

DAGA 2011/261: Gibt es eine optimale Kabelgeometrie für Lautsprecherkabel?

Drazenko Sukalo

DSL-Device Solution Laboratory, 80809 München, E-Mail: d.sukalo@dslab.de

1. Einleitung

Verursachen Lautsprecherkabel Klangunterschiede [1]? Ja, wenn ein Lautsprechersystem soweit „sensibilisiert“ ist, dass er diese Klangunterschiede wiedergibt. Dazu gehören Abhörsysteme mit hohem Anspruch auf Wiedergabequalität. Jedes Lautsprecherkabel ist an sich ein Starkstromkabel und sein allerwichtigster Parameter ist sein DC-Widerstand. Daraus sind folgende Richtwerte für den gesamten Signalleiterquerschnitt für eine gute Qualität abgeleitet: 2.5 mm² für die Kabellänge (KL) bis 2 m, 6 mm² für KL bis 4 m und 10 mm² für KL kleiner als 10 m. Verzerrungen im LS-Kabel sind tatsächlich auf eine Modulation des DC-Widerstandes mit einer inhomogenen Stromdichteverteilung über den Leiterquerschnitt zurückzuführen. Wenn die Verzerrungsart Klangunterschiede verursacht, dann würden diese subjektiv erst im Hochtonbereich als eine Änderung der Klangbrillanz in Bezug auf das Bassfundament empfunden. (der Ton wird etwas stumpf statt strahlend und klar). Unter dem Skineneffekt versteht man die Erscheinung, dass der Strom bevorzugt an der Leiteroberfläche fließt, um die innere Leiterinduktivität zu reduzieren. Bei dem Proximityeffekt beeinflussen externe Magnetfelder die Stromdichteverteilung im Leiter. Die Effekte bewirken im Wechselstrombetrieb, dass zwei zusätzliche Anteile zum DC-Widerstand, R_{dc} , addiert werden: $R_{ac} = R_{dc} + R_{skin} + R_{prox}$. Die Werte lassen sich ausgehend von den Maxwell-Gleichungen für quasistationäre Felder im Leiterinneren aus einer Bessel'schen Differentialgleichung berechnen [5], [2]. Es soll im Beitrag das Problem der Stromdichteverteilung in den Leitern im LS-Kabel verifiziert sowie wichtige Ansätze für die Optimierung der Kabelgeometrie gegeben werden.

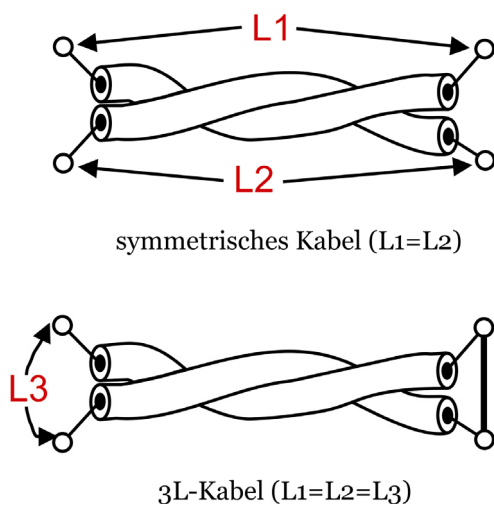


Abbildung 1: Symmetrisches Kabel und bevorzugte 3L-Kabelgeometrie für Lautsprecherkabel

2. Optimierung des LS-Kabels: Stand der Technik

Eine Optimierung der Signalleitung, bei der ein Volldraht durch mehrere isolierte gleichartige Einzeldrähte ersetzt wird, ist in [3] beschrieben. Jeder eine dieser Einzeldrähte wird mit dem Strom gleicher Intensität durchflossen, wenn er über gesamte Leitungslänge jede Lage innerhalb des Leitungsquerschnitts mindestens einmal einnimmt. Eine gezielte Reduzierung der gesamten Loop-Induktivität mit bestimmter Kabelgeometrie gilt bis heute als allgemeine Empfehlung zur klanglichen Optimierung des LS-Kabels [4].

Zum Vergleichstest sind folgende Kabel unabhängig von der Anzahl und der Aufbau der Einzeldrähte im Signalleiter (alle mit isolierter Litzenleitung) genommen: ein paralleler Doppelleiter, ein Kabel mit zwei einzelnen frei gelegten Signalleitungen und eins mit exaktem Verflechtungsmuster. Damit alle Kabel ein in etwa identisches Tiefbassfundament liefern, waren alle Kabel mit etwa gleicher Länge und mit identischem DC-Widerstand im Loop-Betrieb mit einer Toleranz innerhalb von 10 %, während erst im oberen Frequenzbereich infolge von elektrodynamischen Effekten im Kabel möglicherweise klangliche Unterschiede erwartet worden wären. Als Testsequenz wurde ein Solo Klavierstück [Fantasie KV397, Mozart sonate pour piano, Ivo Pogorelich, CD DG 437763-2] benutzt und die Klangunterschiede von 10 Personen, die regelmäßig an Klavierunterricht teilnehmen, mit Hilfe der Eliminationsmethode ausgewertet. Die Testergebnisse zeigen, dass bei einem Doppelleiter mit dem Querschnitt von 6 mm² bereits die Klangbrillanz beeinflusst wird (Die Vergrößerung des Leiterquerschnittes reduziert die innere Induktivität - Vergleiche mit dem Wert $\mu/8\pi[H/m]$), obwohl des Vergleichs halber die Eindringtiefe beim Skineneffekt beträgt 0.5 mm (für Rundkupferleiter bei 20 kHz). Eine elektrodynamische Interaktion zwischen den Signalleitern im Lautsprecherkabel spielt eine wesentliche Rolle im Übertragungsprozess, wobei die Stromintensität scheint den Wechselstromwiderstand, R_{ac} , mehr zu beeinflussen als bisher angenommen in [2] und [5].

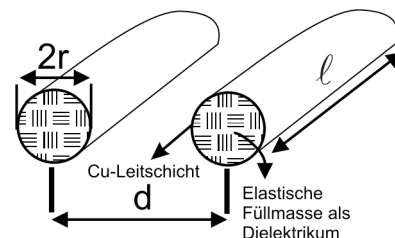


Abbildung 2: 3L-Design mit parallelem Doppelleiter

3. 3L-Design mit einem parallelen Doppelleiter

Abgesehen von jeder beliebigen Kabelauführung lässt das Minimumprinzip der Natur den Strom in den Signalleitern immer so fließen, dass ein Minimum an Energie im

Übertragungsprozess eingesetzt wird. Gibt es eine optimale Kabelgeometrie, welche einem absoluten Energieminimum entspricht? Magnetische Interaktion im Starkstromkabel kann minimiert werden, wenn die notwendige elektrische Leistung für den Aufbau des magnetischen Feldes im Übertragungsprozess zeitlich nur vom Signal und nicht von der Ladungsträgerperturbation entlang des Kabels (endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit und Änderung der internen Induktivität L_i) abhängig ist. Die Abhängigkeit der Leistung von der Steilheit des Signals und von der Induktivität des Signalwegs lässt vermuten, dass angesichts des Energieminimums eine optimale Induktivität des Kabels gefunden werden kann. Die Induktivitäten des Signalwegs können durch Geometrie des Kabels beispielweise so eingestellt werden, dass für die Induktivität der Signalleitung, L_e , und für die Closed-Loop-Induktivität, $L_{loop} = 2 \cdot L_e(1-k)$, gilt: $L_e = L_{loop}$. Daraus folgt der Wert des magnetischen Kopplungsfaktors $k = 0,5$.

Gestützt auf Testergebnissen und Beobachtungen auf diesem Gebiet geht die optimale Kabelgeometrie für LS-Kabel aus folgender Prämisse [6] hervor: Eine bevorzugte Kabelgeometrie für LS-Kabel bildet jedes symmetrische Kabel (Hin- und Rückleitung besitzen identischen Aufbau und damit identische Induktivität, siehe Abb. 1) aus, wenn für den magnetischen Kopplungsfaktor zwischen den beiden Signalleitern gilt: $k_{12} = k_{21} = k = 0,5$.

Die vorgeschlagene 3L-Geometrie lässt sich also am einfachsten mit einem Doppelleiter (Abb. 2 realisieren, indem der Abstand von den beiden Signalleitern, d , so eingestellt ist, dass die Induktivitäten gemessen an einem der beiden Kabelenden, während das andere Kabelende elektrisch kurz geschlossen ist, und die einzelne Induktivität des Hin- und Rückleiters des Kabels, während die Anschlüsse des übrig gebliebenen Signalleiters offen bleiben, alle untereinander den gleichen Wert besitzen: Mathematisch ausgedrückt, dass für die Geometrie des Doppelleiters, zwischen den Größen d , r und l folgende Relation gilt [7]:

$$2 \cdot \ln \frac{d+r}{r} = \ln \frac{2 \cdot l}{r} - 1 \quad (1)$$

Relation (1) kann aus der Induktivität eines geradelinigen im Raum frei gestellten Hinleiter ohne Umgebungsinteraktion [8] und aus der Kopplungsinduktivität, wenn zusätzlich der gleichartige Rückleiter so ausgelegt ist, dass der magnetische Kopplungsfaktor k zwischen den beiden Signalleitern $k = 0,5$ beträgt, berechnet werden. Also speziell für den Wert des Kopplungsfaktors $k = 0,5$ wird die Variable= (magnetische Interaktion zwischen den Signalleitern $\times L_{loop}$), minimiert. Elektrische Leistung für den Magnetfeldaufbau mit der Induktivität L infolge des Stromes i beträgt: $dW = L(t) \cdot i(t) \cdot di + i(t) \cdot i(t) \cdot dL$, und wenn: $L(t) = \text{Konstant}$ und $dL = 0$ (\rightarrow Hohlader), hängt diese Leistung nur vom Signal ab.

4. Zusammenfassung

Eine Reduzierung der gesamten Loop-Induktivität des Lautsprecherkabels unter den Induktivitätswert, den allein

ein geradliniger, im Raum frei gestellter elektrischer Signalleiter ohne Interaktion mit der Umgebung besitzt, halte ich als nicht unbedingt zielführend, es sei denn, um die EMV-Vorgaben einzuhalten. Wichtigste Ansätze zur Optimierung liegen in der elektrodynamischen Interaktion. Die Anwendung von Gold, Silber oder von speziellen Legierungen spiegelt sich aus elektrodynamischer Sicht letztendlich nur durch den DC-Widerstand wieder und erhöht unnötig die Herstellungskosten. Die Ausführung des Signalleiters als zwei identische runde Hohladern hat den Vorteil, dass die innere Induktivität der Ader vernachlässigt werden kann. Im Vergleich zu einem Volldraht aus Metall ist das magnetische Feld im Inneren der Hohladern gleich Null, so dass eine von der Signalsteilheit abhängige Modulation der Stromdichte über den Querschnitt des Leiters von Anfang an verhindert wird. Anschlüsse des Kabels, welche „Impedanz“-optimiert sind, bringen keine Verbesserungen, denn eine Betrachtung des Kabels ähnlich einer Transmissionsline mit den verteilten Parameter in Bezug auf Phänomenen wie Reflexion, Impedanz usw. ist klanglich nicht relevant [9]. Die beiden Enden des Kabels können am besten mit einem vergoldeten Kabelschuh oder mit einem 4mm Banane-Stecker mit vergoldeten, gefederten Kontaktlamellen angeschlossen werden: Es muss ein optimaler Kontakt und möglichst eine optimale Kraftverteilung in Bezug auf den Halt (das Kabel zieht mit seinem Gewicht) gewährleistet werden.

Literatur:

- [1] R. Black, "Audio cable distortion is not a myth!", Convention Paper 6858 presented at the 120th Convention 2006, May 20 – 23, Paris, France
- [2] G. Bühler, "Systemverluste bei der berührungslosen induktiven Energieübertragung" Die Dissertation ist 2009 im Verlag Dr. Hut in München unter „ISBN: 978-3-86853-172-5“ erschienen.
- [3] H. Milliken, US 1904162, "Electrical Cable"
- [4] Fred E. Davis, "Effects of Cable, Loudspeaker, and Amplifier Interactions", JAES, Vol. 39, No. 6, June 1991
- [5] S. Ramo, J. R. Whinnery, T. Van Duzer, "Fields and Waves in Communication Electronics", John Wiley & Sons, New York, 1984, pp. 178-182
- [6] D. Sukalo, "Elektrokabel mit optimierter Propagationszeit zur Signalübertragung", DE Patent No. 102007023935, patented Decembre 19, 2008
- [7] D. Sukalo, "Elektrokabel mit optimierter Propagationszeit zur Signalübertragung", DE 102008062744A1
- [8] T. Healy, "The Inductance of a Straight Wire", Santa Clara University, CA, June 1, 2000
- [9] R. A. Greiner, "Amplifier-Loudspeaker Interfacing", JAES, Vol. 28, No. 5, May 1980