

Untersuchung der thermischen Eigenschaften von Kleinstlautsprechern

Jens Mecking¹, Markus Müller-Trapet¹, Gottfried Behler¹

¹ Institut für Technische Akustik der RWTH Aachen, 52074 Aachen, Deutschland, Email: jens.mecking@rwth-aachen.de

Einleitung

Elektrodynamische Lautsprecher sind im Allgemeinen sehr ineffiziente Wandler, da nur ein kleiner Teil der zugeführten Leistung in das erzeugte Schallfeld übertragen wird. Der Großteil wird im Ohm'schen Widerstand der Schwingspule in Wärme umgesetzt oder geht durch mechanische Reibung an der Membran verloren. Die Dissipation in der Schwingspule führt zu einer Erwärmung des Wandlers. Dies stellt ein Problem dar, da sich dadurch die Übertragungseigenschaften des Systems verändern und es - bei hoher Last - zur Beschädigung oder sogar Zerstörung des Lautsprechers kommen kann. Insofern stellt sich die Frage, wie die Auswirkungen der Temperaturerhöhung eingeschränkt oder sogar kompensiert werden können. Ein wichtiger Schritt in diese Richtung ist die thermische Modellierung des Lautsprechers, also die Vorhersage seiner Temperatur anhand des Eingangssignals. In einem weiteren Schritt können die Thiele-Small-Parameter, die den Lautsprecher als LTI-System beschrieben, auf ihre Temperaturabhängigkeit hin untersucht werden. Dies erlaubt die Berechnung der veränderten linearen Übertragungsfunktion des Systems und somit eine Kompensation der durch Erwärmung entstandenen, linearen Verzerrungen. Während thermische Modelle für "konventionelle" große Lautsprecher bereits ausführlich erforscht sind [1, 2, 3, 4, 5] ist unklar, inwieweit die Ergebnisse auf Mikrolautsprecher in mobilen Geräten (Smartphones, Tablets ...) übertragbar sind.

Messung der Temperatur

Essentiell für die thermische Betrachtung eines Lautsprechers ist die Kenntnis seiner Temperatur. Da das Innere des Lautsprechers während des Betriebs kaum zugänglich ist und dadurch die direkte Messung der Temperatur über einen Temperaturfühler ausscheidet, muss die Temperatur indirekt ermittelt werden.

Die Impedanz-Messmethode

Die Temperatur der Schwingspule eines Lautsprechers kann über deren temperaturabhängigen Gleichstromwiderstand bestimmt werden. Der Zusammenhang zwischen dem Widerstand R_e und der Temperaturdifferenz ΔT zu einer beliebigen Referenztemperatur T_0 wird als

$$R_e(\Delta T) = R_e(T_0) \cdot [1 + \alpha \cdot (T_0 + \Delta T) + \beta \cdot (T_0 + \Delta T)^2] \quad (1)$$

angenommen, wobei es sich bei α und β um Materialkonstanten der Schwingspule handelt. Der Gleichstromwiderstand R_e kann aus dem Spektrum der Eingangsimpedanz entnommen werden, da er lediglich zu einer Zunahme des Realteils führt. Hierzu wird ein kurzes Messsignal (~ 20 ms) mit geringer Amplitude (~ 50 mV)

verwendet, um den thermischen Einfluss der Messung selbst möglichst gering zu halten. Die geringe Spannung stellt zudem sicher, dass die Messung im linearen Bereich des Lautsprechers durchgeführt wird. Da aufgrund der geringen Liniendichte im Spektrum und der durch die Erwärmung veränderte Nachgiebigkeit der Membranaufhängung die Messwerte unterhalb der Resonanzfrequenz keine validen Werte liefern (vgl. Abbildung 1), wird der Gleichstromwiderstand aus dem Realteil der minimalen Impedanz oberhalb der Resonanzfrequenz bestimmt.

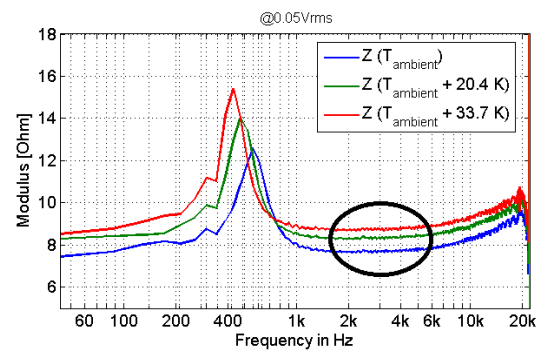


Abbildung 1: Betrag der frequenzabhängigen elektrischen Eingangsimpedanz des Lautsprechers für verschiedene Temperaturen. Die schwarze Markierung deutet an, wo der Gleichstromwiderstand R_e bestimmt wird.

Validierung der Messmethode

Um die vorgestellte Messmethode auf ihre Genauigkeit und Reproduzierbarkeit hin zu überprüfen, wurde eine Kalibrierungsmessung durchgeführt. Dazu wurde zusätzlich zur Messung des Gleichstromwiderstands R_e an zwei Lautsprechern des gleichen Modells eine separate Messung der Temperatur durchgeführt. Um ein thermisches Gleichgewicht sowohl innerhalb des Lautsprechers als auch zwischen Lautsprecher und dem verwendeten Temperatursensor zu gewährleisten wurde die Messung in einem Ofen durchgeführt. Die Referenztemperatur T_{ref} ist dabei relativ zur Raumtemperatur definiert und die Kalibrierung umfasste den Temperaturbereich $0 \text{ K} \leq T_{ref} \leq 75 \text{ K}$. Temperatur und Widerstand wurden an 10 diskreten Punkten jeweils 50 Mal gemessen, die Ergebnisse sind exemplarisch für einen der Lautsprecher in Abbildung 2 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen für beide Lautsprecher eine gute Übereinstimmung mit dem quadratischen Modell (Gleichung 1). Die ermittelten Koeffizienten α und β sind in Tabelle 1 aufgelistet. Es fällt auf, dass die angegebenen Konfidenzintervalle beider Lautsprecher sich für keinen der Koeffizienten überschneiden. Daher wurden die ermittelten Ergebnisse auf ihre Übertragbarkeit hin untersucht. Werden für einen der Lautsprecher die Para-

meter α und β aus der Kalibrierung des anderen Geräts verwendet, so bleibt der Betrag der Differenz aus der so ermittelten und der wahren Temperatur für Messungen bis 100 K über Raumtemperatur unterhalb von 2,5 K.

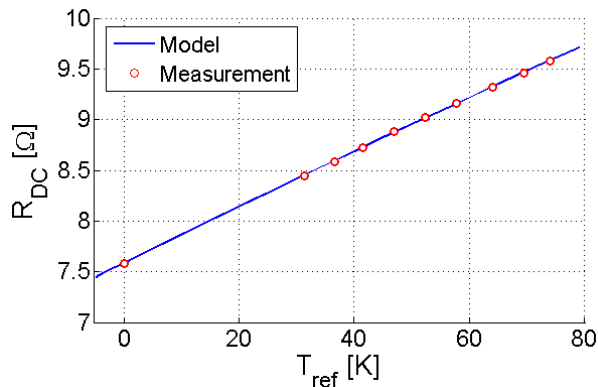


Abbildung 2: Ergebnis der Kalibrierungsmessung. Dargestellt sind die Mittelwerte von Widerstand und Temperatur aus jeweils 50 Messungen für die zehn untersuchten Temperaturstufen.

Tabelle 1: Ermittelte Koeffizienten aus der Kalibrierungsmessung für zwei Lautsprecher des gleichen Modells sowie Literaturwerte für Kupfer [6].

	$\alpha [10^{-3} \text{ K}^{-1}]$	$\beta [10^{-6} \text{ K}^{-2}]$
Literatur Cu	3,93	0,60
LS 1	$3,72 \pm 0,02$	$-2,14 \pm 0,21$
LS 2	$3,32 \pm 0,03$	$2,60 \pm 0,36$

Thermische Untersuchungen

Mit einer ausreichend genauen Temperaturmessmethode können nun die thermische Eigenschaften des Lautsprechers untersucht werden. Das Ziel ist insbesondere die Identifikation von temperaturabhängigen Größen des Systems sowie die Vorhersage der Lautsprechertemperatur durch ein Modell.

Aufheiz-Abkühl-Zyklen

Zur Durchführung von thermischen Untersuchungen an Lautsprechern bieten sich sog. Aufheiz-Abkühl-Zyklen an [2]. Abbildung 3 zeigt das Leistungssignal während einer solchen Messung. Bei ständiger Messung der Temperatur wird der Lautsprecher aufgeheizt bis er seine Sättigungstemperatur erreicht, anschließend kühlt er wieder ab. Ein Vorteil dieser Methode ist die Trennung von (simuliertem) Nutz- und Messsignal. Während zum Aufheizen ein beliebiges Signal (im Hinblick auf Spektrum, Amplitude ...) verwendet werden kann, erfolgt die Messung der Temperatur immer mit dem gleichen Signal und damit im linearen Bereich des Lautsprechers.

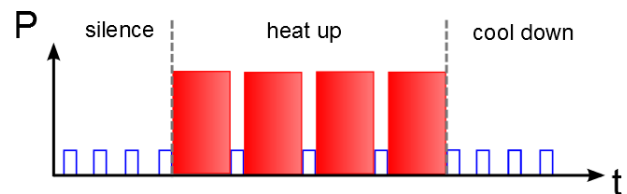


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Leistungssignals während eines Aufheiz-Abkühl-Zyklus. Aufheizpulse (rot) simulieren ein Nutzsignal während jeder Auslesepulse (blau) einer Temperaturmessung (vgl. Abbildung 1) entspricht.

Temperaturabhängigkeit der Nachgiebigkeit

Abbildung 1 zeigt neben der Erhöhung des Gleichstromwiderstands $R_e(T)$ auch eine Verschiebung der Resonanz zu tieferen Frequenzen mit steigender Temperatur. Das gegenläufige Verhalten lässt sich interpretieren, indem die Lautsprechermembran als harmonischer Oszillator mit der Masse m und der mechanischen Nachgiebigkeit n aufgefasst wird. Die Resonanzfrequenz f_{res} eines solchen Masse-Feder-Systems ist bestimmt durch

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{mn}} \quad (2)$$

Da die Masse m nicht temperaturabhängig ist, kann die Absenkung von f_{res} mit steigender Temperatur durch eine erhöhte Nachgiebigkeit erklärt werden. Dies bedeutet, dass die Aufhängung der Membran bei höheren Temperaturen "weicher" wird. Bei bekannter Masse der Membran m lässt sich nun die Nachgiebigkeit bestimmen:

$$n = \frac{1}{m \cdot (2\pi \cdot f_{res})^2} \quad (3)$$

Die so bestimmten Werte sind in Abbildung 4 gegen die Temperatur der Schwingspule aufgetragen. Die Daten lassen einen linearen Ansatz für die Temperaturabhängigkeit von n sinnvoll erscheinen, sodass ein Modell der Form

$$n(\Delta T) = n_0 + n_1 \cdot \Delta T \quad (4)$$

an die Messdaten angepasst wurde. Hierbei ist zu beachten, dass die gemessenen Daten aus Aufheiz- und Abkühlvorgang eine systematische Verschiebung aufweisen. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die Tatsache, dass die Schwingspule (an der die Temperatur gemessen wird) und die Membranaufhängung (die die Nachgiebigkeit vorgibt) während der Messung nicht immer im thermischen Gleichgewicht stehen. Da die Messdaten aus dem Abkühlvorgang für tiefe Temperaturen wieder in die der anfänglichen Ruhephase übergehen (dort herrscht thermisches Gleichgewicht), werden für die lineare Anpassung nur die Daten aus Ruhephase und Abkühlvorgang verwendet. Die Daten zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem Modell und die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Thermische Modellierung

Das Ziel der thermischen Modellierung eines Lautsprechers ist es, seine Temperatur aus dem angelegten Ein-

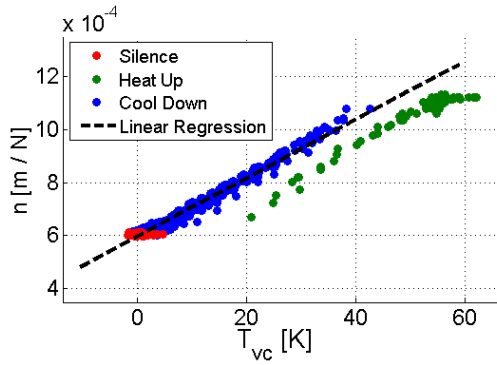


Abbildung 4: Nachgiebigkeit der Lautsprechermembran gegen die Schwingspulenteperatur und lineare Anpassung.

Tabelle 2: Parameter aus der Anpassung eines linearen Zusammenhangs zwischen Nachgiebigkeit n und Temperatur T .

$n_0 [10^4 \frac{m}{N}]$	$n_1 [10^4 \frac{m}{NK}]$
$5,969 \pm 0,016$	$0,110 \pm 0,001$

gangssignal vorherzusagen. Nach Button [1] lässt sich das thermische Verhalten eines Lautsprechers durch ein elektrisches Ersatzschaltbild modellieren, indem die in Tabelle 3 aufgeführten Analogien ausgenutzt werden.

Tabelle 3: Analogien zwischen thermischem Modell und elektrischem Gleichstromkreis.

Elektrisch	Thermisch
Strom	Leistung
Spannung	Temperatur
Widerstand	(Therm. Leitfähigkeit) ⁻¹
Kapazität	Wärmekapazität

Während der Widerstand R in dieser Analogie also den diffusiven Wärmetransport beschreibt, steht die Kapazität C für die Absorption von Wärmeenergie, also die Erwärmung des Systems. Button [1] verwendet für sein thermisches Modell zwei RC-Glieder, die über ihre jeweiligen Potentialdifferenzen die Temperaturdifferenzen ΔT_v zwischen Schwingspule und Magnet sowie ΔT_m zwischen Magnet und Außentemperatur beschreiben. Das Ersatzschaltbild ist in Abbildung 5 dargestellt. Damit lässt sich das Verhältnis zwischen der Temperatur der Schwingspule T_{vc} und der Eingangsleistung P über eine thermische Impedanz Z_{th} beschreiben:

$$Z_{th} = \frac{T_{vc}}{P} = \frac{R_v}{1 + j\omega R_v C_v} + \frac{R_m}{1 + j\omega R_m C_m}, \quad (5)$$

wobei die Indizes v und m jeweils für die entsprechenden thermischen Größen von Schwingspule und Magnet stehen. Der Lautsprecher kann in diesem Modell also durch einen Satz von vier Parametern charakterisiert werden. Mit Hilfe der Messdaten aus den zuvor beschriebenen Aufheiz-Abkühl-Zyklen (vgl. Abbildung 3) können nun Anpassungen im Rahmen des o.g. Modells durchgeführt werden. Es werden also diejenigen thermischen Parameter (R_v, C_v, R_m, C_m) gesucht, die die Messdaten als

Funktion der bekannten Eingangsleistung am besten beschreiben.

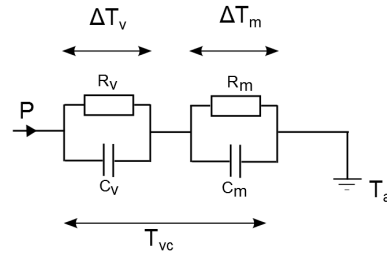


Abbildung 5: Thermisches Ersatzschaltbild nach Button [1].

Breitbandige Anregung

Abbildung 6 zeigt die ermittelten thermischen Parameter bei Anregung mit weißem Rauschen und unterschiedlichen Eingangsleistungen. Die Wärmekapazitäten C_v und C_m zeigen keine systematische Abhängigkeit von der Leistung (vgl. Abbildung 6 (a,b)). Dies ist im Rahmen des Modells ein sinnvolles Ergebnis, da die Wärmekapazitäten als physikalische Eigenschaft nicht von der Anregung abhängen. Während auch R_v konstant bezüglich der Leistung ist (Abbildung 6 (c), rot), sinkt der thermische Übergangswiderstand R_m (blau) zwischen Magnet und Umgebung für steigende Leistungen deutlich ab. Dies beschreibt den Umstand, dass die Gleichgewichtstemperaturen

$$T_{mss} = P \cdot R_m, \quad T_{vss} = P \cdot (R_m + R_v), \quad (6)$$

die sich nach hinreichend langer Anregung im thermischen Gleichgewicht einstellen, nicht proportional zur Eingangsleistung sind. Eine Verdopplung der Leistung führt also nicht zu einem doppelt so großen Temperaturanstieg, sondern zu einer deutlich geringeren Erhöhung von T_{vss} und T_{mss} .

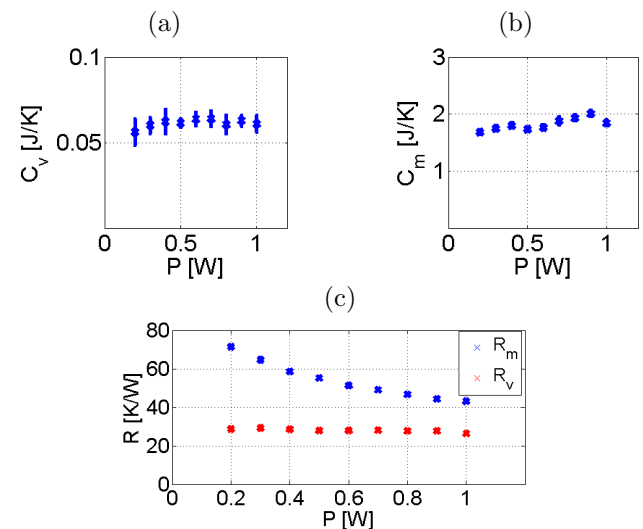


Abbildung 6: Angepasste Parameter des thermischen Modells bei breitbandiger Anregung für verschiedene Eingangsleistungen. Angegeben sind die jeweiligen Mittelwerte und Konfidenzintervalle aus fünf Messungen.

Schmalbandige Anregung

Um das thermische Verhalten des Lautsprechers in Abhängigkeit der Frequenz des anregenden Signals zu untersuchen, wurde ein Lautsprecher mit Sinustönen aufgeheizt. Dabei wurde die Frequenz um die Resonanz ($f_{res} \approx 600$ Hz) herum variiert. Das Modell nach Button liefert hier keine physikalisch sinnvollen Ergebnisse mehr, da sich für eine optimale Anpassung die ermittelten Wärmekapazitäten mit der Frequenz der Anregung ändern müssten. Außerdem ist zu beobachten, dass die thermischen Übergangswiderstände R_v und R_m um die Resonanzfrequenz stark absinken. Dies lässt sich mit einem zusätzlichen Wärmetransport durch Konvektion, also durch die Bewegung der Luft im Inneren des Lautsprechers, erklären. Die Konvektion hat den größten Einfluss bei der Resonanzfrequenz, da dort die Membranschnelle maximal ist und für eine schnellere Ableitung der Wärmeenergie W sorgt. Da die Wärmeleitung durch Konvektion an ein bewegtes Luftvolumen ΔV gekoppelt ist, wird die transportierte Leistung P_{KON} als

$$P_{KON} = \frac{\partial W}{\partial(\Delta V)} \cdot \frac{\partial(\Delta V)}{\partial t} \quad (7)$$

angenommen. Mit der Annahme

$$\frac{\partial W}{\partial(\Delta V)} \propto \Delta T \quad (8)$$

lässt sich der konvektive Transport im Ersatzschaltbild durch einen Widerstand $R_{kon}(f)$ modellieren, dessen Größe frequenzabhängig ist und von der Menge des pro Zeitintervall bewegten Luftvolumens $\frac{\partial(\Delta V)}{\partial t}$ abhängt. Fasst man den gesamten Wärmetransport im Lautsprecher nun als die Summe der (hier als voneinander unabhängig angenommenen) Mechanismen Diffusion, Absorption und Konvektion im Sinne von

$$P_{GESAMT} = \frac{\Delta T}{R} + C \cdot \partial_t \Delta T + \frac{\Delta T}{R_{KON}(f)} \quad (9)$$

zusammen, so lässt sich das Modell nach Button wie in Abbildung 7 gezeigt erweitern. Werden die Wärmekapazitäten bei der Anpassung der thermischen Parameter auf die Ergebnisse aus der breitbandigen Anregung fixiert, so zeigen die thermischen Widerstände den erwarteten Verlauf (vgl. Abbildung 8). Während der diffusive Transport sich nicht mit der Frequenz der Anregung ändert, sinken die Konvektionswiderstände um die Resonanzfrequenz herum ab.

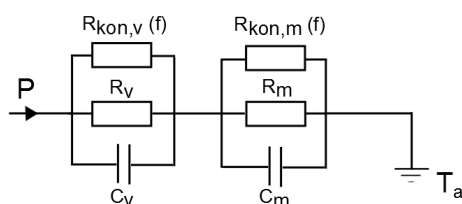


Abbildung 7: Um den Wärmetransport durch Konvektion erweitertes thermisches Ersatzschaltbild.

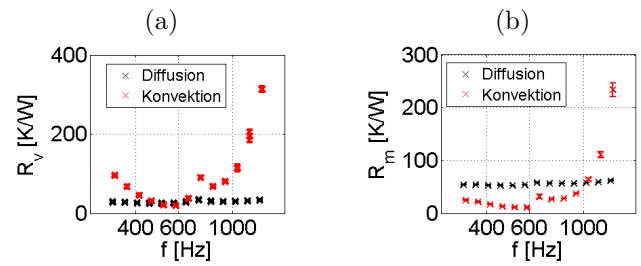


Abbildung 8: Ergebnisse der Anpassungen an das erweiterte Modell aus Abbildung 7. Gezeigt sind die thermischen Übergangswiderstände (a) der Spule und (b) des Magneten zur Beschreibung des diffusiven (schwarz) und konvektiven (rot) Transports. Angegeben sind die jeweiligen Mittelwerte und Konfidenzintervalle aus fünf Messungen.

Zusammenfassung

Für die untersuchte Messmethode zur Bestimmung der Temperatur in Lautsprechern konnten reproduzierbare Ergebnisse mit einer Genauigkeit unter 2.5 K für Temperaturen bis zu 100 K über Raumtemperatur erzielt werden, ohne dass eine Kalibrierungsmessung an jedem einzelnen Wandler nötig war.

Für die Temperaturabhängigkeit der mechanischen Nachgiebigkeit der Membran wurde ein linearer Ansatz gemacht, der die Messdaten gut beschreibt.

Ein thermisches Modell [1] wurde verwendet, um die Aufheizung des Lautsprechers mit breitbandiger Anregung zu beschreiben. Die Ergebnisse erlauben bei bekannter Anregung eine Vorhersage der Magnet- und Schwingspulentemperatur. Für Anregung mit schmalbandigen Signalen wurde ein Vorschlag zur Erweiterung des bestehenden Modells gemacht, der den Wärmetransport durch Konvektion berücksichtigt.

Literatur

- [1] Button, D.J.: Heat Dissipation and Power Compression in Loudspeakers. J.Audio Eng. Soc., vol. 40 no. 1/2 (1992), 32-41
- [2] Klippel, W.: Nonlinear Modeling of the Heat Transfer in Loudspeakers. J.Audio Eng. Soc., vol. 52 no. 1/2 (2004), 3-25
- [3] Hendricksen, C.A.: Heat-Transfer Mechanisms in Loudspeakers: Analysis, Measurement, and Design. J.Audio Eng. Soc., vol. 35 no. 10 (1987), 778-791
- [4] Behler, G.: Measuring the Loudspeaker's Impedance During Operation for the Derivation of the Voice Coil Temperature. 98th AES Convention, Paris (1995), 1-14
- [5] Chapman, P.J.: Thermal Simulations of Loudspeakers. 104th AES Convention, Amsterdam (1998), 1-31
- [6] Paul, S.: Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 1 (4. Auflage), Springer Verlag, Berlin/Heidelberg (2010)