

## Massespeichereffekte – Der Skin-Effekt in Polklemmen

Der technisch etwas diffuse Begriff ‚Massespeichereffekt‘ hat sich im Hause WBT als zunächst unspezifizierter Arbeitstitel für alle Aktivitäten eingebürgert, die der Verbesserung von auf den ersten Blick ‚gestandenen‘ und in perfekten Realisierungen vorliegenden Verbindungselementen, wie z.B. RCA-Verbinder, Polklemmen, Bananenstecker und Kabelschuhe, gewidmet wurden.

Die mit diesen Bauelementen zwangsläufig verknüpften ‚Massen‘ wurden, und werden noch immer, unter möglichst allen Aspekten in Frage gestellt. Nachhaltigkeit beim Einsatz von Material-, Energie-, und Arbeitsplatzressourcen, Fertigungskosten im weitesten Sinn und mit höchster Priorität: ein Mehr an audiophilem Nutzen sind dabei die Leitlinien.

An Hand von Lautsprecherverbindungen soll im Folgenden theoretisch und modellhaft abstrakt gezeigt werden, dass es sich lohnt über Qualitätsverbesserungen, z.B. einer simplen Polklemme nachzudenken – eine Tatsache, die sich im praktischen Hörvergleich immer wieder bestätigt.

Unter Ausblendung aller übrigen Einflussparameter einer Lautsprecherverbindung sollen hier nur die mit der Masse einer Polklemme verknüpften Größen einer Auswirkungsabschätzung unterworfen werden. An der Signalübertragung sind dabei beteiligt:

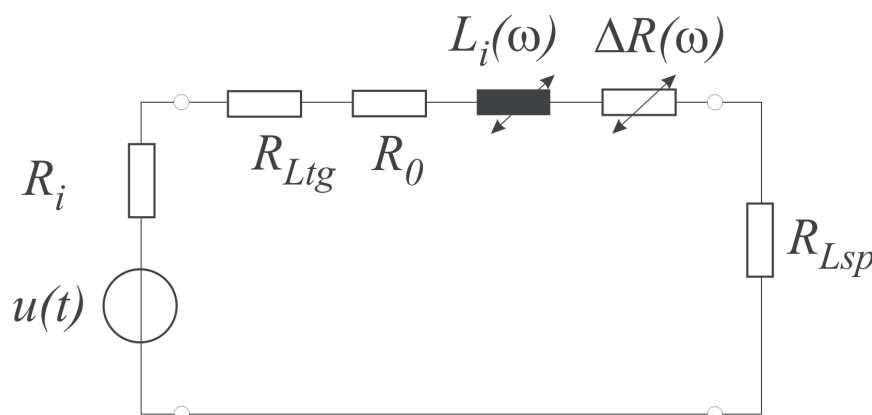
1. der Leiterwerkstoff,
2. die Leitergeometrie → leitende Masse,
3. der Isolationswerkstoff und
4. der Montageabstand

Die daraus direkt abzuleitenden elektrischen Größen sind:

5. der Durchgangswiderstand  $R_0$  – aus spezifischem Widerstand (1),  
Länge und Fläche (2),
6. die Kapazität  $C_0$  – aus Oberfläche (2) und Abstand (4),
7. die Eigen – und Schleifeninduktivität  $L_0$  – aus (1),(2) und (4).

Indirekt sind aus (1) bis (4) abzuleiten:

8. der Wellenwiderstand
9. der frequenzabhängige Wirkwiderstand  $R(\omega)$  → Wirbelströme, Skin-Effekt
10. die frequenzabhängige Eigeninduktivität  $L_i(\omega)$  → Wirbelströme, Skin-Effekt



**Abb. 1**  
Stark vereinfachtes  
Modell einer Polklemme  
( $R_0$ ,  $R(\omega)$ ,  $L_i(\omega)$ )

Eine Beschränkung auf die Größen in Abb. 1 bedeutet, dass im Folgenden nur die Auswirkungen der Wirbelströme diskutiert werden sollen, d.h. Anpassungsfragen (an den Wellenwiderstand der Leitung), oder der Effekt der Kapazität voluminöser Polklemmenpaare bleiben unberücksichtigt, ebenso wie der eines ggf. nicht konstanten Übergangswiderstands.

Da es messtechnisch nicht trivial, bzw. mit vertretbarem Aufwand unmöglich ist, mit einem ‚Zeiger‘ den Erfolg oder Misserfolg eines Entwicklungsschritts in Richtung Verringerung der Wirbelstromfehler nachzuweisen, soll kurz umrissen werden, um welche realen physikalischen Größen und Größenordnungen es hierbei geht:

Unter der Annahme, dass (s. Abb. 1)  $R_1 + R_0 + R_{Ltg} + R_{Lsp} = \text{const} = R$  und zunächst  $L_1 = 0$  ist, ergibt sich für ein Nutzsignal ein Spannungsteiler, der für den Fall eines von der Signalfrequenz abhängigen Widerstands  $R(\omega)$  eine Fehlerspannung oder einen Fehlerstrom proportional zu  $\Delta R(\omega)/R$  verursacht. Damit ein solcher Fehler nicht hörbar wird, darf er nicht größer als  $\frac{1}{2}$  LSB z.B. eines üblichen 16 bit Wandlers sein, d.h. für  $R = 8 \Omega$ :

$$\frac{\Delta R(\omega)}{R} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2^{16}} \Rightarrow \text{mit } R = 8\Omega: \Delta R(\omega) \leq 61.64 \mu\Omega$$

In analogen Kategorien entspricht das einem Störabstand von 96 dB. Für höhere Ansprüche, z.B. für einen Störabstand von 108 dB müsste  $\Delta R(\omega)$  auf weniger als  $15,3 \mu\Omega$  begrenzt bleiben. Mit jeder weiteren, 6 dB höheren, Störabstandforderung halbiert sich der zulässige frequenzabhängige Widerstandsfehler.

Der hier betrachtete Effekt basiert auf Wirbelströmen, die in jedem von einem Wechselstrom durchflossenen Leiter induziert werden; synonym wird das Phänomen auch mit Stromverdrängung oder Skin-Effekt bezeichnet. Der Zusammenhang zwischen der Frequenz des Wechselstroms und der resultierenden Widerstandsänderung ist nicht rational und daher durch kein Netzwerk aus diskreten linear frequenzabhängigen Bauelementen zu kompensieren. Für kreisrunde Leiter gilt näherungsweise für die Eindringtiefe  $\delta$  (Dicke der äquivalenten Leitschicht).

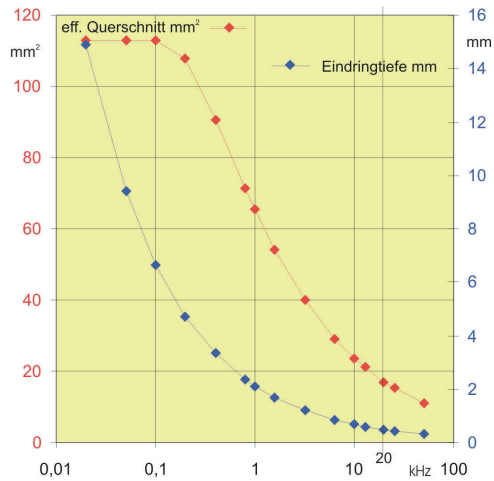
$$\delta = \frac{15,9}{\sqrt{\kappa \cdot \frac{\omega}{2\pi}}}$$

$\delta$	mm
$\kappa$	$\frac{\text{Sm}}{\text{mm}^2}$
$f = \frac{\omega}{2\pi}$	kHz

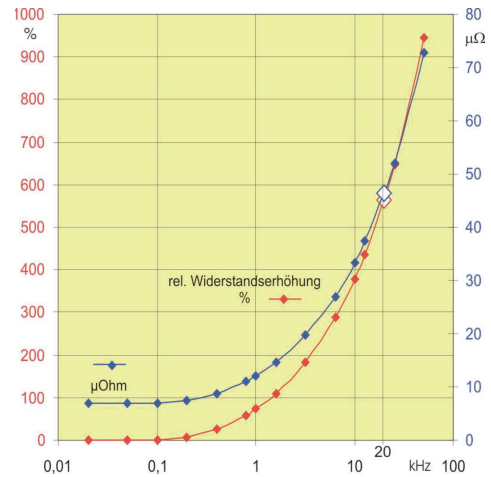
$$R(\omega) = R_0 + \Delta R(\omega) = \frac{l}{\pi D \kappa \delta}; \quad L(\omega) = \frac{1}{\omega} \frac{l}{\pi D \kappa \delta}$$

Die Näherungen für  $R(\omega)$  und  $L(\omega)$  gelten für  $2\delta < D$ , wobei  $D$  die Dicke des Leiters ist und  $l$  dessen Länge.

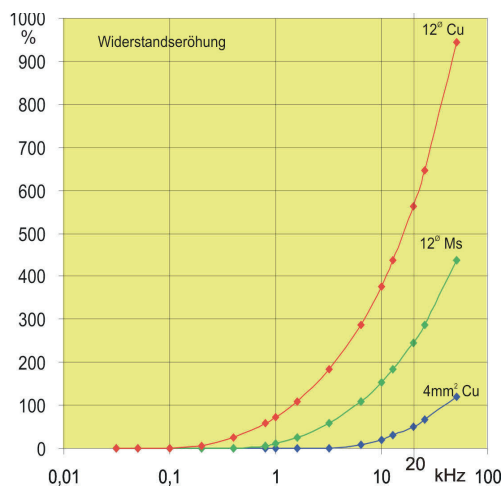
Die Kurven in den Abb. 2 bis Abb. 5 wurden auf Basis der Formel für  $\delta$  ermittelt, mit Abmessungen, die in etwa einer WBT-0763 für die Leiterdicke von 12 mm bzw. einer WBT-0710 für den Leiterquerschnitt von 4 mm<sup>2</sup> entsprechen.



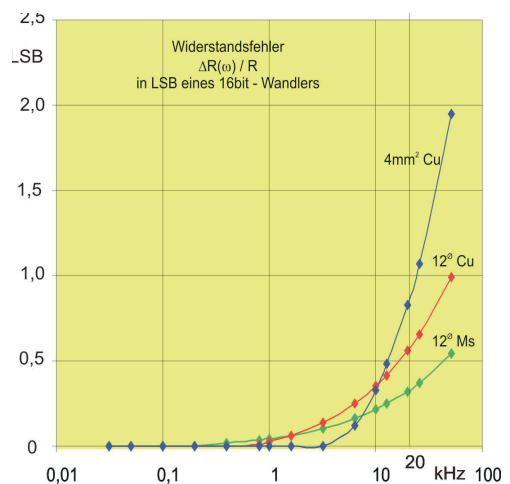
**Abb. 2**  
Eindringtiefe und effektiver Leiterquerschnitt für eine 12 mm starke Polklemme (Cu)



**Abb. 3**  
Widerstand  $R(\omega)$  und relative Widerstandserhöhung für eine 12 mm starke Polklemme (Cu)



**Abb. 4**  
Relative Widerstandserhöhung für eine  
 – 12 mm starke Polklemme (Cu)  
 – 12 mm starke Polklemme (Ms)  
 – 4 mm<sup>2</sup> starke Polklemme (Cu)



**Abb. 5**  
Frequenzabhängiger Widerstandsfehler einer  
 – 12 mm starken Polklemme (Cu)  
 – 12 mm starken Polklemme (Ms)  
 – 4 mm<sup>2</sup> starken Polklemme (Cu)  
 in einer 8 Ω Lautsprecher Verbindung

### Es lassen sich folgende Aussagen daraus ableiten:

1. Die aus den Wirbelstromeinflüssen resultierenden Verzerrungen des Durchgangswiderstands einer massiven Cu - Polklemme erreichen zwischen 100 Hz bis 20 kHz Werte, die die durch einen 16 bit Wandler definierte Grenze sicher verletzen. (s. Abb. 3)
2. Die Eindringtiefe ist für Cu – Rundleiter schon bei 1 kHz weniger 2,5 mm. (s. Abb. 3)
3. Ein schlechter leitendes Material (z.B. Ms) bringt zwar einen höheren Durchgangswiderstand (etwa 4-fach), verursacht aber einen schwächeren und später einsetzenden frequenzabhängigen Widerstand. (s. Abb. 4)
4. Ein kleinerer Querschnitt (z.B. 4 mm<sup>2</sup>) erhöht den Durchgangswiderstand drastisch (etwa 30-fach), der relative frequenzabhängige Widerstandanstieg beginnt aber erst bei etwa 10 kHz. (s. Abb. 4)
5. Die verschwindend kleine relative Widerstandsänderung der 4 mm<sup>2</sup> Polklemme macht sich auf Grund des ca. 30-fachen Durchgangswiderstands mit merkbarem Einsetzen der Stromverdrängung ( $f > 10\text{kHz}$ ) durch einen entsprechend stark ansteigenden Widerstandsfehler bemerkbar. (s. Abb. 5)
6. Nicht aus den Diagrammen zu entnehmen ist noch ein weiterer Zusammenhang; für rechteckförmige Leiterflächen. Mit einem stark von 1 abweichenden Seitenverhältnis setzt die Wirkung der Stromverdrängung erst bei höheren Frequenzen ein. Dieser Effekt ist in den Diagrammen nicht berücksichtigt.

Als Resümee lässt sich feststellen, was den Masse(Speicher-)effekt Wirbelströme anbetrifft, dass eine Verringerung der leitenden Masse einer Polklemme auf den frequenzabhängigen Widerstandsfehler einen positiven Einfluss hat, und ein Versuch die Masse (Ms) durch eine „bessere“ Masse (Cu oder gar Ag) zu ersetzen, einen gegenteiligen Effekt haben würde.

Die hier ausgelassene Diskussion des Einflusses, der mit der Signalfrequenz nichtlinear abnehmenden Eigeninduktion – die ähnlichen Zusammenhängen unterliegt – sowie des Einflusses der Kapazität eines Klemmenpaares, bringt weitere theoretische Bestätigung, des durch die eingangs erwähnten praktischen Hörvergleiche vermuteten Masse-Modells.