

# Modell der winkelabhängigen Signalform eines Fahrzeugs mit zwei Auspufföffnungen

Achim Hensel, Jürgen Altmann

Bochumer Verifikationsprojekt, Institut für Experimentalphysik III, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum

## Bochumer Verifikationsprojekt

Das Bochumer Verifikationsprojekt (BVP) untersucht, ob automatische Sensorsysteme für die kooperative Verifikation von Abrüstungs- und Friedensabkommen geeignet sind. Für passiven, tageszeit- und wetterunabhängigen Nachweis von Landfahrzeugen über mittlere Entfernungen benutzen wir v.a. Schall und Bodenvibration. Für die Anwendung wird an Sensorstationen gedacht, die aufgenommene Signale weitgehend autonom verarbeiten und bei Vertragsverletzung bzw. unklarem Ereignis einen Alarm an eine Zentrale senden. Dabei ist eine Aussage über den erkannten Fahrzeugtyp hilfreich. Bisherige Messungen und Auswertungen haben gezeigt, dass dazu der Motorschall prinzipiell geeignet ist.<sup>[1]</sup> Jedoch zeigten sich bei Vorbeifahrten mancher Fahrzeuge starke Änderungen der Signalform. Zu deren Verständnis wurde 1999 der Motorschall eines Leopard-1-Kampfpanzers im Stand rundherum mit 6° Auflösung bei vielen Drehraten gemessen, was die Winkelabhängigkeit der Signalform bestätigte.<sup>[2]</sup> Zur Erforschung der physikalischen Gründe benutzten wir ein theoretisches Modell mit drei Schallquellen. Um die Quellen einzeln zu untersuchen, bauten wir ein verkleinertes Fahrzeugmodell und machten daran entsprechende Messungen und Auswertungen.

## Theoretisches Modell

Das stehende Fahrzeug besteht im Modell aus zwei bzw. drei Punktquellen, dem linken und rechten Auspuff (an den Seiten hinten) und ggf. der Ansaugöffnung (auf der Oberseite in der Mitte dazwischen). Sie geben periodische akustische Signale ab, die durch bis zu 25 Fourierkomponenten  $s_{j,k}$ ,  $c_{j,k}$  beschrieben werden ( $j=1..3$ ):

$$Q_j(t) = \sum_k s_{j,k} \sin k\omega_0 t + c_{j,k} \cos k\omega_0 t \quad \text{eq. 1}$$

Diese Signale kommen nach bestimmten Zeiten  $t_j^l$  an den 60 Mikrofonen an und sind nur in der Amplitude mit Faktoren  $A_j^l$  multipliziert. Formveränderungen, etwa zeitliche Verschmierungen wegen unterschiedlicher Beugungswege um das Fahrzeug, sind also nicht erfasst, aber richtungsabhängige Verlängerungen der Laufzeit oder Abschwächungen der Amplitude sind möglich. (Streifende Reflexion am porösen Boden sollte über den verwendeten Frequenzbereich 10-400 Hz nicht sehr variieren.) An jedem Ort summieren sich die zwei oder drei Signale zu einem gesamten theoretischen Sensorsignal

$$S_{theo}^l(t) = \sum_j A_j^l Q_j(t - t_j^l) \quad \text{eq. 2}$$

## Nichtlineare Anpassung der Quellsignale

Die an den Mikrofonorten berechneten theoretischen Signale sollen durch Variation der Modellparameter den gemessenen möglichst ähnlich werden, gemessen durch ein Minimum der Summe der quadratischen Abweichungen  $\chi^2$ . Weil die Amplitudenparameter  $A_j^l$  mit den Fourierkoeffizienten  $s_{j,k}$ ,  $c_{j,k}$  multipliziert werden, ist das auch bei festen Zeitverschiebungen  $t_j^l$  ein nichtlineares Problem. Zur Anpassung der Amplituden und Fourierkoeffizienten wurde das Levenberg-Marquardt-Verfahren verwendet mit bis zu  $3*2*25$

+  $2*3*60 = 510$  Parametern. Für die bis zu  $3*60$  Zeiten wurde in der Regel eine zwei- oder dreidimensionale Minimumsuche im Raster der diskreten Schritte der Signalabtastung durchgeführt. Beide Verfahren wurden abwechselnd iteriert, bis ein zufriedenstellendes Minimum gefunden war. Als erste Startwerte bei den Zeiten diente die aus dem Abstand (ohne Umwege um das Fahrzeug) berechnete Schalllaufzeit von der Quelle zum Sensor, die Amplitudenfaktoren wurden meist mit 1 und die Fourierkoeffizienten wurden mit dem Kehrwert ihres Index  $l$  initialisiert. Zum Vergleich von Anpassungen mit unterschiedlicher Sensoranzahl oder Periodendauer wurde die relative rms-Abweichung  $\eta$  benutzt ( $\eta = \sqrt{\chi^2 / \sum \sum S_{mess}^2}$ ).

## Anpassungsergebnisse bei den Standmessungen

Aus den Messungen des stehenden Kampfpanzers wurden drei Motorfrequenzen ausgewählt: 6,8, 13,2 und 19,9 Hz. Hier wurde für 59 Winkel (1 Mikrofon war defekt) in 30 m Abstand über je 4 Sekunden zeitrichtig über die Motorperiode gemittelt. Für die besten Anpassungen ergaben sich bei 2 Quellen  $\eta$ -Werte um 0,032, bei 3 Quellen um 0,025 (Siehe Abb. 1). Während das linke Signal bei unterschiedlichen Sensorauswahlen etwa konsistent bleibt, scheint es zwischen rechtem und mittlerem „Übersprech“-Artefakte zu geben.

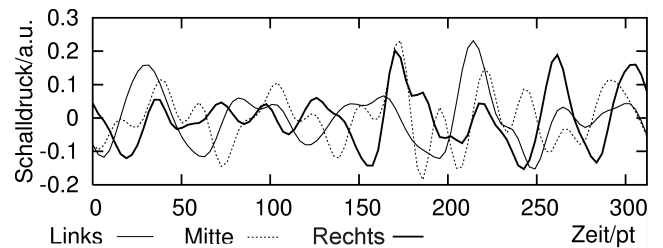


Abb. 1 Meppener Signale für Drehrate 20 Hz (1 pt=22,6  $\mu$ s)

## Skaliertes Modell

Zur Trennung der Effekte einzelner Quellen wurde aus schichtverleimtem Hartholz ein Panzermodell im Maßstab 1:7 gebaut. Drei an den entsprechenden Positionen eingelassene Lautsprecherboxen simulieren die Auspuff- und Ansaugöffnungen. Das Modell wurde im reflexionsarmen Raum drehbar aufgebaut und im Abstand 30 m/7 wurden 4 Mikrofone aufgestellt, ebenfalls mit je 6° Winkelabstand (freier Raum ohne Boden). Theoretische Quellsignale wurden siebenfach schneller einzeln und gemeinsam abgespielt und die Mikrofonensignale digital aufgezeichnet (RME ADI-8 PRO, Nuendo, Sony-Laptop-PC). Nach jeder solchen Messung wurde das Modell um 18° weiter gedreht. Neben den Quellsignalen aus der Anpassung wurden auch solche verwendet, die durch zeitrichtiges Aufsummieren der gemessenen Signale für die Orte der Quellen (Stapeln mit Annahme Kugelwellen) berechnet wurden.

## Anpassung der Quellsignale beim skalierten Modell

Wir diskutieren hier nur die Stapelsignale bei 19,9 Hz. Signale nur einer Quelle wurden bei der nichtlinearen Anpassung sehr gut reproduziert ( $\eta$  um 0,012), es ergaben sich plausible und konsistente Verläufe der Amplituden und Zeiten (Abb. 2 bis 4). Bei drei Quellsignalen war die Übereinstimmung etwas besser ( $\eta$  um

0,009), Amplituden und Zeiten zeigten jedoch mehr Variation; eine Vermischung von Signalen trat nicht auf (Abb. 2 bis 4).

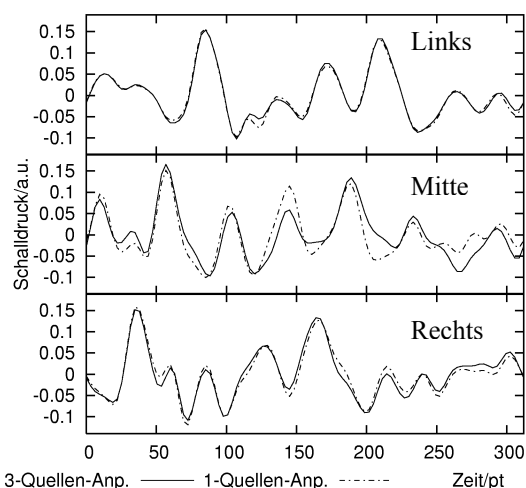


Abb. 2 Aus der Anpassung gewonnenen normierte Quellsignale des linken, mittleren und rechten Lautsprechers bei einzelner und gemeinsamer Ausstrahlung (1 pt=22,6  $\mu$ s).

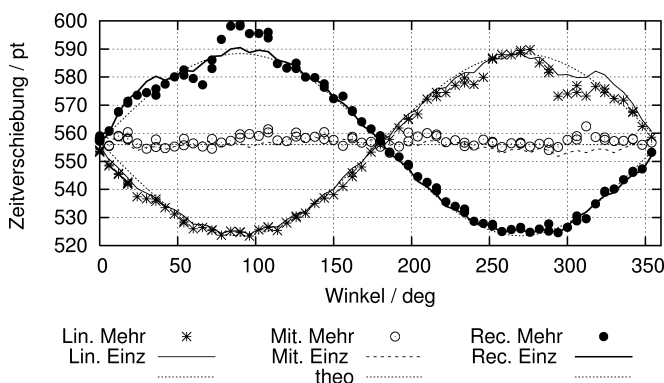


Abb. 3 Verzögerungszeiten über Winkel bei Einzelquellen (Kurven), drei Quellen (Symbole) und für rein geometrischen Abstand („theo“, dünne Linie) für das (Lin)ke, (Mit)tlere und (Rec)hte Quellsignal

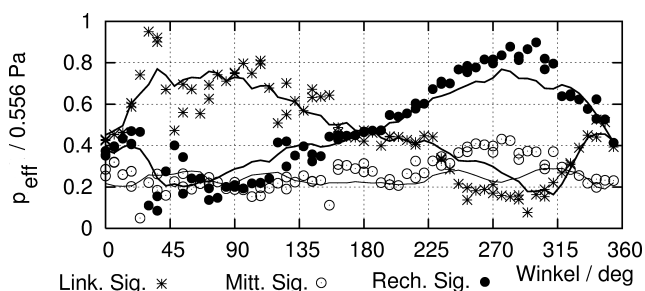


Abb. 4 Amplituden über Winkel bei Einzelquellen (Kurven) und drei Quellen (Symbole)

### Richtungsabhängige Veränderung eines Signals

Bei Einzelsignalen aus den seitlichen (Auspuff-)Quellen ergaben sich in den meisten Richtungen ähnliche Signalformen, jedoch traten deutliche Abweichungen nach schräg vorn gegenüber wie auf der selben Seite auf (Abb. 5). Dies kann an den verschiedenen langen Wegen um den Panzerturm herum liegen bzw. an Reflexion an der Fahrzeugseite. Solche Formveränderungen sind in unserem Modell nicht enthalten und verschlechtern daher die Güte der Anpassung.

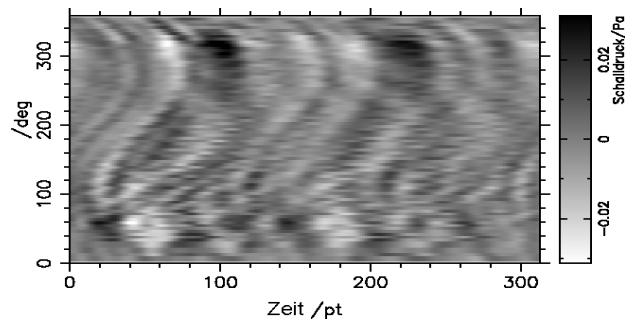
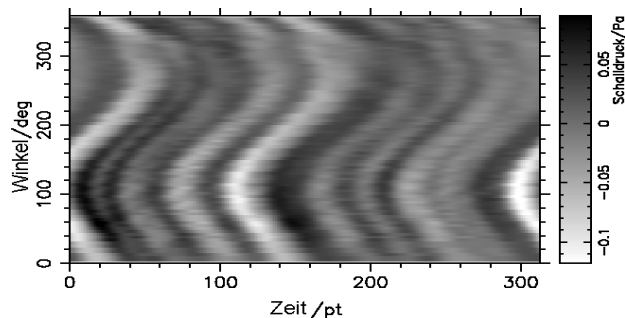
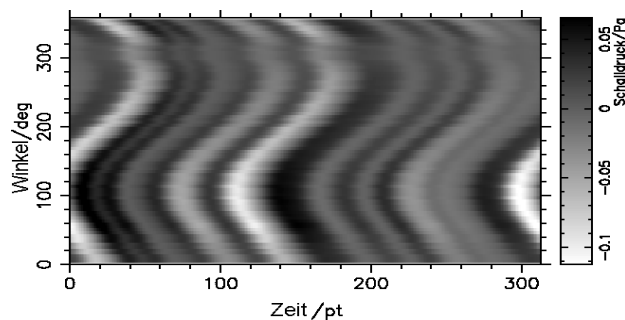


Abb. 5 Signalauslenkungen für verschiedene Winkel bei Abstrahlung aus dem linken „Auspuff“ (90°); von oben nach unten: angepasste Signale, gemessene Signale, Differenz

### Beurteilung, Ausblick

Die Anpassungen haben bestätigt, dass die beiden Auspufföffnungen die Hauptquellen sind. Deren Signale werden durch Beugung und Reflexion in manchen Richtungen deutlich verändert. Die im skalierten Modell vorhandene dritte Quelle wurde in den Anpassungen gefunden, wohingegen ihre Existenz im Fahrzeug nicht so eindeutig bestätigt werden konnte. Die in der Fahrzeugmessung gefundenen starken Amplitudenspitzen über dem Winkel konnten im Modell nicht reproduziert werden; dies könnte an Richtwirkungen auf Grund ungleichzeitiger Ausströmung aus den flächenhaften Auspufföffnungen liegen, die mit einem einzigen Lautsprecher nicht simuliert werden können.

Insgesamt kann das 2- oder 3-Punktquellenmodell die Signalformveränderung nicht in allen Richtungen erklären. In Zukunft sollten Beugungs- und Reflexionseffekte einbezogen werden.

### Dank

Wir danken dem Institut für Kommunikationsakustik der Ruhr-Universität Bochum für die Nutzung des reflexionsarmen Raumes und die großzügige Hilfe bei den Messungen.

<sup>1</sup>J. Altmann, S. Linev, A. Weiß, Acoustic-Seismic Detection and Classification of Military Vehicles – Developing Tools for Disarmament and Peace-keeping, Applied Acoustics 63, 1085-1107, 2002

<sup>2</sup>Hoffmeyer/Altmann DAGA 2000