dann am besten einen Sound, der den Markenwert des Fahrzeugs unterstreicht. So betrachtet, ist das AVAS für Automobilhersteller Herausforderung und Chance in einem. Richtig angegangen, könnte der AVAS-Sound zum Wettbewerbsvorteil werden. Es überrascht daher nicht, dass Automobilhersteller ihn zunehmend als strategischen Aspekt sehen, dem bei der Fahrzeugentwicklung entsprechende Beachtung geschenkt werden muss.

Leise Fahrzeuge mit Geräuschen ausstatten

Viele Automobilhersteller haben ihre Fahrzeuge bereits mit Warngeräuschen ausgestattet. Allerdings ist davon auszugehen, dass die Vorgaben für Geräuschpegel und Geräuschart in aktuellen und zukünftigen Regelungen verschärft werden, um weltweit eine Harmonisierung bei der Sicherheit von Elektro- und Hybridfahrzeugen zu erreichen.

Bei der Gestaltung eines Warngeräuschsystems (Abbildung 1) müssen die Hersteller folgende Entwicklungsaspekte berücksichtigen:

- Zunächst müssen verschiedene mögliche Geräuschmodelle entwickelt werden. In dieser Phase ist es wichtig, dass der Geräuschdesigner über Werkzeuge verfügt, die seiner Kreativität Raum geben und ihm die Möglichkeit bieten, eher konventionelle Geräuschmodelle hinter sich zulassen. Mit den richtigen Methodiken entstehen innovative, neue Geräuschmodelle, die nicht nur den Regelungen entsprechen, sondern auch einzigartige Markenwerte darstellen.
- Doch es reicht nicht aus, diese Geräusche und Geräuschmodelle zu entwickeln. Die Modelle müssen

auch im Fahrzeug eingesetzt und von einem AVAS-Lautsprechersystem umgesetzt werden (Abbildung 2). Daher muss zunächst untersucht werden, wie das Fahrzeug die Geräuschabstrahlung beeinflusst, indem zum Beispiel die erstellten Geräuschmodelle am Prototyp des Fahrzeugs oder einem Technikträger geprüft werden. Auch eine Analyse der richtigen Position(en) für den Einbau des AVAS-Lautsprechersystems in das Fahrzeug kann erforderlich sein. Obwohl die meisten Fahrzeuge heute mit einem Lautsprecher am Frontstoßfänger und optional einem weiteren Lautsprecher am Heck ausgestattet sind, damit gerichtete Geräusche erzeugt werden können, würden Konfigurationen mit mehreren Lautsprechern und einer Steuerungsmöglichkeit bevorzugt. Dazu muss die richtige Position der Lautsprecher bestimmt werden, um die erforderliche Richtcharakteristik effektiv herstellen zu können. Ebenfalls wichtig kann es unter Umständen auch sein, die Interaktion mit der Umgebung zu untersuchen und festzustellen, ob ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der Warnwirkung der entwickelten Geräusche und einer Belästigung für die Umwelt besteht. Schließlich kann es auch wichtig sein, die

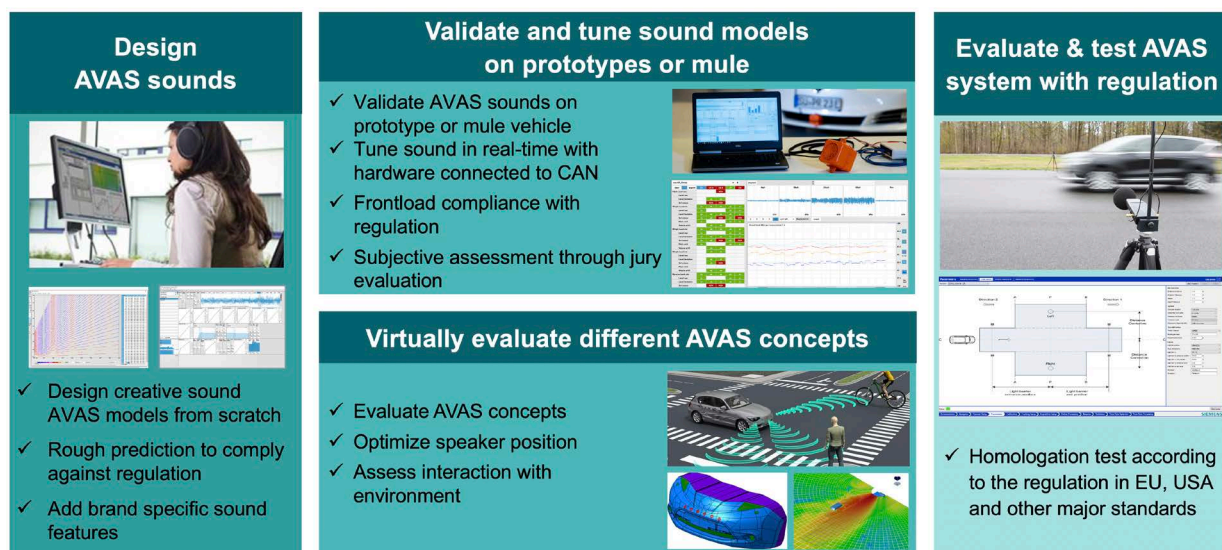


Abbildung 1: Übersicht über die Entwicklungsschritte eines AVAS-Systems.

Auswirkungen der AVAS-Geräusche auf die Geräusche im Innenraum des Fahrzeugs zu untersuchen.

- Diese Untersuchung kann an den Prototypen vorgenommen werden, aber Simulationswerkzeuge machen auch eine Untersuchung in einer früheren Phase möglich. Mit einer Kombination aus akustischen Simulationen und Steuerungsdesign (aktives AVAS) kann der Automobilhersteller die Leistung und Zuverlässigkeit seines Warnsystems bewerten.
- Die verschiedenen Geräuschmodelle müssen am Fahrzeug geprüft werden. Dabei wird überprüft, ob ihre Interaktion mit der Umgebung den Vorgaben entspricht und ob sie den passenden Markensound für Fußgänger erzeugen. Es ist von entscheidender Bedeutung, dass bei der Interaktion mit Fahrzeugparametern (z. B. der Fahrzeuggeschwindigkeit) die richtige Hardware zur Bewertung dieser Modelle verfügbar ist.
- OEMs in der Automobilindustrie (Original Equipment Manufacturers) können sich auch für die Verwendung eines Markensounds entscheiden, der als Warngeräusch fungiert und gleichzeitig den Standards entspricht. Alle diese Geräusche können kombiniert und über dieselben Lautsprecher wiedergegeben werden. Alternativ lassen sich Warngeräusche und Markensound separat über mehrere Gruppen von Lautsprechern ausgeben. Zum Beispiel könnten einige Lautsprecher im Motorraum unter der Motorhaube die Wiedergabe des Markensounds übernehmen und diesen bei allen Fahrzeuggeschwindigkeiten in sämtliche Richtungen abstrahlen. Weitere Lautsprecher ließen sich in Form eines Arrays am Frontstoßfänger platzieren. In diesem Fall könnte das Geräusch mittels Beamforming-Techniken an einen per Kamera erkannten ungeschützten Verkehrsteilnehmer gerichtet und nur bei geringer Fahrzeuggeschwindigkeit abgegeben werden.

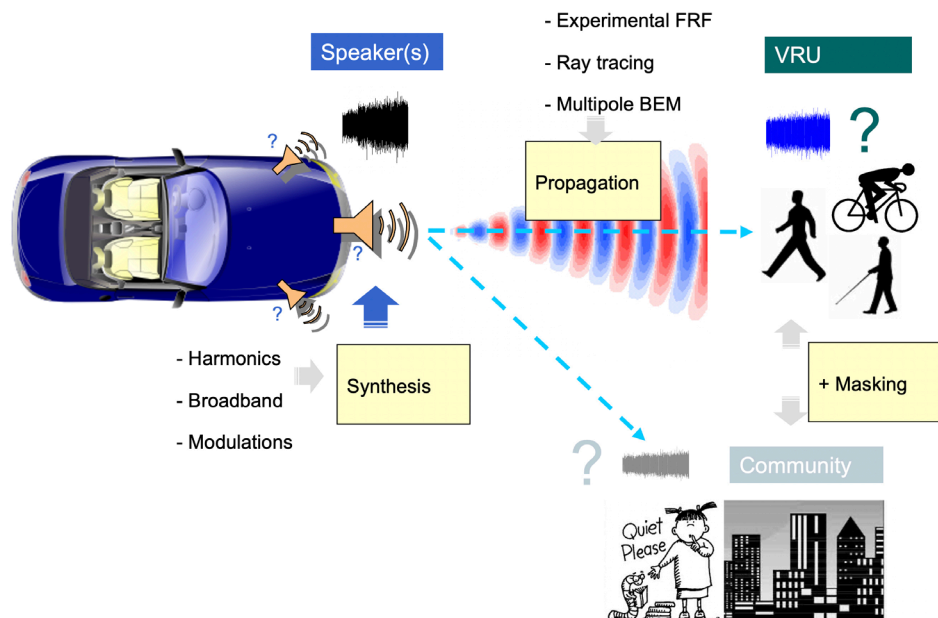


Abbildung 2: Bei der Entwicklung von Warnsignalen wird die Bedeutung von Signalinhalt (Synthese) und Richtcharakteristik (Ausbreitung) deutlich.

Entwickeln eines Sounds für das AVAS-System

Wie ein Verbrennungsmotorgeräusch wird auch das Geräusch eines Elektromotors durch bestimmte mechanische Zwangsbedingungen beeinflusst. Bei Verbrennungsmotoren ist die Anzahl der Zylinder entscheidend für die Klangfarbe. Bei Elektromotoren hingegen führt die Anzahl der Pole und der Ständernute zu hohen, tonalen Geräuschen. Abgesehen von einigen dominanten Tönen erzeugen Elektromotoren einen eher tiefen Klang. Dies macht ein effektives Warngeräuschsystem erforderlich. Wenn das zusätzliche Geräusch über einen Lautsprecher wiedergegeben wird, sind keine mechanischen Zwangsbedingungen zu beachten.

OEMs können sich innerhalb bestimmter gesetzlicher Grenzen frei für ein Geräusch entscheiden. Zum Beispiel¹ sollte die Warngeräuschsignatur bzw. der Gehörseindruck das Fahrzeugverhalten und den geschwindigkeitsabhängigen Anstieg der Tonhöhe und Lautstärke wiedergeben und das Geräusch eines mit Verbrennungsmotor angetriebenen Fahrzeugs der gleichen Kategorie nachempfunden. Dennoch bleibt viel Spielraum für die Gestaltung des Warngeräuschs.

Das Warngeräusch eines Elektrofahrzeugs kann als Markenelement bestimmend für die Marken- oder

sogar die Modellidentität sein. Das Thema einer Fahrzeugmarke sollte allgemein gehalten sein und das Image des Unternehmens unterstreichen. Dieses allgemeine Markenthema muss in jedem Aspekt des Produktgeräuschs und des Marketingmaterials erkennbar sein. Das Warngeräusch jedes Modells sollte auf den Fahrzeugtyp und das Zielsegment (Sport-, Luxus- oder Stadtauto für junge Leute, Familien oder Kunden im High-End-Bereich) abgestimmt werden, aber dennoch eng an den Markensound angelehnt sein. Entscheidungen über das Geräuschdesign setzen voraus, dass Spezifikationen für das Fahrzeug-Branding vorliegen. Sollte die Geräuschsignatur eines Elektrofahrzeugs zum Beispiel an einen Verbrennungsmotor und die Motorordnungen erinnern, also vertraut wirken, oder sollte sie komplexer und melodischer sein und das Fahrzeug eindeutig als Elektrofahrzeug identifizieren?

Als Beispiel soll die Geräuschsignatur im öffentlichen Dataset des Nissan Leaf dienen. Wie Abbildung 3 zeigt, fallen zwei Signalanteile besonders auf. Der erste Signalanteil besteht aus breitbandigen, niederfrequenten Inhalten mit einer Spitzenfrequenz bei 600 Hertz (Hz) und einem wichtigen Anteil bis 1.000 Hz. Eine weitere breitbandige Gruppe befindet sich im Bereich zwischen 2.800 und 3.500 Hz. Der zweite Signalanteil weist rein

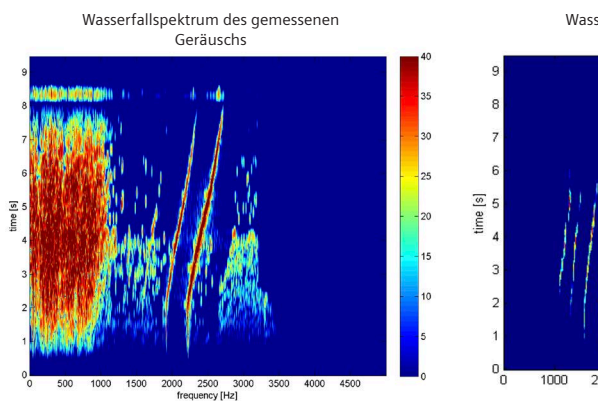


Abbildung 3: Warngeräuschspektrum des Elektrofahrzeugs (0 bis 20 km/h).

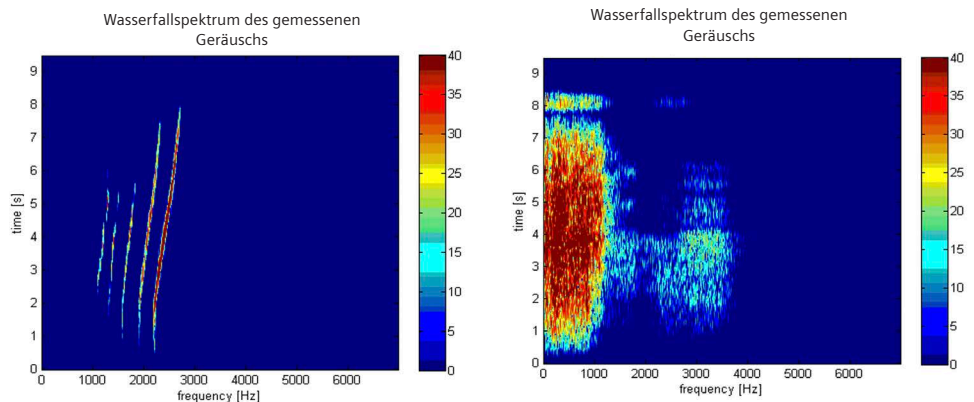


Abbildung 4: Tonale und breitbandige Komponenten des Warngeräuschspektrums.

harmonische Inhalte mit geschwindigkeitsabhängigen Frequenzen auf. Es finden sich zwei Gruppen: eine dominante Gruppe mit zwei Nennfrequenzen, bei 2.000 bis 2.200 Hz, und eine sekundäre Gruppe mit drei Nennfrequenzen bei 1.100 Hz, 1.350 Hz und 1.600 Hz, die vor allem im ersten Teil des Messfensters aktiv sind. Zur weiteren Untersuchung der Signalbestandteile wurde eine Modulationsstudie durchgeführt, um breitbandige und schmalbandige tonale Komponenten zu extrahieren. Das Ergebnis ist in Abbildung 4 dargestellt.⁴

Im Zusammenhang mit der Geräuschwahrnehmung muss zwischen objektiven Messungen und subjektiven Erfahrungen unterschieden werden. Der Hörsinn ist ein wichtiger Sinn des Menschen und kann ein Produkt mit einer Wahrnehmung verknüpfen (z. B. wie zuverlässig, sicher, luxuriös usw. das Produkt ist). Geräusche sind zu einem wichtigen geschäftlichen Kriterium geworden und sind Bestandteil des regulären Produktentwicklungsprozesses. Bei Siemens helfen Geräuschingenieure, das gewünschte Geräusch basierend auf Zielvorgaben zu entwickeln und es auf die Markenidentität des Fahrzeugs abzustimmen.

Das im vorherigen Beispiel erzeugte Geräusch entspricht noch einem eher konventionelles Geräuschmodell. Zur Entwicklung wirklich innovativer Markensound-Modelle kann die Software Simcenter Testlab™ Sound Designer verwendet werden. Mit Simcenter Testlab Sound Designer stehen dem Designingenieur zwei Hauptansätze zur Verfügung, um das AVAS-Geräusch, wie in Abbildung 5 dargestellt, zu entwickeln.

Der erste Ansatz ist eine ordnungsbasierte Geräuschsynthese, die weniger für AVAS-Geräusche, sehr häufig aber für die Entwicklung von Geräuschen zur Optimierung des Innengeräusches verwendet wird. Wie der Name schon sagt, wird das AVAS-Geräusch in diesem Fall basierend auf einer Kombination von Ordnungen erzeugt. Pegel und Form der Ordnungen des Geräuschmodells lassen sich problemlos interaktiv feinabstimmen, wobei sofort die Auswirkung auf das Geräuschmodell bewertet wird. Das resultierende Geräusch ahmt das natürliche Verhalten eines Verbrennungsmotors nach und eignet sich daher weniger als AVAS-Geräusch, das definitionsgemäß beim Fehlen eines Verbrennungsmotorgeräusches erzeugt wird.

Ein zweiter, als Granularsynthese bezeichneter Ansatz wird hauptsächlich bei AVAS-Geräuschen angewendet. Die Granularsynthese ermöglicht vollkommen neue Geräuschkonzepte, die sich vom Geräusch mit Verbrennungsmotor angetriebener Fahrzeuge unterscheiden. Bei diesem Ansatz erzeugt der Geräuschingenieur synthetische Geräusche, die sich aus verschiedenen, variablen Abschnitten einer Audiodatei (sogenannten „Grains“) des Samples zusammensetzen. Diese werden nacheinander über eine bestimmte Zeitdauer wiedergegeben, wobei sich die Höhe mit der Fahrzeuggeschwindigkeit ändert. Auf diese Weise entsteht ein volles, sattes Geräusch, bei dem die Wiederholung desselben Samples dem Hörer nicht auffällt. Diese technologisch ausgereifte Methode ist die am häufigsten angewendete Methode für die Entwicklung von AVAS-Geräuschen. Die gesamte Synthese wird als Funktion der Geschwindigkeit erstellt. Auch Simcenter Testlab Sound Designer ist eine sehr leistungsstarke Lösung zur Optimierung des Innengeräusches. Weitaus häufiger ist in diesen Fällen die Anwendung der Ordnungssynthese.

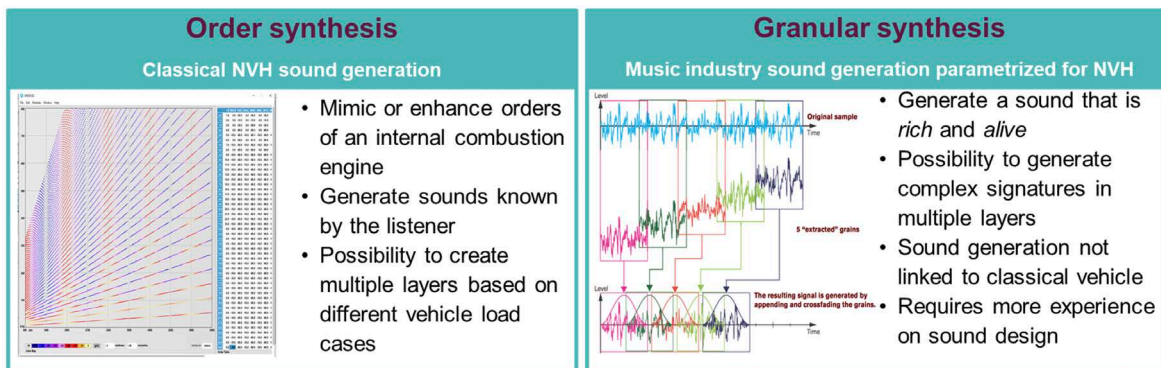


Abbildung 5: Zwei Hauptansätze für die Geräuschentwicklung in Simcenter Testlab Sound Designer

Es genügt nicht, nur Geräuschmodelle zu entwickeln. Das AVAS-System muss später auch den Regelungen entsprechen. Mit Simcenter Testlab Sound Designer kann vorab gewährleistet werden, dass das erstellte Geräuschmodell den Regelungen entspricht, indem die auf Ebene des Fußgängerziels erzeugten Pegel und Frequenzen simuliert werden. Dazu muss der Anwender nur die Übertragungsfunktion vom AVAS-Lautsprecher zum Fußgängerziel eingeben. Diese Übertragungsfunktion wird zur Faltung der entwickelten Geräusche und zur Vorhersage des fertigen Geräuschs am Ziel verwendet. Das resultierende Geräusch wird gemäß verschiedener Standards verarbeitet. Auf dieser Grundlage wird ein erster Bericht erstellt (siehe Abbildung 6). Nicht erfüllte Bedingungen sind im Bericht rot dargestellt. Der Benutzer kann sie daher problemlos aus dem AVAS-Modell ausschließen und so Überraschungen in einer späten Phase des Entwicklungsprozesses vermeiden. Diese Methode kann schon frühzeitig, zum Beispiel durch Annahme einer bestimmten Übertragungsfunktion von einem früheren Fahrzeug, angewendet werden. Alternativ ist die Anwendung am fertigen Prototyp mittels einer physikalisch berechneten Übertragungsfunktion möglich.

Geräusche sind subjektiv. Asiatische Kunden zum Beispiel bevorzugen möglicherweise eine Frequenz oder eine Melodie, die von europäischen Kunden als unangenehm empfunden wird, und umgekehrt. Um einen Einblick in die Präferenzen der Zielkunden zu gewinnen, bietet sich unter Umständen die Bewertung durch eine Jury an.

Mit der Software Simcenter Testlab Jury Testing können Experten das Design des Produktgeräuschs subjektiv bewerten und es mit objektiven Metriken korrelieren. Indem eine festgelegte Gruppe von Hörern den Auftrag erhält, sich entwickelte Geräusche anzuhören und ihren Favoriten auszuwählen, kann wichtiges Feedback von den Zielkunden gesammelt werden. Abbildung 7 zeigt eine Gruppe von Juroren, die an einem A/B-Test zur Bewertung von Fahrzeuggeräuschen teilnimmt. Basierend auf ihren Antworten werden subjektive Präferenz und objektiv gemessene Komponentencharakteristik zueinander in Beziehung gesetzt.



Abbildung 7: Jury bei der Bewertung.



Abbildung 6: Erste Bewertung in Simcenter Testlab Sound Designer zur Überprüfung, ob das erstellte Geräuschmodell die AVAS-Vorgaben erfüllt.

Virtuelle Evaluierung unterschiedlicher AVAS-Konzepte

Bewertung von Schallausbreitung und Richtcharakteristik

Das von einem ungeschützten Verkehrsteilnehmer wahrgenommene Geräusch hängt im Wesentlichen vom Design des Warngeräusches ab. Dieses Geräusch, das an der Quellposition ausgegeben wird, kann durch die Umgebung verstärkt oder gedämpft werden. Bei Lautsprechern unter der Motorhaube des Fahrzeugs zum Beispiel werden einige Frequenzen des entwickelten Geräusches gedämpft, während andere weitergeleitet werden. Das endgültige Geräusch ist daher nicht nur eine Funktion des Quellinhalts, sondern auch der Lautsprecher- und der Empfangsposition. Ein neben dem Fahrzeug stehender Fußgänger hört somit unter Umständen ein anderes Geräusch als ein Fußgänger, der vor dem Auto geht.

Das frequenzabhängige Verhältnis zwischen dem wahrgenommenen Geräusch und der Stärke der Geräuschquelle wird als frequenzabhängige Übertragungsfunktion (Frequency Response Function, FRF) bezeichnet. Auch

wenn diese nur von der Ausbreitungsumgebung abhängig ist, könnte eine Anpassung mithilfe von Steuerungsstrategien möglich sein. Die Übertragungsfunktionen können zum Beispiel von der Zielposition eines Empfängers abhängig gemacht werden. Eine Möglichkeit dazu wäre die Anwendung von Beamforming-Techniken auf Lautsprecher-Arrays. Bei dieser Technik werden alle Lautsprecher mit kurzer Verzögerung mit demselben Signal gespeist (diese Modifizierung wird als Teil der Übertragungsfunktion betrachtet). Das Ergebnis ist ein gerichteter Schallstrahl, der in Richtung der Empfängerposition abgegeben wird. Wie Abbildung 8 zeigt, kann das AVAS-System als System für die Transferpfadanalyse (TPA) gesehen werden, bei dem jede Quelle einen Pfad darstellt, der mit der Stärke der Geräuschquelle und der Stärke der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion zur Antwort beiträgt.

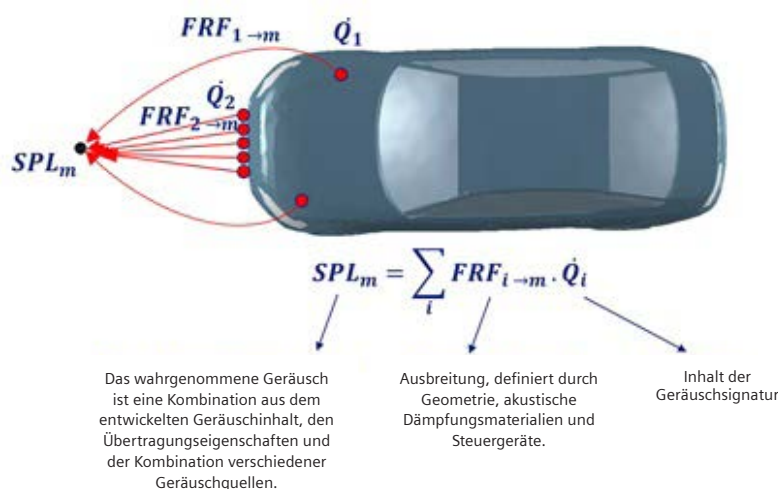


Abbildung 8: AVAS-Warnsystem, Darstellung der Transferpfadanalyse.

Passive Richtcharakteristik: Optimieren der Lautsprecherposition

Aufgrund der vielen möglichen Lautsprecherpositionen, Signalsteuerungen und Geräuschinhalte ist es sinnvoll, eine Reihe von Experimenten durchzuführen, um im Anschluss durch eine quantitative und qualitative Evaluierung das beste Design zu ermitteln. Hierzu können schnelle, High-End-Simulationstechniken eingesetzt werden, die schnell Ergebnisse für eine Reihe von Kombinationen präsentieren.

Die Simcenter 3D-Software umfasst akustische Simulationstechnologien wie Finite-Elemente-Methode (FEM) für die Akustikanalyse, Randelementmethode (auch Boundary-Element-Methode, BEM) für die Akustikanalyse und Ray-Tracing-Methoden (Strahlverfolgung). Mit jeder dieser Methoden lässt sich die Fluidumgebung eines Fahrzeugs sowie das Fluid im Motorraum über Volumenelemente (FEM) oder Rand- bzw. schalenähnliche Elemente (BEM und Strahlenakustik) modellieren. Alle genannten Methoden berücksichtigen die Absorption auf den Fahrzeugoberflächen und erfassen die Verwendung von Absorptionsmaterial im Motorraum.

Für das Nieder- und Mittelfrequenzregime sind FEM und BEM die Referenzmethoden der Branche. Die FEM-basierten Akustiklösungen von Siemens Simcenter beinhalten spezifische Technologien wie AML (Automatically Matched Layer) und FEM Adaptive Order (FEM AO). Beide Techniken ermöglichen wesentlich schnellere Berechnungen als konventionelle FEM-Methoden⁵, sodass

virtuelle Experimente durchgeführt werden können. Trotz dieser leistungsfähigen FEM-Technologien sind FEM- und BEM-Methoden bei hohen Frequenzen zu langsam und eignen sich daher nicht, um eine große Zahl virtueller Experimente durchzuführen. Hierzu kann die Strahlenakustik angewendet werden, die auf Techniken der geometrischen Ausbreitung basiert und in der Regel wesentlich schneller ist als FEM- und BEM-Techniken. Da die Strahlenakustik ein ausreichend hohes Frequenzregime voraussetzt, ist sie eine gute Ergänzung für den FEM- und den BEM-Ansatz. Abbildung 9 zeigt eine Gegenüberstellung von geprüften und simulierten Warngeräuschen für eine bestimmte Lautsprecherposition und einen bestimmten Antwortpunkt vor einem Fahrzeug.⁶ Das Team von Simcenter Engineering and Consulting Services hat verschiedene Ansätze für die Darstellung der Quelle – vom einfachen Monopol bis hin zu einer komplexeren, vibrierenden Lautsprechermembran – untersucht. Obwohl detaillierte Angaben zur Position der Geräuschquelle und zur Skalierung der Frequenz- und Amplitudenachse aus Vertraulichkeitsgründen weggelassen wurden, zeigt die Abbildung doch eine deutliche Korrelation. Dies ist natürlich erforderlich, um den Simulationsergebnissen vertrauen zu können, und kann als Kalibrierung dieser virtuellen Messmethode vor der Untersuchung weiterer AVAS-Designkandidaten angesehen werden.

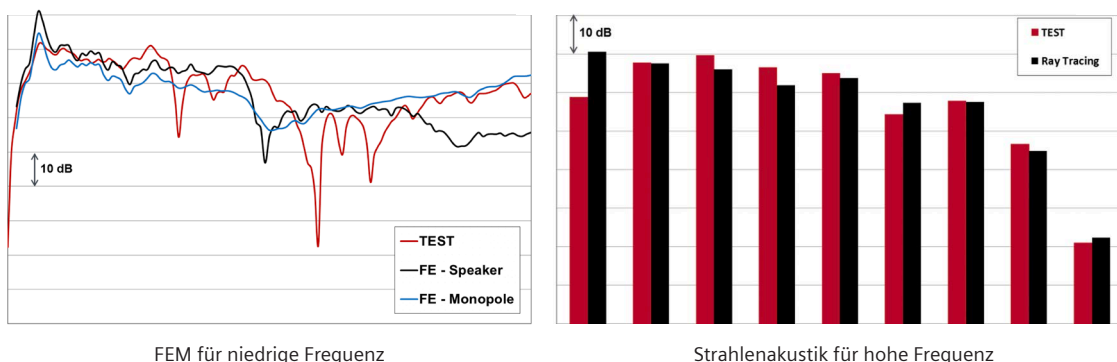


Abbildung 9: Vergleich von geprüften und simulierten frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen mithilfe eines FEM-basierten Ansatzes für niedrigere Frequenzen (links) und eines Ray-Tracing-Ansatzes für höhere Frequenzen (rechts).

Adaptive Richtcharakteristik: Beamforming mit Lautsprecher-Arrays

Wenn eine feste Gruppe von Lautsprecherpositionen und das Motorraumdesign ausgewählt werden, beschreibt dies, wie bereits erwähnt, eine frequenzabhängige Richtcharakteristik. Es gibt Zonen mit höherem Geräuschinhalt, in der Regel zum Beispiel vor dem Fahrzeug, und Zonen mit niedrigerem Inhalt. Falls es das Ziel ist, das ausgegebene AVAS-Geräusch auf bestimmte Positionen ungeschützter Verkehrsteilnehmer zu beschränken, ist ein adaptives System erforderlich, da ungeschützte Verkehrsteilnehmer sich in realen Verkehrssituationen um das Fahrzeug herum bewegen können. Ein solches adaptives System verhindert auch eine zu hohe Lärmbelastung der Umwelt.

Adaptive Systeme wenden in der Regel eine Beamforming-Technik an. Diese erfordert ein Array von Lautsprechern im Frontstoßfänger und einige Steuerungsalgorithmen, die die Verzögerungszeit zwischen den Audiosignalen regeln, die an die verschiedenen Lautsprecher des Arrays übertragen werden. Die erfassten Signale als solche werden weiter mit den frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen multipliziert, die dieses Mal nur der Übertragung des Geräusches in der Umgebung entsprechen (es wird angenommen, dass der Verzögerungsanteil hier bereits in den Quellen enthalten ist). Damit die Form des Stoßfängers bei frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen, Finite-Elemente-Methoden und Strahlenakustik ordnungsgemäß berücksichtigt wird, können Techniken mit Akustikmodellen verwendet werden, die die Prototypen für die Stoßfängergeometrie des Fahrzeugs enthalten. Diese frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen lassen sich auch für mehrere Szenarien evaluieren: Änderungen der Stoßfängergeometrie und Positionierung des Lautsprecher-Arrays, Präsenz anderer Fahrzeuge, Präsenz von Gebäuden, Wetterbedingungen usw.

Siemens Digital Industries Software hat bei eVADER, einem Projekt der Europäischen Union zur Sicherheit von ungeschützten Verkehrsteilnehmern, mitgewirkt. In diesem Kontext haben Simcenter-Experten drei grundlegende Akustikelemente für die Geräte des

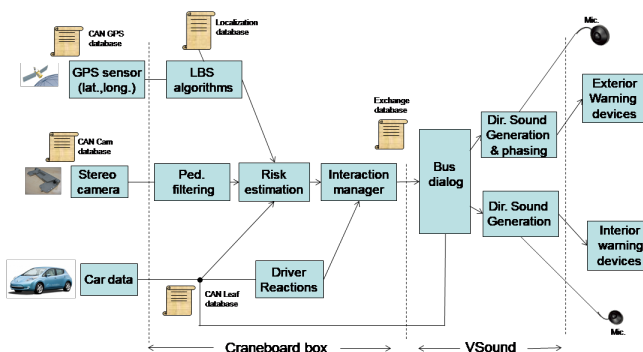


Abbildung 10: Gesamtaufbau des eVADER-Warnsystems (links) und Strategie zur Entwicklung der Warngeräte für den Außenbereich

Siemens Digital Industries Software

Geräuschsystems untersucht: Wahrnehmbarkeit, Belästigung und Markensound. Abbildung 10 zeigt den Aufbau des kompletten eVADER-Warngeräuschsystems sowie die Schritte der Geräteentwicklung. Es wird deutlich, dass das eVADER-System eine Anpassung des Geräusches für erkannte, ungeschützte Verkehrsteilnehmer anstrebt. Die Erkennung erfolgt mittels einer Kamera und beinhaltet außerdem eine Risikoabschätzung als Entscheidungsgrundlage für die Steuerung des Geräusches. Nachdem die Entscheidung getroffen wurde, ein Warngeräusch an eine bestimmte Position abzugeben, wird über Beamforming-Algorithmen ein gerichteter Schallstrahl erzeugt.

FEM-basierte Methoden werden verwendet, um die frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen für ein am Stoßfänger angebrachtes Lautsprechersystem vorherzusagen.⁷ Abbildung 11 zeigt ein Bild der Modell-erstellung. Rechts ist zu sehen, dass die FEM-Methoden von Simcenter Acoustics nur die Modellierung einer kleinen Luftschicht erfordern, die von der Vorderseite des Fahrzeugs bis zum Boden reicht. Dank der AML-Technologie (Automatically Matched Layer) kann mit einem solchen FEM-Modell das Geräusch sowohl innerhalb als auch außerhalb des FEM-Gitters vorhergesagt werden, wie für AVAS-Anwendungen erforderlich. Nachdem die frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen ermittelt wurden, können sie in einem Beamforming-Algorithmus verwendet werden, der die Verzögerungszeiten zwischen den Lautsprechern festlegt.

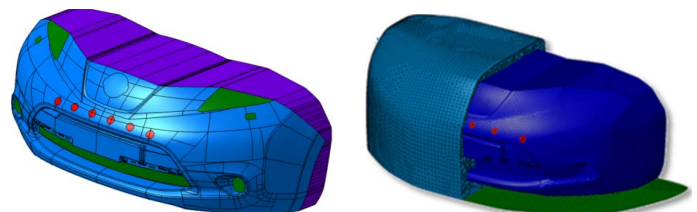
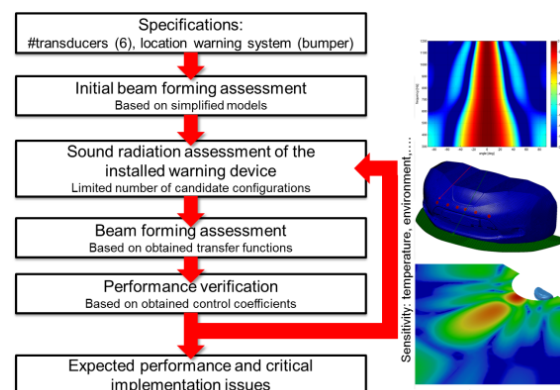


Abbildung 11: Links: CAD-Geometrie des Frontstoßfängers. Rechts: FEM-AML-Akustikmodell mit Lautsprecherpositionen



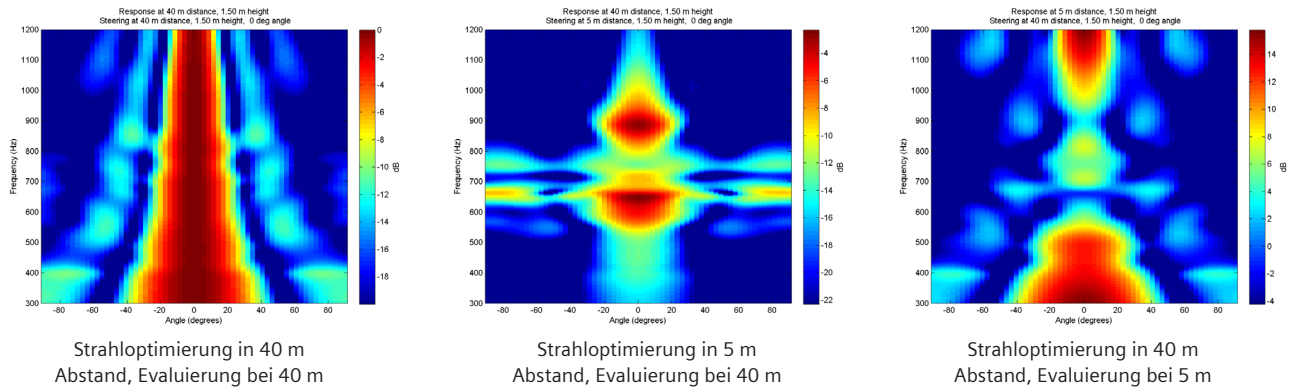


Abbildung 12: Die frequenzabhängige Richtcharakteristik des Strahls wird durch Unterschiede zwischen Ziel- und Evaluierungsbereich beeinflusst.

Abbildung 12 zeigt ein Beispiel für die Steuerung der gerichteten Schallabstrahlung mittels Beamforming. Die Zielrichtung ist in diesem Fall einfach geradeaus. Es wird ein relativ schmaler Strahl erzeugt. Die Richtcharakteristik liegt zwischen -40 und 40 Grad bei niedrigen Frequenzen. Der Strahl wird in einem -15/+15-Grad-Bogen oberhalb von 1 Kilohertz (kHz) aufgefangen. Doch auch die Entfernung spielt eine wichtige Rolle. Wenn die Signalverzögerungszeiten für ein Ziel in 40 Metern Entfernung eingestellt werden und der Schall bei 40 Metern evaluiert wird, ergibt sich das gewünschte Beamforming-Ergebnis. Falls sich die Position des Hörers nicht in der Entfernung befindet, für die die Verzögerungszeiten optimiert wurden, zeigt sich, dass es nur bei bestimmten Frequenzen zu einem effektiven Beamforming kommt. Ein Ortungsgerät erfasst Bereich und Richtung und ermöglicht dem Anwender eine Optimierung in Bezug auf beide Variablen.

Vor allem in Szenarien, bei denen sich andere Fahrzeuge in der Nähe befinden, stellen Ansätze auf Basis der Randelementmethode (BEM) oder von Ray-Tracing eine gute Alternative dar. Grund dafür ist die gegenüber FEM reduzierte Modellgröße bei solchen Szenarien. Das BEM-Modell umfasst die Geometrien, einschließlich der

Reflexionseigenschaften, aller sonstigen Fahrzeuge und der Straßenoberfläche. Zusätzlich kann es Geräuschquellen bei anderen Fahrzeugen, wie Auspuffgeräusche, Verbrennungsmotorgeräusche oder ein anderes Warnsignal, beinhalten. In Abbildung 13 ist ein Szenario dargestellt, bei dem zwei Fahrzeuge am Straßenrand, fünf Meter (m) vor dem sich annähernden Demonstrationsfahrzeug geparkt sind. In diesem Beispiel wurde ein hoch entwickelter Solver für die BEM-Gleichungen ausgewählt: der H-Matrix-BEM-Solver aus den Simulationsprodukten von Simcenter Acoustics.

Diese Simulation gibt den Ingenieuren die Möglichkeit, die Lautstärke vorherzusagen, mit der das Warnsignal bei einem Fußgänger ankommt, der zwischen den geparkten Fahrzeugen steht. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die beiden Fahrzeuge den Bereich, in dem sich der Fußgänger befindet, abschirmen, sodass ein erhöhtes Risiko besteht. Dank der für akustische Simulationen verwendeten, hoch entwickelten numerischen Methoden lässt sich eine solche Leistungsbewertung schnell durchführen. Viele Designs für physische Prototypen können auf diese Weise schon im Vorfeld evaluiert werden, was zu einer Reduzierung der Gesamtentwicklungskosten führt.

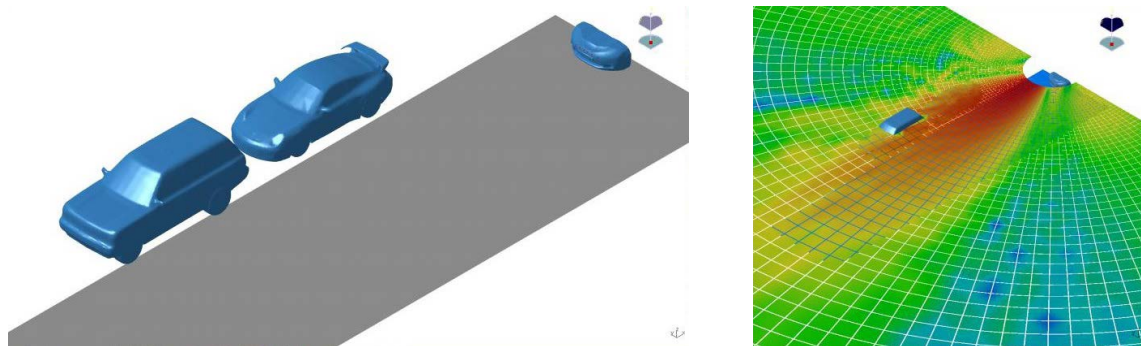


Abbildung 13: Einfluss der Impedanz der Straßenoberfläche und nahe gelegener streuender Objekte auf die Beamforming-Leistung. Links: Diskretisierung eines H-Matrix-BEM-Modells. Rechts: Räumliche Verteilung des Schalldruckfelds bei 600 Hz.

Validieren und Feinabstimmen der Geräuschmodelle auf Prototypen oder Technikträgern

Auch Geräusche, die im Tonstudio hervorragend klingen, müssen im Fahrzeug validiert werden. Die physikalische Prüfung der Klangqualität des AVAS-Systems beim Prototyp des Fahrzeugs ist ein wichtiger Aspekt. Bei diesem Schritt wird das entwickelte AVAS-Geräuschmodell für verschiedene Fahrszenarien des Fahrzeugs geprüft. Als Voraussetzung für die Prüfung muss das Geräuschmodell mit dem CAN-Bus (Controller Area Network) des Fahrzeugs interagieren, um alle relevanten Fahrzeugparameter, zum Beispiel Fahrzeuggeschwindigkeit und Drehmoment, abrufen zu können. Häufig müssen unterschiedliche Varianten des Geräuschmodells geprüft und evaluiert werden. Sogar eine weitere Feinabstimmung der Geräuschmodelle kann sich lohnen. Auch für die Validierung möglicher aktiver Innengeräusche ist dies ein wichtiger Schritt.

Die erforderliche Hardwarekomponente für diesen Prozess ist in Simcenter Testlab Sound Designer verfügbar. Für

die Evaluierung der AVAS-Geräuschmodelle steht ein spezielles AVAS-Lautsprecher-Produktionsmodell bereit, auf das ein oder mehrere entwickelte Modelle geladen werden können. Der Lautsprecher wird über den CAN-Bus des Fahrzeugs angeschlossen und kann für die Evaluierung des Modells an einer oder verschiedenen Stellen des Fahrzeugprototyps angebracht werden. Wenn das AVAS-Geräusch über einen passiven Lautsprecher abgegeben und vom integrierten, digitalen Audiosignalprozessor synthetisiert wird, kann eine spezielle Entwicklungsfahrzeugeinheit verwendet werden. Diese Einheit eignet sich auch zur Prüfung von Geräuschen, die zur Optimierung des Innengeräuschs entwickelt werden.

Beide Hardwarekomponenten sind in Abbildung 14 dargestellt.

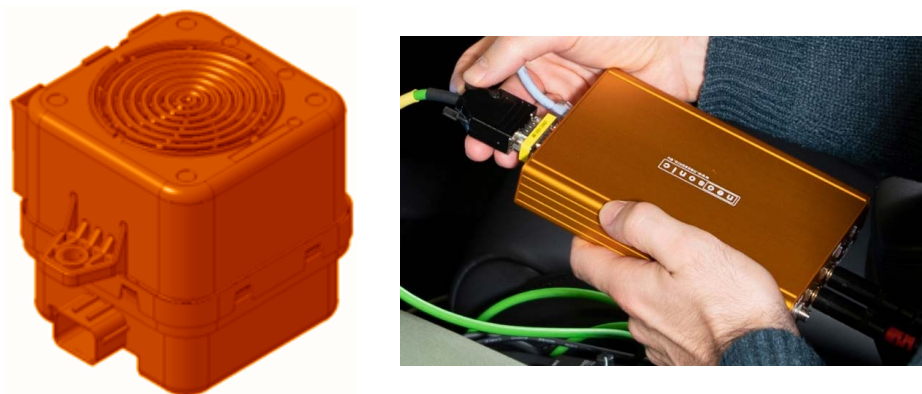


Abbildung 14: Simcenter Testlab Sound Designer-Hardware. Links: AVAS-Lautsprecher zur Prüfung des AVAS-Geräuschmodells. Rechts: Prüfsystem zur Optimierung des Innengeräuschs.

Einhalten der Regelungen

AVAS-Systeme müssen gemäß einem Prüfstandard für das Vorbeifahrgeräusch zertifiziert werden. Die bekanntesten Prüfungen sind in Regelung 51.3 der UNECE festgelegt, die maximale Geräuschemissionswerte für vorbeifahrende Fahrzeuge im städtischen Umfeld vorgibt. Mit der Installation von Geräusche erzeugenden AVAS-Systemen in Elektrofahrzeugen (EV) und Hybridelektrofahrzeugen (HEV) werden neue Standards zur Gewährleistung von Mindestgeräuschpegeln für ungeschützte Verkehrsteilnehmer aufgelegt: Die UNECE-Regelung 138 (R138) wird weltweit, außer in den USA, angewendet. AVAS ist seit Juli 2019 für typgeprüfte Fahrzeuge verpflichtend. Gemäß den EU- und UNECE-Regelungen gilt dies auch für alle elektrisch angetriebenen Personenkraftfahrzeuge, die ab dem 1. Juli 2021 neu registriert werden. Die Prüfung gemäß Regelung FMVSS 141 der US-Behörde für Verkehrssicherheit NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) wird ab September 2020 angewendet.

Abbildung 15 zeigt einen typischen Aufbau gemäß Regelung R138. Nur 2 Meter vom Mittelpunkt des Fahrzeugs entfernt sind zwei Mikrofone positioniert. Gemäß der Regelung R138 wird das AVAS-System folgenden Prüfungen unterzogen:

- Vorwärtsfahrt bei einer konstanten Geschwindigkeit von 10 und 20 km/h sowie Rückwärtsfahrt bei 6 km/h. Diese Prüfungen erfordern einen Mindestgeräuschpegel in mindestens zwei Frequenzbändern der dritten Oktave, wobei ein Frequenzband unterhalb von 1.600 Hz liegen muss.

- Eine Frequenzverschiebungsprüfung, bei der ungeschützte Verkehrsteilnehmer an der mit zunehmender Geschwindigkeit ansteigenden Tonhöhe erkennen können, ob ein Elektro- oder Hybridfahrzeug beschleunigt und wie schnell es fährt.

In der Vorschrift FMVSS 141 in den USA wird zusätzlich eine konstante Geschwindigkeit von 30 Kilometern pro Stunde festgelegt und eine komplexere Bewertung vorgegeben, die die Einhaltung mehrerer nicht benachbarter Frequenzbänder der dritten Oktave zum Gegenstand hat. Zur Effizienz der Prüfungen trägt bei, dass für beide Regelungen die gleichen Datasets verwendet werden können. Ein typischer Bericht ist in Abbildung 16 zu sehen.

Regelung R138 stellt es OEMs in der Automobilindustrie frei, Prüfungen unter diesen Bedingungen auf einer Teststrecke für Vorbeifahrten im Freien oder auf einer Innenanlage durchzuführen. Bei einigen Prüfungen kann der Anwender zwischen einer physischen Prüfung des Fahrzeugs in Bewegung oder einer Simulation dieser Bedingung wählen. Bei Anwendung der erforderlichen Betriebsbedingungen über ein digitales Bussystem zum Beispiel arbeitet das AVAS-System genauso wie bei einem fahrenden Fahrzeug. Die Prüfung gemäß Regelung FMVSS 141 ist ausschließlich im Freien durchzuführen.

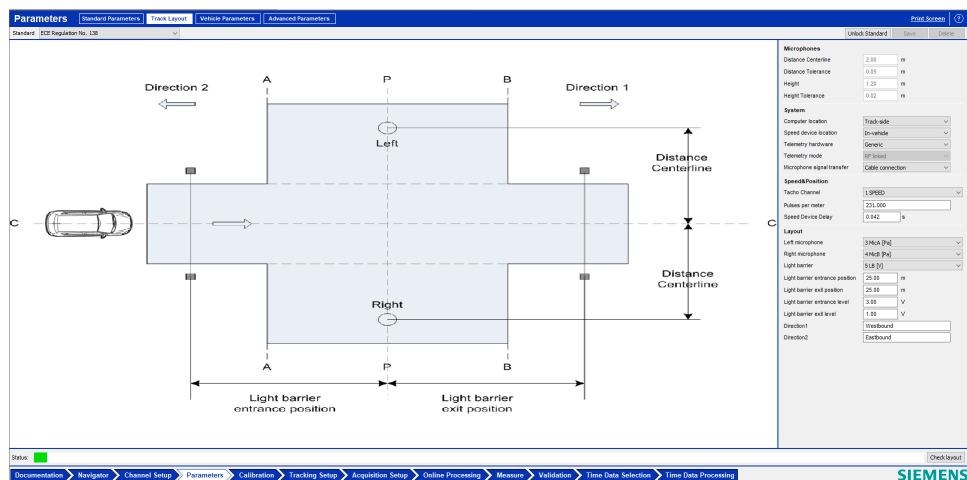


Abbildung 15: Die Siemens-Anwendung Simcenter Testlab mit typischem Teststreckenlayout für UNECE-Regelung 138.



Minimum Sound Requirements for Hybrid and Electric Vehicles IAW 49 CFR § 571.141
Quiet Vehicle Compliance Tool - Summary Log

Testing Data			Operating Conditions	4 Band (S\$ 1)		2 Band (S\$ 2)		Test Result	Relative Volume Change (S\$ 4)	Low Side Location	Relevant Signal Files		
Vehicle Information				# of Passing Band Combinations	Result	# of Passing Band Combinations	Result					Best Result of 4 OR 2 Band Columns	
Year	2020	1. Stationary	0	Fail	1	Pass	Pass		Passenger	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_Statio nary_002.wav	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_Statio nary_003.wav	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_Statio nary_004.wav	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_Statio nary_005.wav
Make	MyVehicle		L Directivity	0	Fail	2	Pass			Pass	Front	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_Statio nary_002.wav	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_Statio nary_003.wav
Model	Model1	2. Reverse	0	Fail	1	Pass	Pass		Passenger	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_Rever se_001.wav	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_Rever se_002.wav	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_Rever se_003.wav	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_Rever se_004.wav
NHTSA No.	-	3. 11 km/h +/- 1	0	Fail	2	Pass	Pass		Pass	Driver	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_10Pas sby_002.wav	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_10Pas sby_003.wav	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_10Pas sby_004.wav
VIN	-	4. 21 km/h +/- 1	0	Fail	10	Pass	Pass	Pass	Passenger	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_20Pas sby_002.wav	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_20Pas sby_003.wav	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_20Pas sby_005.wav	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_20Pas sby_007.wav
User Comments		5. 31 km/h +/- 1	0	Fail	10	Pass	Pass	Pass	Passenger	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_20Pas sby_002.wav	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_20Pas sby_003.wav	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_20Pas sby_005.wav	ProvingGround_20200129_0001_Make_Model_2020_EV_20Pas sby_007.wav
-		Optional Tests											
		6. Between 10-20 km/h											
		7. Between 20-30 km/h											
OVERALL RESULT							Pass						

Quiet Vehicle Compliance Tool Version: Beta 1

Abbildung 16: Typischer Bericht für die Regelungen R138 und FMVSS 141: Für beide Regelungen kann eine einzelne Messkampagne analysiert werden.

Fazit

Ab Juli 2021 ist ein akustisches Fahrzeugwarnsystem für alle neu registrierten elektrisch angetriebenen Personenkraftfahrzeuge verpflichtend. Wenn die Einhaltung der AVAS-Regelungen zum Standard wird, werden die Hersteller das AVAS-System zum Entwickeln eines Markensounds nutzen.

In diesem White Paper wurde erläutert, wie sich durch die Integration von Simulationen und Prüfungen beim Entwickeln des passenden Außengeräuschs und bei der Bewertung der Leistung optimale Ergebnisse erzielen lassen. Das AVAS-System wurde mit Blick auf die Integration in das Fahrzeug und zur ordnungsgemäßen Evaluierung der Alternativen geprüft und im Entwicklungsfahrzeug implementiert. Außerdem wurde eine virtuelle Validierung durchgeführt, um geometrische, akustische und Steuerungsaspekte zu optimieren. Mit dem Spektrum an AVAS-Designs lassen sich Änderungen des Geräuschinhalts ebenso abdecken wie Parameter, die die Geräuschausbreitung oder -übertragung beeinflussen.

Im Zusammenhang mit der Geräuschausbreitung bzw. -übertragung wurde in diesem White Paper beleuchtet, wie sich die Auswirkungen mehrerer Designs mit akustischen Simulationen schnell und effektiv bewerten lassen. Bei Verwendung hoch entwickelter FEM-, BEM- und Ray-Tracing-Ansätze können mehrere Designs virtuell evaluiert und mit Beamforming-Methoden kombiniert werden, um zu einem leistungsfähigen AVAS-System zu gelangen.

Angesichts der wachsenden Produktionszahlen von Elektrofahrzeugen werden AVAS und die aktive Geräuschentwicklung auf Jahrzehnte hinaus die Geräuschkulisse in städtischen Gebieten prägen.

Referenzen

1. Europäische Verordnung in Bezug auf das akustische Fahrzeug-Warnsystem: <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/3/2017/EN/C-2017-4296-F1-EN-ANNEX-1-PART-1.PDF>
2. Critical Pedestrian Safety Legislation Moves to White House for President's Signature: <https://www.prnewswire.com/news-releases/critical-pedestrian-safety-legislation-moves-to-white-house-for-presidents-signature-112016879.html>
3. Minimum Sound Requirements for Hybrid and Electric Vehicles: https://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/QuietCar_FinalRule_11142016.pdf
4. Van der Auweraer H., Janssens K., Sabbatini D., Sana E., „Electric Vehicle Exterior Sound and Sound Source Design for Increased Safety“, Internoise 2011, Sept 4-7, 2011, Osaka, Japan.
5. Vansant K., Bériot H., Bertolini C., Miccoli G., „An Update and Comparative Study of Acoustic Modeling and Solver Technologies in View of Pass-By Noise Simulation“, SAE-Vortrag bei der ISNVH-Konferenz 2014, Graz, Österreich.
6. Bosmans I., Tocarciuc A., Rissler K., Brombach A., „Acoustic simulation for evaluating loudspeaker location for pedestrian warning systems in EV/HEV“, ISMA 2014, Leuven, Belgien.
7. Van Genechten B., Vansant K., Berkhoff A., „Simulation-based design of a steerable acoustic warning device to increase (H)EV detectability while reducing urban noise pollution“, Transport Research Arena (TRA) 2014, Paris, Frankreich.
8. UNECE-Regelung 138 Rev. 1. Uniform provisions concerning the approval of Quiet Road Transport Vehicles with regard to their reduced audibility: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2017/R138r1e.pdf>

Siemens Digital Industries Software

Hauptsitz

Granite Park One
5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
+1 972 987 3000

Nord-, Mittel- und Südamerika

Granite Park One
5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
+1 314 264 8499

Europa

Stephenson House
Sir William Siemens Square
Frimley, Camberley
Surrey, GU16 8QD
+44 (0) 1276 413200

Asien-Pazifik

Unit 901-902, 9/F
Tower B, Manulife Financial Centre
223-231 Wai Yip Street, Kwun Tong
Kowloon, Hongkong
+852 2230 3333

Über Siemens Digital Industries Software

Siemens Digital Industries Software fördert die Transformation von Unternehmen auf ihrem Weg in Richtung „Digital Enterprise“, in dem Engineering, Fertigung und Elektronikdesign bereits heute den Anforderungen der Zukunft entsprechen. Unsere Lösungen unterstützen Unternehmen jeder Größe bei der Entwicklung digitaler Zwillinge, die ihnen neue Einblicke, Möglichkeiten und Automatisierungsgrade bieten, um Innovationen voranzutreiben. Weitere Informationen über die Produkte und Leistungen von Siemens Digital Industries Software finden Sie unter sw.siemens.com oder folgen Sie uns über [LinkedIn](#), [Twitter](#), [Facebook](#) und [Instagram](#). Siemens Digital Industries Software – Where today meets tomorrow.

[siemens.com/software](https://www.siemens.com/software)

© 2020 Siemens. Eine Liste wichtiger Warenzeichen von Siemens findet sich [hier](#). Alle anderen Marken sind Eigentum der jeweiligen Inhaber.

68474-82107-C5-DE 6/20 LOC