# Akustische Funktionsmehrung elektrischer Lenksysteme Teil 2: Aufbau einer prototypischen Steuerkette für eine Sound Design-Funktion im Kraftfahrzeug

Florian Schaschko[1], Robert Henneberger[1], Simon Hecker[1], Stefan Sentpali[1], Stefan Schubert[2], Martin Meyer[3]
[1] *Hochschule München*, [2] *BMW AG*, [3] *Thyssenkrupp AG*

## Einleitung

Unter gewissen Voraussetzungen ist es möglich, eine permanenterregte Synchronmaschine so anzusteuern, dass diese als akustischer Aktuator eingesetzt werden kann [1]. Da in modernen Kraftfahrzeugen bereits viele Elektromotoren vorhanden sind, kann diese Möglichkeit genutzt werden, um den Kundeneindruck vom Fahrzeug weiter zu verbessern, ohne jedoch zusätzliche Aggregate verbauen zu müssen. Auf Basis eines *serienmäßigen* BMW X3 wird eine Funktion vorgestellt, die es erlaubt, den Elektromotor des bereits vorhandenen Lenksystems der Fa. Thyssenkrupp gezielt zu Schwingungen anzuregen, um so den vibroakustischen Eindruck des Verbrennungsmotors im Fahrzeuginnenraum zu verändern.

## Versuchaufbau

Um eine solche Funktion darzustellen, ist es zunächst notwendig, den Elektromotor des Lenksystems fahrzeugunabhängig ansteuern zu können. Die Lenkungsfunktionen dürfen dabei nicht beeinträchtigt werden. Da die vibroakustischen Effekte, die der Verbrennungsmotor im Fahrzeuginnenraum erzeugt, manipuliert werden sollen, müssen außerdem gewisse Informationen über den Betriebszustand, wie beispielsweise die Motordrehzahl, abgerufen werden können. Um den Lenkungsmotor dann um das Leistungsmerkmal 'akustischer Aktuator' zu erweitern, muss eine Einheit zur Verfügung stehen, die alle relevanten Daten einsammelt, geeignet verarbeitet und als Steuerbefehle der Lenkung einprägt.

Abb. 1 zeigt einen Versuchsaufbau, der diese Möglichkeiten bietet. Darin dient ein Notebook als Entwicklungs-, Steuer-

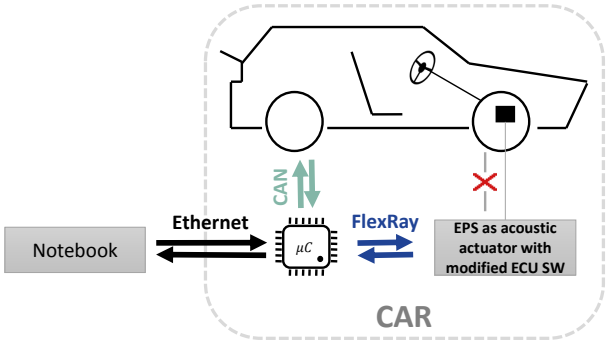


**Abbildung 1:** Versuchsaufbau

und Überwachungseinheit für die relevante Funktionalität bzw. Software. Als Programmierplattform werden dabei die Softwarepakete MATLAB/Simulink mit dSpace RTI-Paketen genutzt [2] [3]. Die Applikationsoberfläche wird über dSpace ControlDesk zur Verfügung gestellt. Die entwickelte Software wird dann auf eine dSpace MicroAutobox aufgespielt, die als echtzeitfähiger Microcontroller ($\mu C$) zu verstehen ist. Die Kommunikation zwischen Notebook und MicroAutobox erfolgt via Ethernet, die zwischen Microcontroller und dem Steuergerät des Lenksystems (EPS ECU) über eine direkte FlexRay-Verbindung. Die Datenverbindung zwischen Fahrzeug und EPS ist dabei stillgelegt. Vom Fahrzeug selbst werden die für die Funktionalität benötigten Daten vom Fahrzeug-CAN beschafft.

Zu beachten ist, dass Microcontroller und EPS ECU im Versuchsaufbau mit unterschiedlichem Takt rechnen.

## Funktionsbeschreibung

Der Versuchsträger ist mit einem Vierzylinder-Benzinmotor ausgestattet. Die Funktion zielt nun darauf ab, in Abhängigkeit der Motordrehzahl gewisse Motorordnungen zu betonen, bzw. nicht ausgeprägte Motorordnungen zu erzeugen.

Das bedeutet, dass der Elektromotor bei einer Verbrennungsmotordrehzahl von $3000\,min^{-1}$ beispielsweise die vierte Ordnung des Verbrennungsmotors verstärkt, in dem er zu einer Schwingung mit einer Frequenz von $200\,Hz$ und geeigneter Amplitude angeregt wird.

In der vorgestellten Funktion, wurde technisch das Einspielen von bis zu drei zusätzlichen Motorordnungen vorgesehen. Ebenso ist eine Amplitudendynamik in Abhängigkeit der Verbrennungsmotordrehzahl vorgesehen. Wesentlicher Unterschied, im Vergleich zur Soundgestaltung mit Hilfe der Fahrzeugaudioanlage, ist hier die Ähnlichkeit des Übertragungswegs von Elektro- bzw. Verbrennungsmotor in den Innenraum. Für einen sehr plastischen Eindruck der Soundfunktion sorgen insbesondere die übertragenen Vibrationen.

## Funktionsaufbau

Um nun Schwingungen mit dem Elektromotor zu erzeugen, muss eine geeignete Schnittstelle zur Ansteuerung auf der EPS ECU zur Verfügung stehen. Diese Schnittstelle ist kein Bestandteil der Seriensoftware, d.h. es war notwendig, die Lenkungssoftware mit Hilfe von Thyssenkrupp um diese Schnittstelle zu erweitern. Die Schnittstelle erlaubt es, bis

zu drei Tripel (Amplitude $A_k$, Frequenz $f_{EPS}$, Phasenwinkel $\varphi$) für eine Generierung sinusförmiger Signale vorzugeben.

Auf Motorebene wird dazu in die Vektorregelung eingegriffen. Die sinusförmigen Signale werden bezüglich des rotorfesten d/q-Koordinatensystems in d-Richtung (radial) eingeprägt. Ist die Frequenz der eingeprägten Schwingung hinreichend hoch, so ist auch eine teilweise Einprägung in q-Richtung (tangential) möglich. Dies beeinflusst die Lenkbarkeit nicht, da der Sinus ein mittelwertfreies Signal ist.

Abb. 2 zeigt die Kommunikation zwischen Fahrzeug, Microcontroller und EPS auf Schnittstellenebene. Das Modell, dass die Funktionalität implementiert, ist auf dem Microcontroller abgelegt, und wird dort mit einem Takt von $500\,Hz$ berechnet. Da ein höherer Takt aufgrund weiterer Funktionalitäten die außerdem implementiert sind nicht möglich ist, könnten Schwingungen sinnvoll nur bis etwa $80\,Hz$ mit Hilfe des Microcontrollers erzeugt werden. Die EPS ECU taktet erheblich höher. Deshalb wurde die Generierung der Sinustöne auf die EPS ECU ausgelagert. Außerdem konnte so schon einmal festgestellt werden, dass für diesen Teil der Zusatzfunktion ausreichend Ressourcen auf der Serien-ECU zur Verfügung stehen.

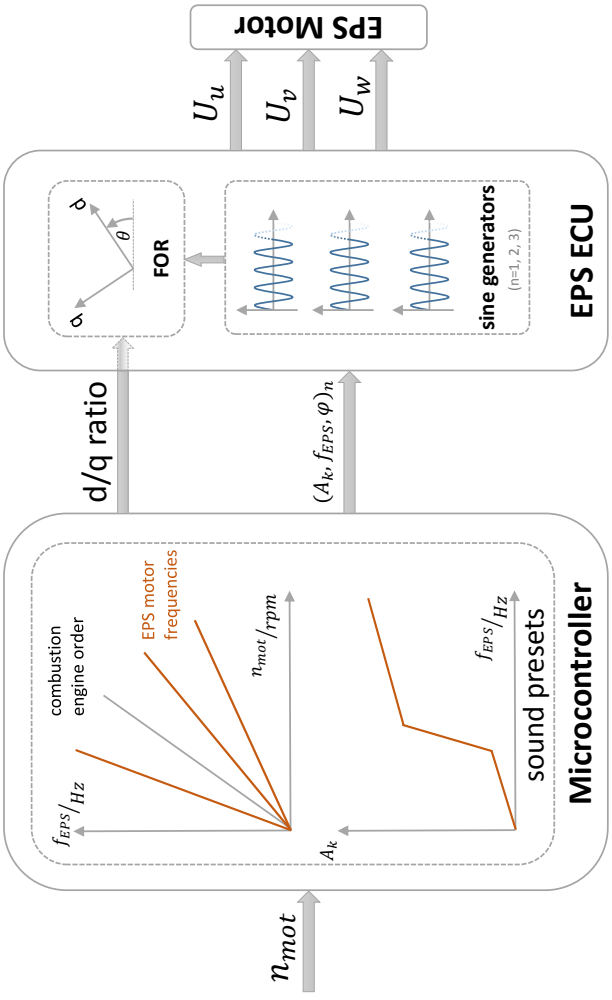


**Abbildung 2:** Schnittstellenkommunikation zwischen Fahrzeug, Microcontroller und EPS

Auf Softwareebene werden die Steuersignaltripel mit einem Simulationsmodell erzeugt, welches in kompilierter Form auf dem Microcontroller abgelegt ist. Die Software holt sich zunächst die Verbrennungsmotordrehzahl vom Fahrzeug-CAN. Diese Drehzahl bzw. Schwingungsfrequenz wird dann elementweise mit einem Ordnungsvektor multipliziert. In diesem sind die Motorordnungen abgelegt, die der Elektromotor auf Basis der Verbrennungsmotordrehzahl erzeugen soll. Ergebnis der Multiplikation sind die Frequenzen $f_{EPS}$. Zu jedem Ordnungsvektor wurde auch ein passender Amplitudenvektor für die jeweiligen Ordnungen erzeugt. Zur Demonstration wurden dann einige Voreinstellungen für jeweils ein Set aus Amplituden- und Ordnungsvektor definiert. Zum Beispiel werden bei einer Voreinstellung, um den Motorlauf rauer darzustellen, halbe Ordnungen (z.B. 2.5, 3.5) eingespielt. Um den Motor drehfreudiger darzustellen, wurden ganze Ordnungen verstärkt, und die Amplituden dieser Ordnungen dynamisch mit steigender Drehzahl angehoben.

## Ergebnis

Abb. 3 zeigt das Amplitudenspektrum, das am rechten Fahrerohr bei einer Verbrennungsmotordrehzahl von $2000\,min^{-1}$ zu hören ist. Die Abbildung stellt die Akustikfunktion an einem konstanten Betriebspunkt mit einem Parametertripel dar, welches den Klangeindruck des Verbrennungsmotors voller und agiler wirken lässt. Der mit der Funktion ebenfalls eingeleitete vibratorische Eindruck folgt dieser Darstellung, und führt zu einem noch plastischeren Effekt im Fahrzeuginnenraum [4].

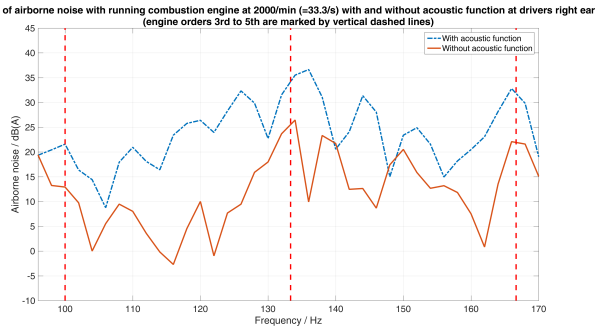


**Abbildung 3:** Darstellung des Luftschalls am Fahrerohr mit und ohne Akustikfunktion

## Literatur

[1] Hecker, S. et al., Akustische Funktionsmehrung elektrischer Lenksysteme, Möglichkeiten und Umsetzung mit Hilfe des E-Motors, DAGA 2016, Aachen

[2] The MathWorks, MATLAB/Simulink, Url: http://mathworks.com

[3] dSpace, Real-Time Interface, MicroAutobox II, Url: http://dspace.com

[4] Henneberger, R. et al., Akustische Funktionsmehrung elektrischer Lenksysteme, Experimentelle Validierung im Fahrzeug, DAGA 2016, Aachen