

THE GENESIS REPORT ®

(Quelle: www.qedkabel.de)

ENTSTEHUNGSGESCHICHTE UND HINTERGRÜNDE ZU DEN QED-KABELN

QED, England hat sich ausführlich mit der Entwicklung von Lautsprecherkabeln im bezahlbaren Bereich beschäftigt. Die vielfältigen Fakten und Hintergründe sind in einem englischen Aufsatz des Forschungs- und Entwicklungsteams veröffentlicht worden, dessen Übersetzung Ihnen hier vorliegt: THE GENESIS REPORT.

Der rasante Aufstieg des Lautsprecherkabels von der simplen Verbindungsfunktion zu einem ernsthaften Bestandteil der HiFi-Anlage ist beachtlich. Einst nachrangig in der Bedeutung, ist das Kabel heute ein wichtiger High-Tech-Baustein in der Übertragungskette von Audio und Video.

Mittlerweile gibt es viele unterschiedliche Kabel, die für die unterschiedlichsten Aufgaben entwickelt wurden. Der Kabel-Boom konfrontiert den ernsthaft Musikbegeisterten aber auch mit schwer nachvollziehbaren Argumenten. Aus dem einfachen Käuferwunsch nach einem guten Produkt wird ein Alptraum aus Mystik und Pseudowissenschaft, verstärkt durch die Ergüsse einzelner Marketingabteilungen und Händler.

Auf den folgenden Seiten lesen Sie eine Zusammenfassung der weitreichenden Forschung von QED-Ingenieuren über die Einflüsse des Lautsprecherkabels. Ziel der Forschung war zunächst die Entwicklung von neuartigen Lautsprecherkabeln. Die jetzt vorliegenden QED- und PROFILE-Kabel basieren auf diesen Forschungsergebnissen. Diese Forschungen haben später auch die Entwicklung der QUNEX-NF-Kabel beeinflusst.

Messergebnisse erzählen nie die ganze Geschichte, auch im Bereich der hochwertigen Musikwiedergabe spielen Hörtests eine große Rolle. Hörsitzungen allein konnten nicht alle technischen Unterschiede aufklären, aber wenn ein Kabel bereits messbare Fehler und Verfärbungen aufwies, war es gehörmäßig ebenfalls ungeeignet.

Genau, transparent und so neutral wie möglich. So lautet der Grundsatz bei der QED-Kabelentwicklung. Realisiert wurde die Produktentwicklung mit dem Wissen aus dem GENESIS REPORT und den Einflüssen unzähliger Hörtests.

DIE FUNKTION DES KABELS

Auf den ersten Blick ist die Verbindung vom Verstärker zum Lautsprecher mittels Kabel genauso unspektakulär wie selbstverständlich. In der Praxis aber ist fast jeder Zuhörer in der Lage, Klangdifferenzen unterschiedlicher Kabel zu erkennen und zu bewerten. Nur unerfahrene Stimmen leugnen noch das Vorhandensein von klanglich bestimmenden Faktoren, resultierend aus Kabelmaterial und Kabelaufbau.

Wir alle wissen, dass ein Baustein das analoge Musiksignal auf dem Transport keinesfalls verbessern, sondern nur verändern oder verschlechtern kann. Also lautet die größtmögliche Anforderung an ein Lautsprecherkabel: "Verlustfreie Signalübertragung vom Verstärker zum Lautsprecher!".

GRUNDLAGEN DER BEWERTUNG

Weil ein Lautsprecherkabel die Verbindung zweier Komponenten eines HiFi-Systems herstellt, gehören diese beiden Partner – Verstärker und Lautsprecher – selbstverständlich auch in die Betrachtung.

Genaugenommen ist das Lautsprecherkabel die Verlängerung der Verstärker-Schaltung, was bedeutet, dass die Schaltung um die elektrischen Werte des Lautsprecherkabels erweitert wird. Dieses "Extra-Bauteil" ist zerlegbar in seine (Haupt-)Parameter: Widerstand (R), Kapazität (C), Induktivität (L) und Leitfähigkeit (G).

Abbildung 1: Verstärker-Schaltung

Die typische Verstärkerschaltung erreicht ihre geringen Verzerrungen durch den Vergleich des Ausgangs mit dem Eingangssignal (die Gegenkopplung). Jede Abweichung vom

Original, die am Ausgang auftritt, wird gegenphasig am Eingang korrigiert. Abb. 1 zeigt, dass Verstärker nur korrigierend auf Fehler reagieren können, die am "Feedback Point" innerhalb des Verstärkers auftreten. Fehler, die erst am Lautsprechereingang auftreten, bleiben unkorrigiert. Das Kabel befindet sich somit ausserhalb des üblichen Regelkreises. (Um Kabeleffekte auszuschließen beziehen einige seltene Verstärkermodelle die Lautsprecherkabel in die Gegenkopplung mit ein, indem sie eine zusätzliche Leitung zum speziellen Feedback Point ? am Verstärker rückführen.) Auf dieser Basis ist eine objektive Bewertung der klanglichen Unterschiede von Kabeln möglich: Man vergleicht das Eingangssignal in das Kabel (am Verstärkerausgang) mit dem Ausgangssignal (am Lautsprechereingang). Jede Differenz ist eine Verschlechterung des Signals.

ERLEBBARE EFFEKTE IN DER WIEDERGABE

Es gibt viele Begriffe, um die subjektiven Kabeleffekte zu beschreiben, sowohl positive wie: transparent, offen, detailliert, rhythmisch und musikalisch, aber auch negative wie: schlank, langsam, belegt, unausgewogen usw.

Die Genesis-Forschung hat aufgezeigt, dass einige der (subjektiven) Begriffe durch die (objektiven) Messungen erklärt werden können.

Die Kabel, die dieser Untersuchung zu Grunde liegen, repräsentieren ein breites Spektrum des heutigen Angebotes, alle Messungen erfolgten an einer realen Last, dem Lautsprecher.

Abbildung 2: Frequenz bei Verwendung eines Kabels mit geringem Widerstand

Abbildung 3: Frequenz bei Verwendung eines Kabels mit hohem Widerstand

Abb. 2 und 3 zeigen Messungen von Frequenzgängen. Die jeweils obere Linie ist gemessen am Verstärkerausgang, die untere am Lautsprechereingang. Die Unterschiede sind deutlich erkennbar: Beispielkabel #10 in Abb. 2 ist ein Litzenkabel mit sehr geringem Widerstand, Kabel # 7 in Abb. 3 ein Solid-Core. Die Welligkeiten im Frequenzgang spiegeln den Impedanzverlauf des Lautsprechers wider, hier typisch für ein Bassreflexsystem. Bei dieser Messung wurde ein Sinusgenerator benutzt. Im Normalfall überträgt das Lautsprecherkabel Musik und nicht sinuoidale Audiosignale in die komplexe Last des Lautsprechers.

Die Kombination dieser beiden Faktoren führt zu weit größeren Dynamikverlusten durch das Kabel, als die Frequenzschriebe vermuten lassen.

Die Beispiele verdeutlichen die Notwendigkeit eines niedrigen Kabelwiderstandes für einen geradlinigen Frequenzverlauf. Überraschenderweise beobachten wir trotzdem einen Trend zu den vergleichsweise hochohmigen "Solid-Core"-Kabeln, deren meistgenanntes Verkaufsargument die Reduktion des "Skin-Effekts" ist.

SKIN-EFFEKT

Der Skin-Effekt beschreibt ein Phänomen, welches seine Bedeutung aus der Hochfrequenztechnik herleitet: Durchfließt Wechselstrom einen Leiter, induziert das Wechsellängsfeld eine elektromotorische Kraft (EMK). Die EMK führt zur Abnahme der Stromdichte im Leiterinneren hin zur Leiteroberfläche. Das Ergebnis ist ein Anstieg der Kabelimpedanz zu hohen Frequenzen.

In der Hochfrequenztechnik (oberhalb des Audio-Spektrums), wo der Skin-Effekt deutlich messbar ist, werden Kabel mit widerstandsreduzierendem Silber an der Oberfläche, wo der hochfrequente Strom am dichtesten fließt, beschichtet.

Um dem Skin-Effekt bei Audio-Kabeln entgegenzuwirken, wurden Kabel mit Aderdurchmesser nicht größer als dem Doppelten der effektiven Signaldurchdringungstiefe entwickelt, also der Tiefe, bei der die Stromdichte auf 63 % ihres Wertes abfällt. Die Idee ist, dass das Kabel in allen Frequenzbereichen in einer Art reduzierter Stromdichte arbeitet. Kabel dieser Bauform weisen eine relativ hohe Impedanz über den gesamten Frequenzbereich auf.

Ob der Skin-Effekt hörbar ist, wird viel diskutiert, die Mehrheit der Experten bestreitet gar das Vorhandensein im Audiospektrum. Zur Beurteilung, wie wichtig dieses Phänomen tatsächlich ist, wurden vier Testmuster verschiedener Lautsprecherkabel – jeweils zwei Vertreter mit großem Kabelquerschnitt und zwei sehr dünne "Low-Skin-Effekt"-Kabel – näher betrachtet.

Zunächst wurden alle Parameter der Kabel wie Widerstand, Induktivität, Kapazität und

Stromleitfähigkeit gemessen. Diese Ergebnisse wurden verwendet, um eine theoretische Vorhersage über Phasenverschiebungen an einer realen Last zu errechnen. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Berechnungen gar nicht den Skin-Effekt berücksichtigen, es wurde nur mit den einfachen, vorgenannten Basis-Parametern gerechnet.

Abbildung 4: Theoretische Phasenverschiebung

Abbildung 5: Gemessene Phasenverschiebung

Abb. 4 zeigt die errechneten theoretischen Phasenverschiebungen der vier Beispielkabel. Der Vergleich zwischen der Theorie in Abb. 4 und den tatsächlich gemessenen Phasenverschiebungen in Abb. 5 zeigt eine bemerkenswerte Ähnlichkeit zwischen Vorhersage und Messergebnis. Lediglich über 80 kHz konnte eine merkliche Abweichung der mehradrigen Litzenkabel mit Phasenverschiebungen festgestellt werden, die dem Skin-Effekt und mit diesem einhergehenden Effekten zuzuschreiben sind (sofern 270 bei 100 kHz als bedeutend zu werten sind).

Ein weiteres Phänomen ist, dass die Stromdichte zweier paralleler Leiter an deren inneren Oberflächen zunimmt (der Effekt ist am größten, wenn die Kabeladern praktisch aneinanderliegen). Die gemessenen Phasenverschiebungen sind in der Regel geringer als die theoretischen Voraussagen bezüglich des Skin-Effekts.

Vorab sei schon zu bemerken, dass das Testkabel C-7 die geringsten

Phasenverschiebungen aufweist – einhergehend mit seiner geringen Induktivität (vgl. Abb. 4 und 5).

INDUKTIVE EFFEKTE

Ein Vergleich der Abb. 6 und 7 zeigt deutlich den Zusammenhang zwischen Kabelinduktivität und Phasenverschiebungen. Je höher die Kabelkapazität, desto höher sind die Phasenverschiebungen. Die meisten der mehradrigen Litzenkabel im Testfeld weisen ähnlich hohe Induktivitäten auf; die Kabelinduktivität ist geprägt von der Querschnittsfläche der Leiter, deren Abstand voneinander und der Permeabilitätskonstante der umgebenden Materie.

Abbildung 6: Kabelinduktivität

Abbildung 7: Kabelinduzierte Phasenverschiebung bei 20 kHz

Viele der heute erhältlichen mehradrigen Litzenkabel weisen einen großen Abstand zwischen den Leitern auf – bis zum dreifachen und mehr des Kabelquerschnitts.

Der durchschnittliche induktive Effekt des Testfeldes ergibt eine Phasenverschiebung von 0,42 Grad pro Meter, entsprechend für ein Kabel von zehn Metern Länge einen Phasenfehler von 4,2 Grad.

In der Praxis liegt die Kabelinduktivität in Serie (additiv) mit der induktiven Komponente des Verstärkers, die hochfrequente Schwingungen vermeidet. Der induktive Effekt ist also immer zusammengesetzt, so dass die Gesamtinduktivität des Verstärkers durch das Kabel deutlich beeinflusst wird.

DIE HÖRBARKEIT VON PHASENVERSCHIEBUNGEN

Dass frequenzabhängige Phasenverschiebungen hörbar sind, ist heute noch relativ unbekannt, obgleich Verstärker mit schlechtem Phasenverhalten subjektiv als "harsch" empfunden werden. Überraschenderweise finden Phasenverschiebungen bei Verstärkerdaten keine Erwähnung, obwohl es keinesfalls ungewöhnlich ist, bei handelsüblichen Verstärkern Phasenverschiebungen größer 15 Grad / 20 kHz nachzuweisen.

INDUKTIVITÄT UND KAPAZITÄT

Ein anderer Effekt der Induktivität ist der Abfall hoher Frequenzen bei steigender Kabelimpedanz. Interessanterweise kann eine hohe Kabelimpedanz für einen scheinbaren Anstieg der Ausgangsspannung am Lautsprechereingang relativ zum Verstärkerausgang führen. Dies kann problematisch bei elektrostatischen Lautsprechern sein, die für gewöhnlich dem Verstärker höhere kapazitive Lasten als konventionelle Lautsprecher zumuten.

Abbildung 8: Frequenzabhängigkeit bei Verwendung eines Kabels mit hohem Widerstand
Ein Beispiel für diese Resonanzspitzen zeigt Abb. 8 im Vergleich mit dem direkten

Verstärkersignal. Der Anstieg der Kabelimpedanz zu hohen Frequenzen führt, zusammengesetzt mit dem Abfall des Verstärkers, zu beträchtlichen Pegelverlusten bei hohen Frequenzen.

DIELEKTRIKUM

Die Leiter eines jeden Lautsprecherkabels sind mit einer Isolierung ummantelt, um Kurzschlüsse zu vermeiden. Diese Isolation (Dielektrikum) führt unweigerlich zu Verfälschungen, weil alle Dielektrika Energie absorbieren. Diese dielektrischen Verluste werden als Verlustfaktor oder $\tan\delta$ bezeichnet und nehmen mit der Frequenz zu. Pauschal gilt: je höher der Verlustfaktor bei einer bestimmten Frequenz, um so höher ist der Verlust in das Dielektrikum. Eine Auswahl von Messungen des Verlustfaktors zeigt Abb. 9 mit überraschend breit gespreizten Ergebnissen.

Abbildung 9: Kabel-Verlustfaktor

Eine weitere Eigenschaft des Dielektrikum heisst Permittivität, ein kapazitiver Effekt, der zu einem Leck-Strom zwischen den Einzelleitern führt. Permittivität ist die Messung, in welchem Maße ein Dielektrikum das Entstehen eines Magnetfeldes zulässt. Je höher die Permittivität eines Isolators, um so höher sind seine kapazitiven Effekte auf den Leiter.

Für die gebräuchlichen Isolationsmaterialien von Lautsprecherkabeln betragen

Dielektrizitätskonstante (ϵ_r) und Verlustfaktor $\tan\delta$:

Isolator ϵ_r $\tan\delta$ bei 10kHz

Polyvinylchlorid (PVC) 4,0–8,0 0,01–0,05

Polyethylen (PE) 2,6 0,0002

Polypropylen (PP) 2,25 0,0004

Polytetrafluoroethylen (PTFE) 2,1 0,002

Luft 1,0006 nahe 0

Vakuum 1,0000 0

Die Kapazität hängt ebenfalls vom Abstand und Durchmesser der Leiter ab. Je größer die Lücke zwischen zwei Leitern in einem Dielektrikum, um so niedriger ist seine Kapazität (gilt im umgekehrten Sinne für die Induktivität)

Der Blick in die obere Tabelle lässt erkennen, dass ein Kabeldesign mit niedriger Kapazität und Induktivität bei Auswahl ungeeigneter Isoliermaterialien unnötig schwieriger wird.

Die Mehrzahl der Niedrigpreis-Kabel und einige der getesteten Kabel verwenden PVC-Mäntel, die zu einer verhältnismäßig hohen Kapazität und hohen dielektrischen Verlusten führen. Unabhängig vom Kabeldesign sind diese Kabel eindeutig unvorteilhaft, entweder wegen zu hoher Kapazität oder zu hoher Induktivität (oder beidem).

LEITFÄHIGKEIT

Ein anderes Kriterium für die klanglichen Einflüsse des Dielektrikums ist – verknüpft mit den dielektrischen Verlusten – die Leitfähigkeit (G). Die Leitfähigkeit gibt an, wie gut zwei Leiter voneinander isoliert sind. Je niedriger die Leitfähigkeit, um so größer ist der Isolationswiderstand (R_p). Qualitativ hochwertige Dielektrika sind regelmäßig die besseren Isolatoren, weil hier viel weniger "freie Elektronen" versuchen, Strom durch den Isolator zu transportieren.

KAPAZITIVE EFFEKTE

Theoretisch sollte sich die Kabelkapazität klanglich nur gering auswirken, da die Quellenimpedanz der meisten Endverstärker mit unter einem Ohm sehr niedrig ausfällt. Obwohl die Kapazität zur angeschlossenen Impedanz ein Tiefpassfilter darstellt, ist der Effekt auf den Frequenzgang vernachlässigbar. Hinterlistigerweise sind übertrieben hohe Kabelkapazitäten ein Indiz für schlechte Qualität des Dielektrikum und hohe Ableitverluste über die Isolierung.

Einige "esoterische" Kabel haben eine Vielzahl einzelner, voneinander isolierter Drähte. Bei bestimmten Geometrien und mittelmäßiger Materialauswahl erreicht die Kapazität bei diesen Kabeln ungewöhnlich hohe Werte. Eines der getesteten Kabel erreichte gar eine Parallelkapazität von 1375 pF bei einem Durchschnittswert des Testfeldes von 500 pF auf 1 m Kabellänge!

Ein anderer betrachtungswürdiger Faktor ist die Stabilität des Verstärkers. In einigen Fällen

führt eine geringe "Extraportion Kapazität" am Ausgang den Verstärker zum Schwingen, Überhitzen oder schlimmstenfalls zur Selbstzerstörung. Oder der Verstärker schwingt kurzzeitig, ohne dass dies wahrgenommen wird. Gute Verstärkerschaltungen besitzen in der Regel ein gutes Verstärkungs-/Phasen-Verhältnis und stellen sicher, dass geringe zusätzliche Phasenverschiebungen durch höhere Kapazitäten keine Probleme verursachen.

Abb. 10: Hochfrequentes "Klingeln" bei Verwendung eines hochkapazitiven Kabels
Trotzdem gibt es viele Verstärker am Markt mit weniger gutem Verstärkungs-/Phasen-Verhältnis. Gerade diese Verstärker haben Probleme mit größeren Längen bei Kabeln hoher Kapazität. Leider ist die Induktivität gerade bei hochkapazitiven Kabeln niedrig, was zu einer weiteren Verringerung der Stabilität führt. Auch wenn nicht äusserlich instabil, kann das Klangbild hart und vorlaut erscheinen, wenn der Verstärker an der Grenze seiner Stabilität arbeitet. Abb. 10 zeigt die Instabilitäten als Überschwinger eines "schnellen" Rechtecksignals bei hochkapazitiven Kabeln.

KAPAZITÄT GEGEN INDUKTIVITÄT

Wird der Abstand zweier Leiter in einem Dielektrikum vermindert, verringert sich die Induktivität und erhöht sich die Kapazität. Eine Erweiterung des Abstandes hat den gegenteiligen Effekt. Es gilt heute in HiFi-Fachkreisen die unumstößliche Regel, dass sich die Induktivität nicht verringern lässt, ohne die Kapazität zu erhöhen. Dennoch haben Vergleiche gezeigt, dass durch verschiedene Kabel-Layouts bei gleicher Querschnittsfläche (und damit gleichem DC-Widerstand) und gleichem Dielektrikum diese Regel durchbrochen werden kann, einfach durch Umordnung der Leiter (vgl. Tab. 1).

Diese Messwerte der Kabel, die als ein direktes Ergebnis der Genesis-Forschung entwickelt wurden, verdeutlichen die Wichtigkeit der Kabelgeometrie. Die Messwerte für Widerstand, Induktivität und Kapazität entsprechen den QED-Kabeln QED ORIGINAL und QED-PROFILE 8.

QED ORIGINAL besteht aus jeweils 78 Einzeladern mit einer Stärke von 0,2 mm als Parallelerleiterkonstruktion, PROFILE 8 aus acht Einzelsträngen mit jeweils 19 Adern/0,2mm in einem Flachkabel. Der effektive Leiterquerschnitt beider Kabelsorten ist also gleich, ebenso die Isolierung aus PE niedriger Dichte. Somit lassen sich Differenzen in Induktivität und Kapazität rein nur auf die Geometrie zurückzuführen.

Tabelle 1

PROFILE-Kabel kann verschieden konfiguriert werden. Tab. 1 zeigt die Meßwerte für die paarweise Zusammenfassung der inneren vier und äußeren vier Leiter zu jeweils einem Leiter sowie die Verschaltung der vier linken und vier rechten Leiter. Verglichen mit dem QED-ORIGINAL zeigt das PROFILE 8 in der vier-innen/vier-außen-Konfiguration eine deutliche Reduktion der Induktivität bei leichter Verringerung der Kapazität und durchbricht damit die oben zitierte "Daumenregel". Die links/rechts-Konfiguration ergibt nahezu gleiche Werte für die Induktivität, halbiert aber im Vergleich mit dem QED ORIGINAL die Kapazität!

ÜBERSPRECHEN

Ein oftmals wahrnehmbarer Effekt im Vergleich verschiedener Kabel ist die subjektive Breite der Bühnenabbildung. Ein schwer erklärbares Phänomen, werden doch die beiden Stereokanäle elektrisch voneinander getrennt betrieben.

Eine plausible Erklärung finden wir in der akustischen Kopplung der beiden Lautsprecher im Raum, d.h. die Reaktion auf die Druckschwankungen, erzeugt von einem Lautsprecher, auf dem anderen. Würde nur der rechte Lautsprecher spielen, sollten idealerweise die Chassis des linken Lautsprechers keine Bewegungen ausführen. Ebenfalls sollte der Verstärker den linken Lautsprecher "bremsen".

In der Praxis reduziert hoher Kabelwiderstand aber den Dämpfungsfaktor des Verstärkers. Die gegenseitigen Rückwirkungen der Lautsprecher auf die Verstärker verschieben dann das Stereoabbild in Richtung "enger".

Abb. 11: Ausgangsleistung eines passiven Lautsprechers bei 500 Hz und 3 kHz

Abb. 12: Ausgangsleistung eines passiven Lautsprechers bei 500 Hz und 3 kHz unter Verwendung von Kabeln mit niedrigem Widerstand

Abb. 11 und 12 zeigen die rückwärts induzierten Spannungen in den nichtbetriebenen Lautsprecher. Die mit "x" markierten Spitzen sind die Amplituden der generierten

Testsignale 500 Hz und 3 kHz.

TRANSIENTEN

Wie schon erwähnt, stellen Lautsprecher eine sehr komplexe Last dar und erzeugen unerwünschte Rückwirkungen auf den Verstärker (Gegen-EMK). Das passiert wie im Abschnitt oben beschrieben oder aber bei plötzlichen Amplitudenwechseln, wenn die Lautsprechermembrane "überschwingt". Wie stark dieses Überschwingen stattfindet, hängt von der gemeinsamen Fähigkeit des Lautsprecherkabels und des Verstärkers ab, zu "dämpfen" und unerwünschte Schwingungen zu kontrollieren.

Abb. 13: Überschwingen bei Verwendung eines Kabels mit hohem Widerstand

Abb. 14: Überschwingen bei Verwendung eines Kabels mit geringem Widerstand

Gut zu sehen in Abb. 13 ist die Ausgangsspannung des Verstärkers und die Spannung, an den Lautsprecher-Eingangsklemmen gemessen. Bereits nach 2,4 ms, wenn die Ausgangsspannung des Verstärkers auf Null zurückgegangen ist, fällt die Spannung am Lautsprecher ins Negative und fällt erst nach einem weiteren (positiven) Überschwinger auf Null. Unerwünschte Membranbewegungen sind die Folge.

Abb. 14 zeigt denselben Lautsprecher unter Verwendung eines Lautsprecherkabels mit niedrigerem Widerstand: Die Verbesserung ist deutlich zu erkennen.

DURCH KABEL VERURSACHTE VERZERRUNGEN

Das Lautsprecherkabel schafft auf mehreren Wegen eine elektrische Distanz zwischen Verstärker und Lautsprecher, z.B. mit Gleichstromwiderstand, der den Frequenzgang, die Dämpfung und Auflösung beeinflusst, wie oben schon bemerkt, aber auch mit Verzerrungen, die, gemessen am Lautsprechereingang (gerade die zweite Harmonische), höher sind als am Verstärkerausgang.

Wir fanden heraus, dass die Verschlechterung in Qualität (und Genauigkeit gegenüber dem Original) in hohem Maße vom Gleichspannungswiderstand und vom Lautsprechertyp abhängt. Abb. 15 und 16 zeigen den Verlauf der zweiten Harmonischen bei niedrigen Frequenzen. Die jeweils obere Linie zeigt die Verzerrungen, gemessen am Lautsprechereingang, die untere Linie stellt die Messung am Verstärkerausgang dar.

Abb. 15: Tieffrequente Verzerrungen bei der zweiten Harmonischen (hoher Widerstand)

Abb. 16: Tieffrequente Verzerrungen bei der zweiten Harmonischen (niedriger Widerstand)

In Abb 15 (relativ hochohmiges Kabel, 0,065 Ohm/Meter) sind die Verzerrungen fast dreimal so hoch wie beim niederohmigen Kabel (0,004 Ohm/Meter) in Abb. 16.

Vergleichend zeigt Abb. 17 den Effekt an zwei verschiedenen Lautsprecher-Lasten bei gleichem Kabel. Erkennbar ist, dass nicht das Kabel selbst die Verzerrungen verursacht (der Gleichspannungswiderstand ist nahezu linear), sondern das Kabel verhindert das korrekte Eingreifen der Fehlerkorrektur des Verstärkers bei den vom Lautsprecher verursachten Nicht-Linearitäten.

Abb. 17: Analyse der zweiten Harmonischen bei Verwendung desselben Kabel an unterschiedlichen Lautsprechern

Den Verstärker direkt (ohne Kabel) an den Lautsprecher angeschlossen, zeigten sich kleinere Verzerrungen, die nur bis auf einen geringen Prozentsatz schlechter korrigiert wurden als bei der Vergleichsmessung am Verstärker ohne jede Last. Hier sind weiterreichende Untersuchungen notwendig, es lässt aber den Rückschluss zu, dass Verzerrungen im unteren Frequenzbereich auch von der Resonanzfrequenz des Lautsprechergehäuses beeinflusst werden.

Verzerrungen bei mittleren und hohen Frequenzen nehmen deutlich zu bei steigender Kabelinduktivität, was wiederum die Kabelimpedanz steigen lässt und in der Folge den gemeinsamen Dämpfungsfaktor von Verstärker und Lautsprecher verringert.

VERZERRUNGEN VON LITZE UND SOLID CORE IM VERGLEICH

Es gibt die Meinung, dass Multi-Litzen-Kabel einen "Dioden-Effekt" zeigen, verursacht durch Strom, der zwischen den Leitern hin und her springt und dabei jede Menge Metall-/Oxid-/Metall-Übergänge überwinden muss. (Von manchen wird dieses Phänomen den SkinEffekten zugeordnet.)

Abbildung 18: Gemessene Verzerrung von einer Litze zu einer anderen und von allen

Litzen des Lautsprecherkabels

Unter der Annahme, dass der Strom tatsächlich "springt" (es gibt keinen Hinweis darauf, gerade weil wir wissen, dass der Skin-Effekt darauf keinen nennenswerten Einfluss hat), gaben wir ein Signal in eine Ader einer Litze und nahmen die Messungen an einer anderen Ader vor. Auch unter Benutzung des anerkannten AUDIO-PRECISION-API-Messgerätes bis hinab in die niedrigsten Pegel konnte kein Anstieg der Verzerrungen im Vergleich zum gesamten Litzenkabel festgestellt werden (vgl. Abb 18). Beide Messschriebe stimmen so weitgehend überein, dass man meinen könnte, der identische Test wurde zweimal aufgezeichnet. Es scheint, die Dioden-Effekte existiert nicht – oder wenn doch, sind sie kurzgeschlossen durch die vielen gut zusammengepressten Kontaktflächen über die gesamte Kabellänge.

NENNIMPEDANZ

Obwohl die Nennimpedanz oft in Verbindung mit Audiokabeln genannt wird, stammt der Begriff ursprünglich aus dem Zusammenhang mit Hochfrequenzleitern. Die Nennimpedanz determiniert die korrekte Last und die Quellenimpedanz von Hochfrequenzübertragungsstrecken, um unerwünschten Reflexionen und stehenden Wellen vorzubeugen. Zur einwandfreien Funktion werden deshalb beide Enden, z.B. einer koaxialen Antennenleitung, mit einer resistiven Last im Wert der Nennimpedanz (i.d.R. 75 Ohm) abgeschlossen.

Lautsprecherkabel sind aber in diesem Sinne keine Hochfrequenzleiter, da Audio-Wellenlängen größer sind als die Kabeldurchmesser und damit Reflexionen erst gar nicht auftreten. Selbst wenn es so wäre, ist es unmöglich, beide Enden mit der korrekten Impedanz abzuschließen: Eine 8-Ohm-Quellenimpedanz (entsprechend der Lautsprecherlast) würde den Dämpfungsfaktor ruinieren und sowohl Frequenzgang als auch Verzerrungen ernsthaft beeinflussen.

LAUFRICHTUNG

Messungen von Asymmetrien der getesteten Kabel ergaben, obwohl Laufrichtungsmarkierungen auf einigen Kabeln zu finden waren, keinen Hinweis auf eine Laufrichtungsbindung. Blindtests ergaben, dass die Hörer keine Unterschiede in der Laufrichtung der Kabel feststellen konnten. Für die Vergleiche wurden die Kabel in jeder Richtung exakt gleich verlegt, da sich die elektrischen Kabeleigenschaften bei verschiedener Verlegung sehr wohl messbar ändern.

ZUSAMMENFASSUNG

Obgleich es immer Skeptiker geben wird, die der Bedeutung des Lautsprecherkabels kritisch gegenüberstehen, machen die Ergebnisse deutlich, dass die Wiedergabekette vom verwendeten Kabel sowohl positiv als auch negativ beeinflusst werden kann. Die Analyse aller zusammengetragenen Daten und Erlebnisse lassen einen klaren Zusammenhang zwischen der Übertragungsqualität und den Messergebnissen schlussfolgern. Zusammenfassend sind die Ergebnisse:

1 Kabelwiderstand

Niedriger Kabelwiderstand ist von fundamentaler Bedeutung für eine hochwertige Wiedergabe, sollte aber nicht auf Kosten anderer entscheidender Parameter erkaufte werden. Ein hoher Kabelwiderstand führt zu verschiedenen unerwünschten Ergebnissen: Abnormitäten im Frequenzgang, höhere induzierte Verzerrungen und geringere Kanaltrennung.

Alle Kabel mit hohem Widerstand zeigten schlechte Messergebnisse. Subjektiv hing ihre Performance stark vom verwendeten Lautsprecher ab. Die mittlerebetonte Wiedergabe mancher dieser Kabel korreliert mit dem diesen Kabeln eigenen, zu hohen und niedrigen Frequenzen hin abfallenden Frequenzverlauf. Ein hoher Kabelwiderstand verringert auch die Fähigkeit, Musik mit hohen Dynamikspitzen wiederzugeben.

2 Induktivität

Die Induktivität von Lautsprecherkabeln hat maßgeblichen Einfluss auf die Dämpfung zu hohen Frequenzen und auf Phasenverschiebungen. Die Induktivität führt dazu, dass die Impedanz mit der Frequenz steigt, was zur Dämpfung der höchsten Frequenzen an den Lautsprecheranschlüssen führt, manchmal auch zu rückinduzierten Spannungsspitzen. Zusätzlich erhöht die Induktivität die Verzerrungen an den Lautsprecheranschlüssen und verschlechtert das Einschwingverhalten der Lautsprecherchassis.

3 Skin-Effekt

Der Skin-Effekt ist bei ausreichend großem Kabelquerschnitt von untergeordneter Bedeutung. Bei Kabeln mit größeren Leiterquerschnitten war der Skin-Effekt zwar ausgeprägter, diese Kabel tendierten aber aufgrund ihrer höheren Induktivitäten zu höheren Signalpegelverlusten bei hohen Frequenzen.

Nur bei Frequenzen oberhalb des hörbaren Audio-Spektrums sind Einflüsse durch den Skin-Effekt als bedeutend nachweisbar. Obwohl der prozentuale Anstieg der Wechselstromimpedanz bei großen Leiterquerschnitten größer ist als bei kleinen Leiterquerschnitten, ist die effektive Wechselstromimpedanz (und der Gleichstromwiderstand) geringer. Der Skin-Effekt hat ausserdem den unerwarteten Nebeneffekt, Phasenverschiebungen, die durch die zu hohen Frequenzen steigende Induktivität verursacht werden, zu verringern.

4 Qualität der Isolierung

Der Ableitfaktor war ein ausschlaggebender Parameter für die Wiedergabequalität. Die Mehrheit der besser klingenden Testkabel war mit hochwertigen Isolierungen versehen, PVC- und PU-isolierte Kabel klangen am schlechtesten. Kabel, die messtechnisch durch hohe Ableitfähigkeit des Isoliermaterials als schlecht eingestuft wurden, fielen im Hörtest durch mangelnde Detailfreude und weniger Raum auf.

5 Konstanz der Ergebnisse

Lautsprecherkabel interagieren sowohl mit dem Lautsprecher als auch mit dem Verstärker, somit verschieben sich subjektive Hörerlebnisse in unterschiedlichen Gerätekombinationen. Kabel mit den konstant geringsten Einflüssen auf die Wiedergabekette waren jene mit den geringsten Induktivitäten, Kapazitäten, und Widerständen. Hohe Kabelkapazitäten sollten vermieden werden, da dies zu Instabilitäten des Verstärkers führen kann, was sowohl auf die Klangqualität als auch auf die Betriebssicherheit Einfluss hat.

6 Richtungsbindung

Gegen den Trend, Lautsprecherkabel lafrichtungsgebunden zu kennzeichnen, wurde kein Hinweis gefunden, was dies unterstützt. Es konnte aber festgestellt werden, dass das unterschiedliche Verlegen von Kabeln die Kapazität und Induktivität beeinflusst.

7 Solid Core gegen Litze

Die Verbreitung von Solid-Core-Kabeln hat mit der Begründung zugenommen, dass dünne Leiter geringere Welligkeiten über den Frequenzverlauf aufweisen als Litzenkabel. Die Ergebnisse zeigen aber, dass viel mehr die Isolation und die Geometrie mancher Solid-Cores für das Klangergebnis verantwortlich ist als die Tatsache, dass sie aus einer massiven Einzelader bestehen.

8 Metallurgie

Die elektrische Leitfähigkeit ist geringfügig besser bei hochreinem Kupfer (99,99 %). Eine deutlichere Verbesserung zeigen versilberte Kupferkabel und Reinsilberkabel. Dennoch sind klangliche Unterschiede von Kabeln deutlich eher in Abhängigkeit von ihrer Geometrie und vom Isolator als vom verwendeten Leitermaterial auszumachen.

GENESIS – DAS ERGEBNIS

Wie zusammenfassend in 1, 2, 3, 4, und 5 erwähnt, weist die Mehrzahl der gut klingenden Lautsprecherkabel geringen DC-Widerstand, geringe Induktivität und Kapazität auf, verbunden mit geringen Verlusten durch das Dielektrikum.

Alle unsere Forschungsergebnisse lassen sich auf diese einfache Schlussfolgerung zurückführen: Leiter mit geringen Querschnitten zur Vermeidung des Skin-Effekts (wie wir wissen, ohne Bedeutung im Audio-Frequenzbereich) führen durch höheren DC-Widerstand zu unerwünschten Klangverfälschungen.

Als ein Ergebnis der Genesis-Forschung haben die QED-Ingenieure mit der alten Regel der Induktivität-/Kapazität-Relation gebrochen. Kapazität und dielektrische Verluste wurden durch die Wahl eines hochwertigen Dielektrikums (Polyethylen geringer Dichte) reduziert. Zusätzliche Verbesserungen wurden durch die Minimierung der Isolationsdicke und -struktur (unter Beibehaltung einer hohen mechanischen Belastbarkeit) erreicht, womit das Verhältnis Luft zu Dielektrikum optimiert wurde, was zu einer weiteren Reduktion der Kapazität und dielektrischen Verlusten geführt hat.

Mit der optimalen Anordnung mehrerer paralleler Multi-Litzenleiter (PROFILE-Serie) hat QED erreicht, sowohl die Induktivität als auch die Kapazität unter die Werte für ein vergleichbares Zwillingslitzenkabel gleichen DC-Widerstandes zu reduzieren. Die Verwendung von mehradrigen Litzen mit guter Querschnittsfläche sorgt für geringen Gleichstromwiderstand. Das Ergebnis ist eine Reihe von transparent klingenden Kabeln mit niedrigsten Verlusten und exzellenter Klangqualität.

Die Bedeutung der Isolation für die Klangqualität hat auch die Entwicklung der QUNEX-Cinchverbindungskabel beeinflusst, wobei hier ebenfalls geschäumtes Polyethylen geringer Dichte als Dielektrikum Verwendung findet.