

# MODELLIERUNG DER SCHALLFÜHRUNG VON PKW-HUPEN

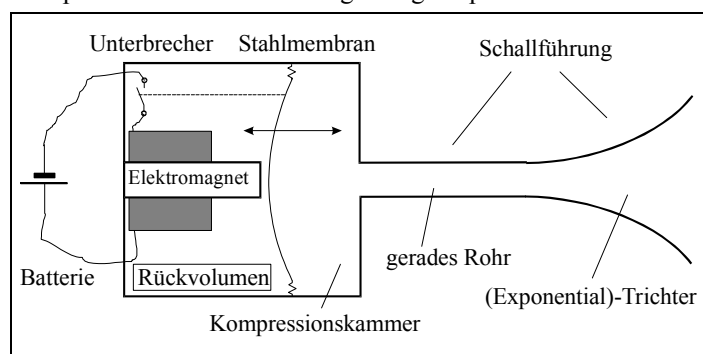
Ennes Sarradj, Jörn Hübelt

Institut für Technische Akustik, TU Dresden, 01062 Dresden

Die technischen Anforderungen an Signalhörner (Hupen) für Kraftfahrzeuge sind sehr hoch. Unter einer Vielzahl von Nebenbedingungen (Temperatur, Stromaufnahme, Herstellungspreis, Klang ...) müssen sehr hohe Schallpegel (z.B. 105 dB in 2 m Abstand) innerhalb eines vorgegebenen Frequenzbandes (1800-3550 Hz) erzeugt werden.

So sind die auf den ersten Blick sehr einfach aufgebauten Hupen in der Praxis weitgehend optimierte Geräte mit einer Vielzahl von Konstruktionsparametern. Um die Entwicklung effektiver zu gestalten, ist es wünschenswert, die derzeit im wesentlichen empirische Auslegung durch die systematische Einflußnahme auf die Eigenschaften einer Hupe zu ersetzen. Die dazu notwendigen Erkenntnisse können mit Hilfe der akustischen, mechanischen und elektrischen Modellierung einer Hupe gewonnen werden. Der erste Schritt auf dem Weg zu einem solchen Modell wird im folgenden beschrieben. Dabei wird insbesondere auf die Modellierung der Schallführung eingegangen.

In Bild 1 ist das Funktionsprinzip einer Hupe dargestellt. Ein mit Gleichstrom gespeister Elektromagnet zieht eine Membran aus Stahl an, die einen Unterbrecherkontakt öffnet. Durch das Öffnen des Unterbrecherkontakts wird der Stromfluß unterbrochen und die Membran bewegt sich in ihre Ruhelage zurück, bis sich der Unterbrecher wieder schließt. Dieses einfache Prinzip (Wagner'scher Hammer) sorgt für die Schallentstehung. Hinter der Membran befindet sich ein Rückvolumen, davor eine Kompressionskammer und eine Schallführung, die der Hupe einen höheren Wirkungsgrad verleiht. In der Praxis hat sich gezeigt, daß nahezu alle Parameter einen deutlichen Einfluß auf wichtige Eigenschaften, wie Grundfrequenz, Schallpegel, Spektrum usw. haben. Die getrennte Modellierung und Optimierung einzelner Komponenten ist deshalb wenig erfolgversprechend.



**Bild 1: Funktionsprinzip einer Hupe**

Für die gemeinsame Modellierung der elektrischen, mechanischen und akustischen Komponenten bietet sich die Verwendung mechanisch/elektrischer und akustisch/elektrischer Analogien an. Bild 2 zeigt das unter Verwendung solcher Analogien erstellte Modell, das lineare „Kleinsignal-Ersatzschaltbild“ einer Hupe. Zur Simulation der realen, oben beschriebenen Funktionsweise ist die Einbeziehung von Nichtlinearitäten („Großsignal-Ersatzschaltbild“) zwingend notwendig [2]. Das vorgestellte Modell dient deshalb in erster Linie zur Erprobung der Modellierungstechnik und zur Bestimmung und Überprüfung der erforderlichen Parameter.

Im mechanischen Teil ist die Kraft  $F$  analog zum elektrischen Strom  $i$ , die Schnelle  $v$  ist analog zur Spannung  $U$ ,

Nachgiebigkeiten  $n$  (Kehrwehrt der Steifigkeit) entsprechen Induktivitäten, Massen entsprechen Kapazitäten und Verluste durch Reibung werden durch Widerstände abgebildet. Im akustischen Teil sind Schallfluß  $q$  und Schalldruck  $p$  Strom und Spannung analog, akustische Nachgiebigkeiten  $N$  (Volumina, die komprimiert werden können) entsprechen Kapazitäten. Die verwendeten Analogien sind z.B. in [2] erläutert.

Die Darstellung der Schallführung durch Wellenleiter-Vierpole beruht auf Übertragungsmatrizen. Die Schallführung besteht aus zwei Abschnitten, einem Rohr der Länge  $l_R$  mit konstantem Querschnitt  $A_1$  und einem Exponentialtrichter (Eingangsquerschnitt  $A_2=A_1$ , Ausgangsquerschnitt  $A_3$ ). Die Querabmessungen sind klein gegenüber den auftretenden Wellenlängen. In der Literatur finden sich dafür die Übertragungsmatrizen [3][4]:

$$\begin{pmatrix} p_2 \\ q_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta l_R & \frac{\rho c}{A_1} j \sin \beta l_R \\ \frac{A_1}{\rho c} j \sin \beta l_R & \cos \beta l_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ q_1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} p_3 \\ q_3 \end{pmatrix} = e^{m l_T} \begin{pmatrix} \cos \beta l_T - \frac{m}{\beta} \sin \beta l_T & \frac{\omega \rho}{\beta A_3} j \sin \beta l_T \\ \frac{\omega A_2}{\rho c^2 \beta} j \sin \beta l_T & \frac{A_2}{A_3} \left( \cos \beta l_T + \frac{m}{\beta} \sin \beta l_T \right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_2 \\ q_2 \end{pmatrix}$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \frac{m c}{\omega}} ; m = \frac{\ln(A_3/A_2)}{2 l_T}$$

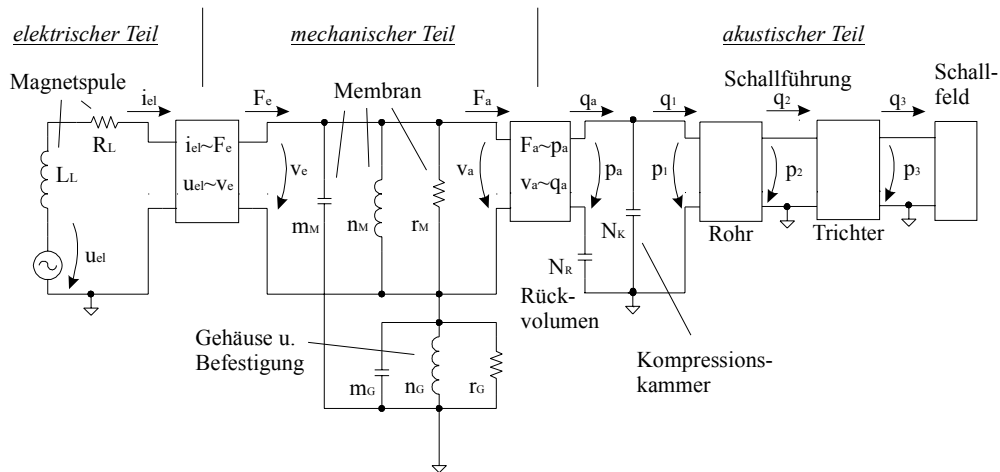
Sie gelten exakt nur für die Ausbreitung ebener Wellen (eindimensional). Da die Schallführung der Hupen in der Praxis stark gekrümmt ist (Bild 5), ist es zumindest fraglich, ob sich die Matrizen ohne weiteres verwenden lassen. Weiterhin ist das Vorhandensein von ebenen Wellen für den Trichter ohnehin in Zweifel zu ziehen.

Das Schallfeld außerhalb der Hupe ist im Modell durch einen Zweipol dargestellt. Da Messungen im interessierenden Frequenzbereich eine näherungsweise kugelförmige Richtcharakteristik ergaben, wurden die Beziehungen für einen Kugelstrahler 0. Ordnung verwendet (Radius  $R$ ):

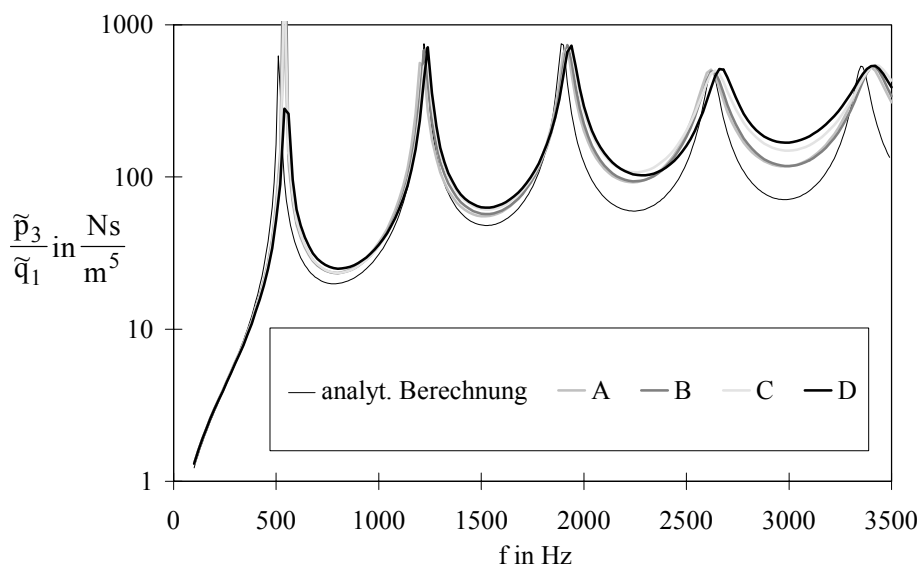
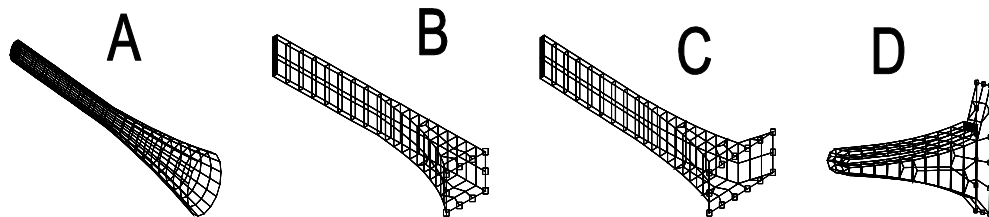
$$\frac{p_3}{q_3} = \frac{\rho c}{4 \pi R^2} \left[ \frac{(kR)^2}{1 + (kR)^2} + j \frac{kR}{1 + (kR)^2} \right]$$

Die Umrechnung von der Kugeloberfläche auf den Trichterausgang bereitet jedoch einige Schwierigkeiten, da wegen der komplizierten geometrischen Verhältnisse die tatsächliche (wirksame) Fläche des Trichterausgangs nur geschätzt werden kann (Bild 5).

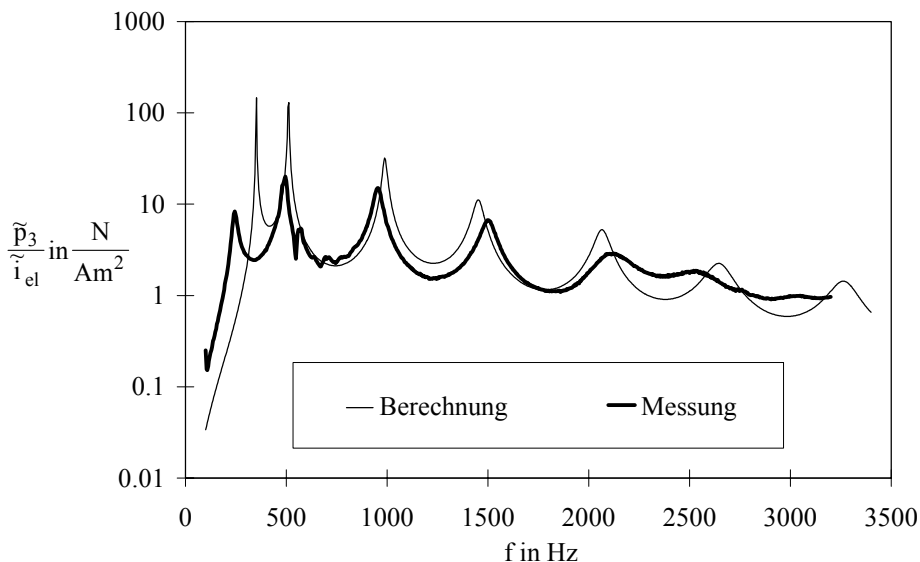
Der Überprüfung der im Modell verwendeten Matrizen für die Schallführung und der Beziehungen für das Schallfeld dienen Vergleiche mit Testrechnungen unter Verwendung der Boundary-Element-Methode (BEM). Dazu wurden verschiedene gerade und gebogene Schallführungen aus Rohr und Trichterabschnitten gleicher Länge berechnet. Bild 3 zeigt im Vergleich mit dem analytischen Modell durchaus Abweichungen zwischen den einzelnen Varianten, insgesamt jedoch eine gute Übereinstimmung. Die Ersatz-Vierpole für die Wellenleiter und das Abstrahlungs-Modell können also zur Modellierung verwendet werden.



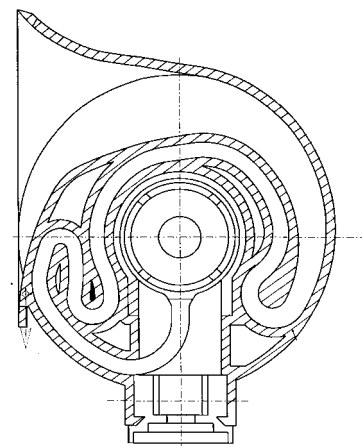
**Bild 2:** lineares Kleinsignal-Ersatzschaltbild einer Hupe



**Bild 3:** oben: verschiedene BEM-Modelle, unten: Vergleich der Ergebnisse der analytischen Berechnung und der BEM-Ergebnisse



**Bild 4:** Meß- und Berechnungsergebnisse für das Kleinsignalverhalten einer Hupe



**Bild 5:** Schnitt durch eine Schallführung (Beispiel)

Die Werte der Ersatzschaltelemente des mechanischen Teils und für die Koppelvierpole zwischen elektrischem und mechanischem und zwischen mechanischem und akustischem Teil müssen durch direkte und indirekte Messungen ermittelt werden. Schließlich kann auch für das Kleinsignalmodell ein Vergleich zwischen Messung und Berechnung stattfinden.

Bild 4 zeigt einen solchen Vergleich für die Übertragungsfunktion zwischen eingespeistem elektrischem Strom und Schalldruck am Ausgang. Für die Messung wurde der Unterbrecher überbrückt und der Elektromagnet mit einer Gleichspannung und einer überlagerten Wechselspannung betrieben. Die Berechnung erfolgte mit einem gängigen Netzwerkanalyseprogramm (PSPICE).

Die recht gute Übereinstimmung zeigt eindrucksvoll die Eignung der verwendeten mechanisch/elektrischen und akustisch/elektrischen Analogien zur Modellierung von elektroakustischen Wandlern.

#### Literatur

- [1] HÜBELT, J., SARRADJ, E.: Nichtlineare Modellierung einer Pkw-Hupe, DAGA 98
- [2] REICHARDT, W.: Grundlagen der Technischen Akustik, Geest & Portig, Leipzig, 1968
- [3] KEEFE, D. H.: Acoustical Wave Propagation in Cylindrical Ducts, J. Acoust. Soc. Am. 75, 1984, S.58.
- [4] MUNJAL, M. L.: Acoustics of Ducts and Mufflers, Wiley, New York, 1987

Diese Arbeit wurde durch die Fa. FIAMM, Montecchio Maggiore, Italien, unterstützt.