Erweiterung des linearen Ersatzschaltbildes für dynamische Kleinstlautsprecher

Marco Berzborn[1], Markus Müller-Trapet[1], Gottfried Behler[1]
[1] *Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen, Kopernikusstr. 5, 52074 Aachen, Deutschland*
Email: gkb@akustik.rwth-aachen.de

Einleitung

Um das Übertragungsverhalten von dynamischen Schallwandlern im tieffrequenten Bereich zu beschreiben, werden üblicherweise die von Thiele und Small beschriebenen Parameter verwendet, die sowohl elektrische als auch mechanische Elemente beinhalten. Dadurch können mit ausreichender Genauigkeit die Übertragunsgfunktionen bezüglich der elektrischen Impedanz und der Auslenkung bzw. Schnelle berechnet werden.

Zur Bestimmung dieser Parameter wird die Perturbationsmethode benutzt, bei der ein Lautsprecherparameter – im Allgemeinen die bewegte Masse – um einen bekannten Wert verändert wird und daraus alle Elemente des Ersatzschaltbildes ermittelt werden können [1].

Motivation

Bei Kleinstlautsprechern fällt auf, dass bei tiefen Frequenzen die Auslenkung nicht, wie durch die klassischen Thiele-Small Parameter beschrieben, konstant bleibt, sondern ansteigt. Dieses Phänomen wird durch den sogenannten Creep-Effekt beschrieben, welcher auf eine Aufweichung der Membran und der Aufhängung bei langsamen Auslenkungen, verursacht durch die Verwendung viskoelastischer Materialien, zurückzuführen ist. Da das System hier zum größten Teil von der Nachgiebigkeit abhängt, ist eine Erweiterung erforderlich.

Des Weiteren ist im Gegensatz zu großen elektrodynamischen Wandlern die klassische Methode zur Bestimmung des Parameter-Satzes nicht anwendbar, da eine hinreichend kleine Masseänderung nicht mit ausreichender Genauigkeit zu erreichen ist.

Die verschiedenen Creep-Modelle

Zur Modellierung des Creep-Effekts wurden drei verschiedene Modelle verwendet und untereinander verglichen [2]. Das LOG Modell nach Knudsen modelliert die Federnachgiebigkeit durch eine komplexe logarithmische Skalierung der Frequenz f bezogen auf die Resonanzfrequenz des Wandlers f_s, gewichtet mit einem linearen Creep-Faktor, hier λ. Durch die komplexe Frequenzabhängigkeit kann das Modell Dämpfungsverhalten darstellen, wodurch die Nachgiebigkeit einen Beitrag zur mechanischen Bedämpfung des Wandlers liefert:

$$n_{\mathrm{LOG}}(f) = n \cdot \left[1 - \lambda \cdot \log_{10}\left(j\frac{f}{f_s}\right)\right]. \tag{1}$$

Das Creep-Modell nach Klippel stellt eine Modifikation des LOG Modells dar, welches die komplexe Frequenzabhängigkeit durch eine rein reelle Darstellung ersetzt. Demzufolge berücksichtigt das KL Modell, im Gegensatz zum LOG Modell, kein Dämpfungsverhalten:

$$n_{\mathrm{KL}}(f) = n \cdot \left[1 - \lambda \cdot \log_{10}\left(\frac{f}{f_s}\right)\right]. \tag{2}$$

Ein Nachteil beider Modelle ist, dass oberhalb einer bestimmten Grenzfrequenz der mit λ gewichtete Logarithmus-Term kleiner als eins wird und die Nachgiebigkeit somit einen negativen Wert annimmt, was schließlich zu einem physikalisch inkorrekten Ergebnis führt. Eine Erweiterung um eine untere Grenzfrequenz, welche dieses verhindert, ist durch das Three Parameter Creep (TPC) Modell nach Ritter und Agerkvist gegeben. Wie das LOG Modell berücksichtigt auch das TPC Modell Dämpfungsverhalten und gewichtet die Nachgiebigkeit durch eine logarithmische Skalierung der Frequenz und eine lineare Gewichtung mit einem Creep-Faktor, hier κ. Die Bezugsgröße ist allerdings die untere Grenzfrequenz des TPC Modells $f_{\min}$ und nicht die Resonanzfrequenz des Wandlers:

$$n_{\mathrm{TPC}}(f) = n \cdot \left[1 - \kappa \log_{10}\left(\frac{j\frac{f}{f_{\min}} e^{-j\tan^{-1}\left(\frac{f}{f_{\min}}\right)}}{\sqrt{1+\left(\frac{f}{f_{\min}}\right)^2}}\right)\right] \tag{3}$$

Aus der mathematischen Darstellung der Modelle lässt sich schließlich ein elektrisches Ersatzschaltbild einer Paralellschaltung der Nachgiebigkeit n und eines reaktiven Bauteils n' ableiten, welches für die klassische Nachgiebigkeit nach Thiele und Small eingesetzt wird (Abbildung 1).

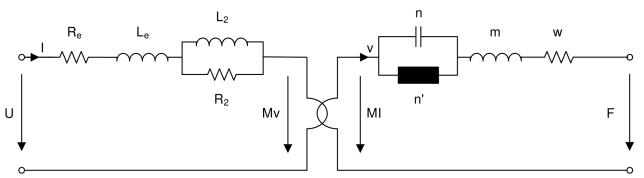

Abbildung 1: Ersatzschaltbild des Wandlers mit erweiterter Nachgiebigkeit

Bestimmung der Modellparameter

Zur Bestimmung der Modellparameter wurde die elektrische Impedanz des Wandlers über einen Shunt Widerstand und die Auslenkung der Membran mittels eines Laser-Vibrometers gemessen. Die Thiele-Small Parameter wurden, im Gegensatz zur klassischen Methode, durch

eine Minimierung der Fehlerquadrate zwischen Modell und entsprechender Messung der Auslenkung und Impedanz bestimmt.

Die Bestimmung erfolgte zum Einen in zwei Schritten nach Klippel [3], wobei die elektrischen Parameter zunächst aus der Messung der Impedanz bestimmt wurden und im darauf folgenden Schritt die Wandlerkonstante und die Creep-Modelle aus der Auslenkungsfunktion errechnet wurden. Zum Anderen wurden die Parameter durch simultane Minimierung des Fehlers aus Impedanz und Auslenkung in einem Schritt bestimmt.

Ergebnisse

Im Vergleich der Methoden zur Bestimmung der Parameter fällt auf, dass bei der Bestimmung in zwei Schritten bei den Creep-Modellen, welche Dämpfungsverhalten berücksichtigen, im Resonanzfall ein Fehler im Betrag der Impedanz des Wandlers entsteht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Creep-Modelle erst anhand der Auslenkungsfunktion bestimmt werden und somit die Erweiterung der mechanischen Bedämpfung im ersten Schritt, also bei der Bestimmung der elektrischen Parameter aus der Impedanz, nicht berücksichtigt wird (Abbildung 2). Dieses Problem wird durch die Bestimmung in einem Schritt behoben, da hier für die Modellierung der Impedanz schon die Creep-Modelle berücksichtigt werden. Weiterhin können die Abweichungen des klassischen Modells unterhalb und oberhalb der Resonanzfrequenz durch die Berücksichtigung des Dämpfungsverhaltens, also durch Verwendung des TPC und LOG Modells, minimiert werden (Abbildung 3).

Allerdings kann es hier vorkommen, dass das Problem für den Optimierer schlecht konditioniert ist, da zwischen der Impedanz und Auslenkung des Wandlers hohe betragliche Unterschiede bestehen. Eine Skalierung um diesen Unterschied kann zur Verbesserung eingeführt werden. Des Weiteren führt eine sehr niedrige Resonanzfrequenz des Wandlers zu Problemen bei der Bestimmung des Modells, da die untere Grenzfrequenz des Creep-Modells sehr nahe an der Resonanzfrequenz des Wandlers liegt.

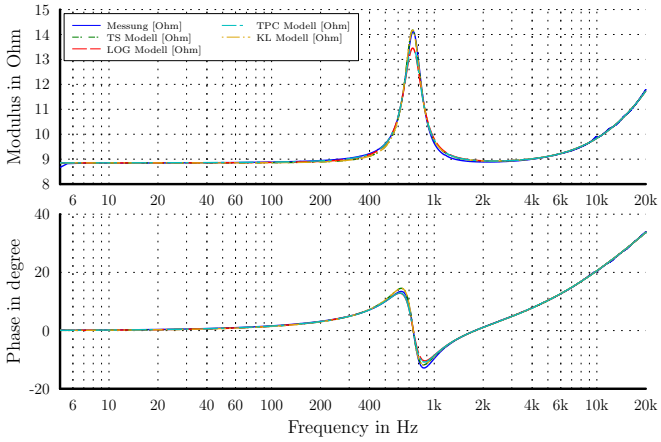

Abbildung 2: Elektrische Impedanz des Wandlers bei Bestimmung der Modelle in zwei Schritten

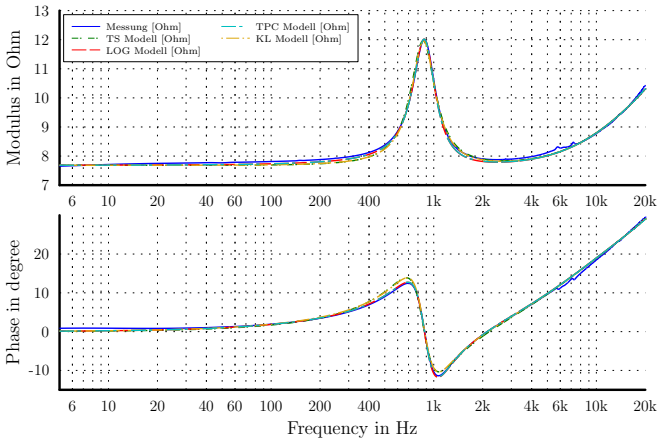

Abbildung 3: Elektrische Impedanz des Wandlers bei Bestimmung der Modelle in einem Schritt

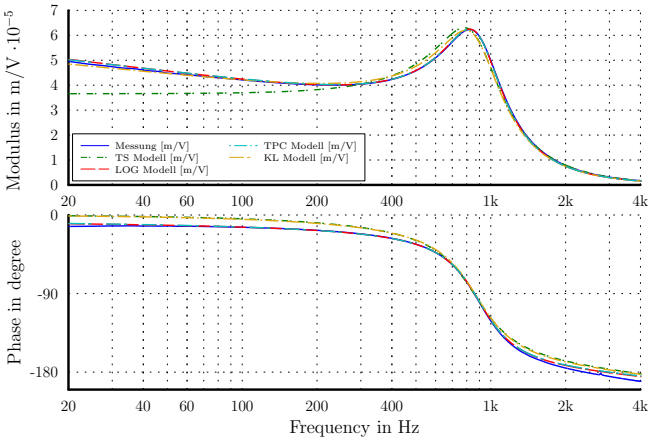

Abbildung 4: Auslenkungsfunktion der Wandlermembran bei Bestimmung der Modelle in einem Schritt

Im Vergleich der drei verschiedenen Creep-Modelle kann beobachtet werden, dass das TPC Modell insgesamt die beste Übereinstimmung mit der Messung liefert und auch extremes Creep-Verhalten darstellen kann, während das LOG Modell und das KL Modell nur schwächeres Creep-Verhalten modellieren können. Ist der Creep-Effekt nicht sehr stark ausgeprägt, liefern das TPC und das LOG Modell sehr ähnliche Ergebnisse. Ein Nachteil des KL Modells gegenüber dem LOG und TPC Modell ist hier allerdings, dass die Vernachlässigung des Dämpfungsverhaltens zu einem Fehler führt, der – ähnlich zur Vernachlässigung des Creep-Effekts – sowohl im Betrag als Verschiebung um die Resonanz herum, als auch in der Phase oberhalb und unterhalb der Resonanz zu finden ist (Abbildung 4).

Literatur

[1] Richard H. Small. Direct radiator loudspeaker system analysis. *J. Audio Eng. Soc*, 20(5):383–395, 1972.

[2] Holger Hiebel. Suspension creep models for miniature loudspeakers. In *Audio Engineering Society Convention 132*, Apr 2012.

[3] Ulf Seidel and Wolfgang Klippel. Fast and accurate measurement of the linear transducer parameters. In *Audio Engineering Society Convention 110*, May 2001.