

Unsymmetrische und symmetrische Leitungsführung in der analogen Audiotechnik

**Aus- und Eingangsstufen, Störanfälligkeit und
Verbindungsmöglichkeiten**

**Bachelorarbeit
verfasst von**

Marius Förster

Technische Universität Graz
Institut für Breitbandkommunikation

Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Kubin

Betreuer: Dipl.-Ing. Thorsten Rohde

Graz, im Januar 2009

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	1
---------------------------	---

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	3
2 Störspannungen und ihre Ursachen	4
3 Unsymmetrische Audiointerfaces	6
3.1 Eingangs- und Ausgangsstufen und ihre Verbindung	6
3.2 Störspannungen	7
3.2.1 Lösungen	9
3.3 Kabel	11
4 Symmetrische Audiointerfaces	13
4.1 Symmetrische Leitungen	13
4.1.1 Symmetrische Leitunsführung als Wheatstone-Brücke . .	14
4.2 Eingangs- und Ausgangsstufen	15
4.3 Kabel	18
5 Verbindungsmöglichkeiten zwischen unsymmetrisch und symmetrisch	21
5.1 Unsymmetrisch-zu-symmetrisch Interfaces	21
5.2 Symmetrisch-zu-unsymmetrisch Interfaces	23
5.3 DI-Box	24
6 Zusammenfassung	29

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Übertragung analoger Audiosignale zwischen zwei Geräten und die Störungen, die dabei auftreten können. Dafür ist es wichtig, die Gesamtheit aus Eingangs- und Ausgangsstufe von Empfänger und Sender und der Leitung dazwischen zu betrachten. Es gibt zwei Konzepte der Leitungsführung:

- unsymmetrisch und
- symmetrisch.

Diese sind durch ihre Impedanzen gegenüber Masse definiert (s. Kapitel 3 und 4).

Ein sehr wichtiges Qualitätsmerkmal bei der Übertragung ist die Empfindlichkeit gegenüber Störspannungen. Diese können entstehen durch:

- Einstreuungen infolge elektrische Felder
- Einstreuungen infolge magnetischer Felder
- Potentialdifferenzen zwischen den geräteinternen Massen zweier Audiogeräte.

Störspannungen können die Übertragung des Audiosignals unterschiedlich stark beeinträchtigen, je nach Leitungsführung.

Bei symmetrischer Ausführung der Leitung (und Eingangs- und Ausgangsstufen) (s. Kapitel 4) ist die Empfindlichkeit gegenüber Störungen wesentlich geringer als bei unsymmetrischer Ausführung (s. Kapitel 3). Dagegen ist die unsymmetrische Leitungsführung kostengünstiger und wird daher im Consumer-Bereich verwendet. Darüberhinaus ist die Leitungsführung innerhalb von Audiogeräten (auch in professionellen) oft unsymmetrisch aufgebaut, da dies sowohl platzsparender und wirtschaftlicher als auch qualitativ problemlos möglich ist.

In Kapitel 5 werden Verbindungsmöglichkeiten unsymmetrischer mit symmetrischen Geräten, sowohl in der Richtung unsymmetrisch zu symmetrisch als auch symmetrisch zu unsymmetrisch, aufgezeigt. Das folgende Kapitel 2 beschäftigt sich mit der Entstehung von Störspannungen zwischen zwei Geräten.

2 Störspannungen und ihre Ursachen

Bei der Verbindung zweier Audiogeräte treten immer mehr oder weniger stark ausgeprägte Störspannungen auf. Diese haben unterschiedliche Ursachen. Eine Möglichkeit sind Einstreuungen auf das Kabel zwischen beiden Geräten infolge elektrischer oder magnetischer Felder. Elektrische Felder können wirkungsvoll abgeschirmt werden (s. Kapitel 3.3), Einstreuungen durch magnetische Felder werden jedoch nur bei symmetrischer Leitungsführung unterdrückt (s. Kapitel 4.3). Doch selbst wenn keine Einstreuungen externer Quellen vorhanden sind, treten Störspannungen auf, welche sich durch Brummen und hochfrequente Geräusche äußern können.

Das grundsätzliche Problem besteht darin, dass die Masse in einem Gerät praktisch immer auf einem (geringfügig) anderen Potential liegt als die Masse in einem zweiten Gerät. Diese Spannungsdifferenzen können somit das zu übertragende Audiosignal „verschmutzen“. Sie kommen dadurch zustande, dass in allen Arten von Geräten immer parasitäre Kapazitäten zwischen der Netzleitung und der geräteinternen (Signal-) Masse (Internal Ground) existieren (s. Abbildung 1). Diese Kapazitäten bauen sich zwischen den Windungen des Netz-Transformators auf und ermöglichen somit einen kleinen (Wechsel-) Stromfluss zwischen der Netzleitung und der geräteinternen Masse bzw. dem Gehäuse. Im Vergleich zu

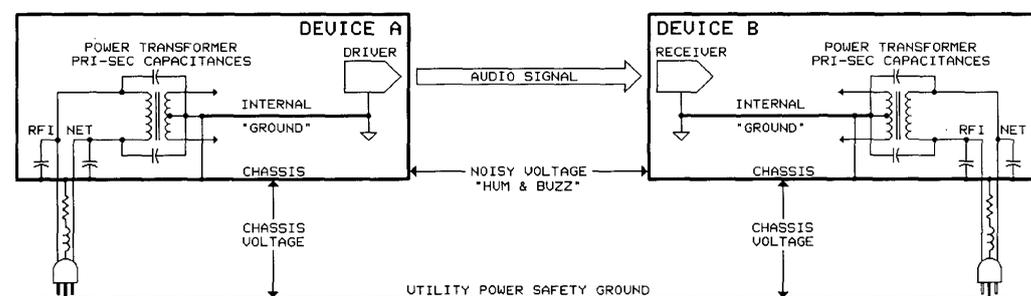


Abbildung 1: Die Entstehung von Störspannungen [6].

einer externen Masse, z.B. zur Schutzerde, besitzt das Gehäuse also eine Wechselspannung. Bei Geräten ohne Schutzleiter können diese Spannungen relativ hoch sein (über 50 V). Da die resultierenden Ströme aber sehr klein sind, besteht keine Gefahr für den Menschen. Die Spannungen können aber, je nach Art der Leitungsführung, zu beträchtlichen Störungen führen. Bei Geräten mit Schutzleiter sind die Spannungen gegenüber einer externen Masse geringer. Da jedoch auch der Schutzleiter eine gewisse Impedanz besitzt, bleibt eine kleine Spannung zwischen Gehäuse und externer Masse bestehen [6], [9].

Ein zweites Gerät wird immer ein anderes internes Massepotential haben. Der

Grund dafür ist, dass jedes Stromnetz aufgrund der Impedanz der Schutz Erde kleine Potentialdifferenzen zwischen den einzelnen Anschlusspunkten im Netz aufweist. Diese reichen von einigen Millivolt, bei nah beieinander und auf dem gleichen Zweig gelegenen Anschlüssen, bis hin zu einigen Volt bei weit auseinander gelegenen Anschlüssen auf verschiedenen Zweigen. Somit bekommt das Gehäuse des zweiten Audiogerätes ein anderes Potential als das Gehäuse des ersten. Selbst wenn beide Audiogeräte an der gleichen Stelle im Stromnetz angeschlossen sind, kommt es mit großer Wahrscheinlichkeit aufgrund unterschiedlicher parasitärer Kapazitäten, zu unterschiedlichen Massepotentialen der beiden Gehäuse [6], [9].

Sind nun die Gehäuse beider Audiogeräte durch Audiokabel verbunden, so fließen, bedingt durch unterschiedliche Massepotentiale, Ausgleichsströme. Je nach Übertragungsart (symmetrisch oder unsymmetrisch) können daraus Störgeräusche resultieren, welche sich aus der Netzfrequenz (50 Hz in Europa und 60 Hz in Amerika) und höherfrequenten Rauschteilen zusammensetzen. Die höherfrequenten Anteile in der Netzspannung (und damit auch in der Störspannung zwischen den Geräten) entstehen durch andere Lasten am Stromnetz, z.B. durch Lichtdimmer, die nur sehr kurzzeitig und plötzlich Strom ziehen. Abbildung 2 zeigt das Spektrum eines (Rausch-) Stroms, der über eine parasitäre Kapazität von 3 nF fließt [6], [9].

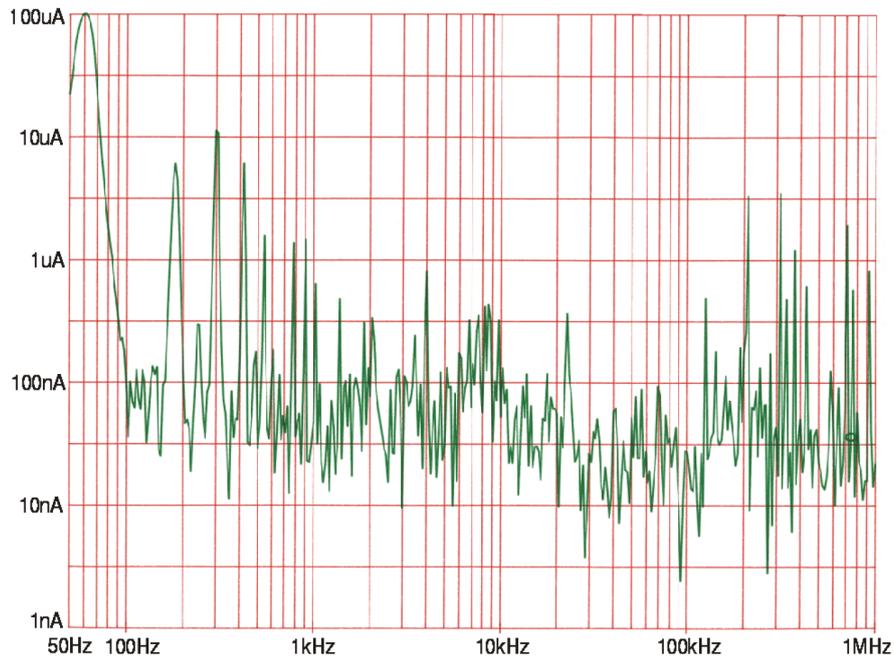


Abbildung 2: Spektrum des Stroms über eine parasitäre Kapazität von 3 nF: 60 Hz-Brummen und höherfrequenten Rauschen [9].

3 Unsymmetrische Audiointerfaces

Die einfachste Möglichkeit, zwei Audiogeräte miteinander zu verbinden, ist die unsymmetrische Verkabelung. Eine unsymmetrische Leitung besteht aus einer signalführenden Ader und einem Schirm, der diese umgibt und die (nicht exakt gleichen) Massepotentiale der beiden Geräte (s. Kapitel 2) miteinander verbindet. Diese Art der Signalführung ist vor allem im Consumer-Bereich sehr verbreitet. Auch innerhalb professioneller Audiogeräte werden Schaltungen unsymmetrisch aufgebaut, da dies platzsparender, wirtschaftlicher und qualitativ ohne Probleme möglich ist [2], [3]. Im Folgenden werden unsymmetrische Ein- und Ausgangsstufen, ihre Verbindung, sowie die Empfindlichkeit gegenüber Störsignalen erklärt.

3.1 Eingangs- und Ausgangsstufen und ihre Verbindung

Ein signalübertragendes System, welches aus dem Ausgang eines Gerätes, einem verbindendem Kabel und dem Eingang eines weiteren Gerätes besteht, kann entweder erdsymmetrisch (kurz: symmetrisch) oder unsymmetrisch sein. Abbildung 3 zeigt ein unsymmetrisches System. Unsymmetrisch bedeutet dabei, dass die Impedanzen beider Leiter gegenüber Masse nicht gleich groß sind. Der englische Begriff dafür ist „unbalanced“. Bei symmetrischer Leitungsführung hingegen haben beide Leiter zusammen mit ihren jeweiligen Anschlüssen an Ausgang und Eingang die gleiche Impedanz gegenüber Masse (s. Kapitel 4.1). Dies wird im Englischen mit „balanced“ bezeichnet. Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, ist bei unsymmetrischer Leitungsführung ein Leiter geerdet, d.h. seine Impedanz gegenüber Masse ist null, während der andere Leiter eine höhere Impedanz gegenüber Masse hat. Die Ausgangsimpedanz von Gerät A wird mit Z_o bezeichnet und die

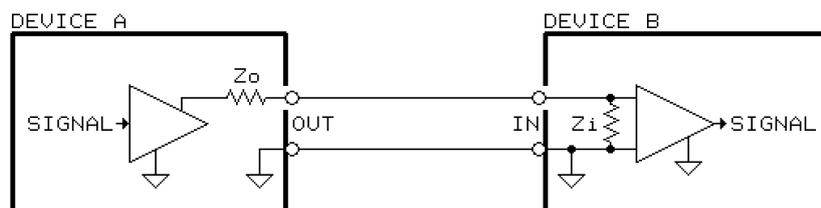


Abbildung 3: Verbindung zweier unsymmetrischer Interfaces [9].

Eingangsimpedanz von Gerät B heißt Z_i . Durch die Verbindung beider Geräte sind Z_o und Z_i in Serie geschaltet und ergeben somit einen Spannungsteiler. Um nun die maximale Spannung zu übertragen, muss Z_i viel größer als Z_o sein. Typischerweise sind die Werte für Z_o zwischen $100\ \Omega$ und $1\ \text{k}\Omega$ und die Werte für

Z_i zwischen $10\text{ k}\Omega$ und $100\text{ k}\Omega$. Es werden somit zwischen 90 % und 99,9 % der Signalspannung übertragen [9].

Eine typische unsymmetrische Eingangsstufe ist in Abbildung 4 gezeigt. Der Operationsverstärker ist als nichtinvertierender Verstärker beschaltet. Der Eingangswiderstand der Schaltung ist im Wesentlichen durch R_L ($10\text{ k}\Omega$ bis $100\text{ k}\Omega$) bestimmt. In Abbildung 5 ist eine unsymmetrische Ausgangsstufe abgebildet. Für Consumer-Equipment und Musikinstrumente liegen gängige Werte für R_S zwischen $330\ \Omega$ und $1\text{ k}\Omega$ und für C_C zwischen $4,7\ \mu\text{F}$ und $47\ \mu\text{F}$. Im semi-professionellen Bereich befindet sich R_S meist im Bereich zwischen $47\ \Omega$ und $220\ \Omega$ und C_C zwischen $47\ \mu\text{F}$ und $220\ \mu\text{F}$ [7].

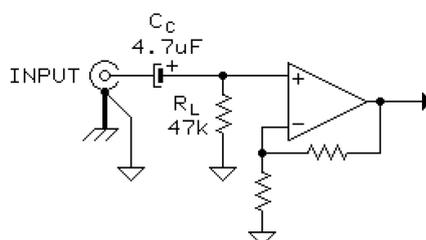


Abbildung 4: Eine typischer unsymmetrischer Eingang [7].

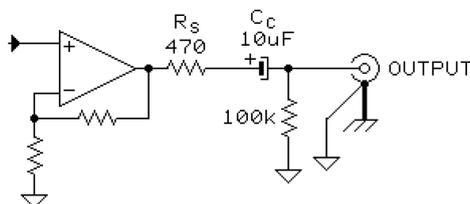


Abbildung 5: Eine typischer unsymmetrischer Ausgang [7].

3.2 Störspannungen

Wie in Kapitel 2 beschrieben, haben zwei Audiogeräte praktisch immer eine unterschiedliche Signalmasse. Durch die Verbindung des unsymmetrischen Ein- und Ausgangs mit Hilfe eines unsymmetrischen Kabels sind ihre Gehäuse über die Masseleitung (meist die Abschirmung) miteinander verbunden. Da diese Leitung immer einen Masseübergangswiderstand besitzt, kommt es zwangsläufig zu einem Spannungsabfall. Dieser wird direkt zur Signalspannung addiert und am Eingang des Empfängers mitverstärkt, da die Ausgangsimpedanz von Gerät A in Serie zur Eingangsimpedanz von Gerät B liegt (s. Abbildung 6, vgl. auch Abbildung 3). Es kommt somit zu Störgeräuschen [6], [9].

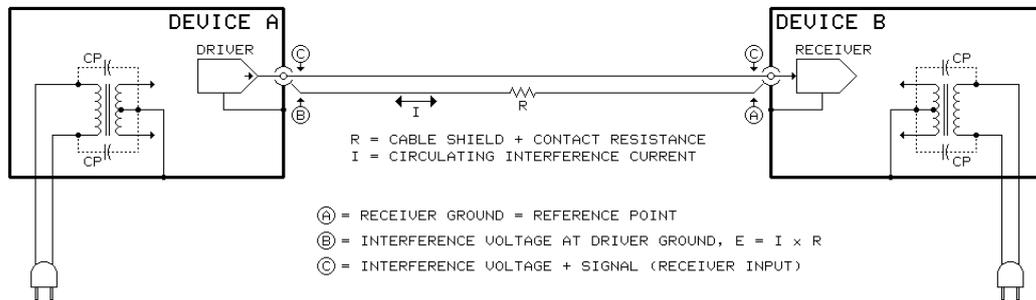


Abbildung 6: Der Bezugspunkt ist A. Am Punkt B herrscht aufgrund des Schirmwiderstandes R ein anderes Potential. Am Eingang des Empfängergerätes (Punkt C) liegt die Summe aus Signalspannung und Störspannung an [9].

Das folgende Rechenbeispiel soll das kurz veranschaulichen. Der Widerstand des masseführenden Schirmes betrage 1Ω und der Strom, der darauf fließt, $316 \mu\text{A}$. Der Widerstand des inneren Leiters ist vernachlässigbar. Daraus ergibt sich nach $R = U \cdot I$ eine Rauschspannung von $316 \mu\text{V}$. Da die Referenzspannung für -10 dBV im Consumer-Bereich 316 mV beträgt, folgt ein Störgeräuschpegel von $20 \cdot \log \frac{316 \mu\text{V}}{316 \text{ mV}} = -60 \text{ dB}$ relativ zum Signalpegel. Je kleiner also der Widerstand der Masseverbindung ist, desto geringer ist auch der Störgeräuschpegel [9].

Die Art der Störgeräusche hängt außerdem davon ab, ob die beiden Geräte geerdet sind. Ist dies der Fall, so wird eine Spannung, die über den Widerstand der gemeinsamen Schutz Erde (Ground Wire Resistance) zwischen den Netzanschlüssen der Geräte abfällt (s. Abbildung 7), über die Schirmung des Audiokabels auf das Audiosignal aufgeprägt. Die Spannung fällt also auch über den Masseübergangswiderstand der Schirmung des Audiokabels ab und wird somit

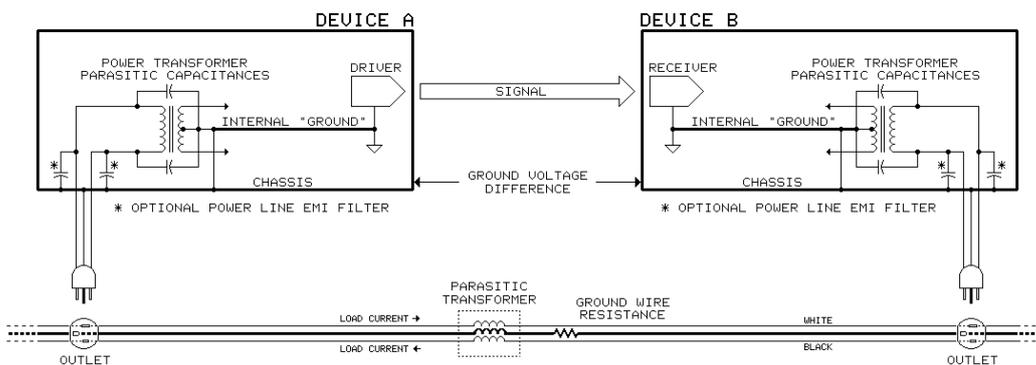


Abbildung 7: Spannungsdifferenzen zwischen den Geräten können durch den Widerstand des Schutzleiters verursacht werden [9].

zur Signalspannung addiert. Das Resultat ist eine Brummschleife. Sind die Geräte nicht geerdet, so sind die Störgeräusche eher hochfrequent, da sie über parasitäre Kapazitäten eingekoppelt werden [9].

3.2.1 Lösungen

Störgeräusche lassen sich mit Hilfe eines Übertragers unterdrücken, der zwischen beide Geräte geschaltet wird und diese somit galvanisch voneinander trennt. Die Windungszahlen der Primär- und Sekundärseite sind dabei gleich groß. So kann die Signalspannung, die als Differenzspannung zwischen den beiden Anschlüssen des Übertragers anliegt, ungehindert übertragen werden, während der Pfad für Störgeräusche aufgetrennt ist (s. Abbildung 8) [9].

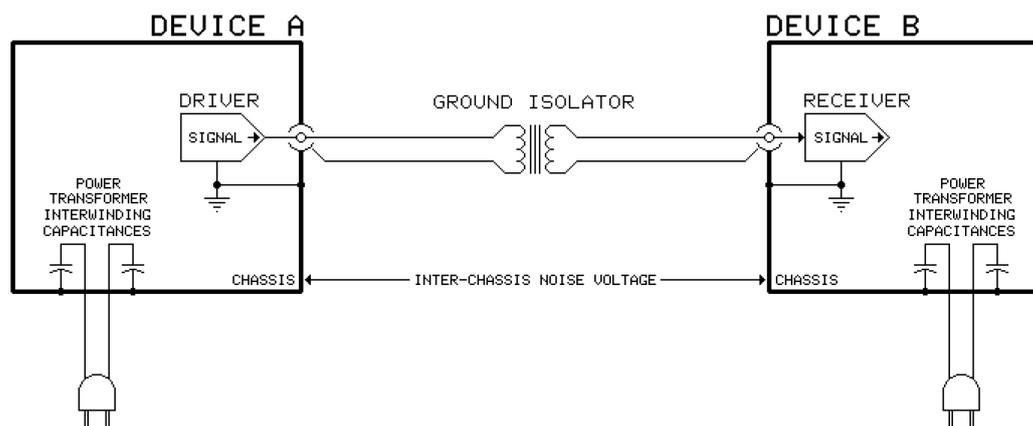


Abbildung 8: Ein Übertrager zur Unterbrechung der unsymmetrischen Leitung [9].

Theoretisch sind damit die Störspannungen eliminiert. Praktisch hängt die Störgeräuschunterdrückung allerdings von der Art des Übertragers ab. Dabei gibt es zwei Arten: Ausgangsübertrager und Eingangsübertrager. Beim Ausgangsübertrager sind die Windungen der Primär- und der Sekundärwicklung sehr dicht beieinander, sodass parasitäre Kapazitäten zwischen den Windungen einen Stromfluss zwischen beiden Seiten vor allem bei höheren Frequenzen ermöglichen. Somit werden auch wieder Störgeräusche übertragen. Bei den Eingangsübertragern werden die elektrischen Felder der Primär- und Sekundärwicklung voneinander abgeschirmt (Faraday). Dadurch kann die kapazitive Kopplung verhindert und so die Störgeräuschunterdrückung verbessert werden. Abbildung 9 zeigt die Störgeräuschunterdrückung für die Verbindung zweier unsymmetrischer Audiogeräte. Die obere Kurve zeigt die 0 dB-Unterdrückung ohne Übertrager, in der Mitte sieht man die bessere Unterdrückung, wenn ein Ausgangsübertrager zwischen die Ge-

räte geschaltet ist, und ganz unten ist die Störgeräuschunterdrückung dargestellt, wenn sich ein Eingangübertrager zwischen den Geräten befindet. Eingangübertrager haben also die beste Störgeräuschunterdrückung. Sie müssen allerdings möglichst dicht beim Eingang des Empfängers angeschlossen werden. Der Grund dafür ist, dass durch zu große Kabellängen am Ausgang eines Eingangübertragers die Kabelkapazität zu groß wird und dadurch die Übertragungseigenschaften für hohe Frequenzen verschlechtert werden. Ausgangsübertrager können hingegen an einer beliebigen Stelle im Signalweg angeschlossen werden [9].

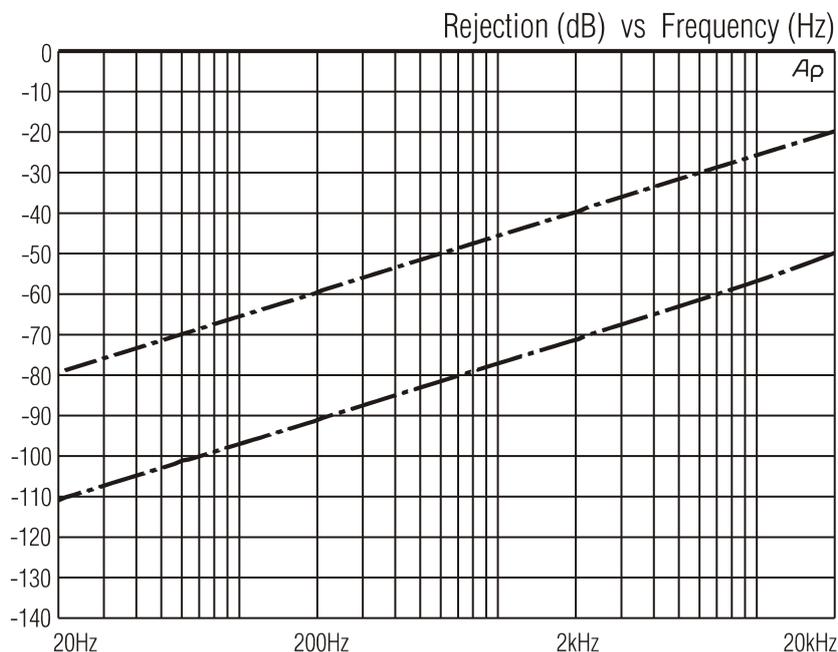


Abbildung 9: Störgeräuschunterdrückung bei der Verbindung zweier unsymmetrischer Geräte, ohne Übertrager (obere Kurve, 0 dB-Linie), mit Ausgangsübertrager (mittlere Kurve) und mit Eingangübertrager (untere Kurve). Die Ausgangsimpedanz von Gerät A beträgt 600Ω und die Eingangsimpedanz von Gerät B $50 \text{ k}\Omega$ [9].

Darüberhinaus gibt es auch aktive Interfaces zur Trennung zweier unsymmetrischer Geräte. Diese sind aus Differenzverstärkern aufgebaut, haben aber eine schlechtere Brumm- und Störgeräuschunterdrückung als die oben beschriebenen Übertrager [9].

Übrigens ist es nicht notwendig, die Leitung mit Hilfe eines unsymmetrisch-zu-symmetrisch Interfaces am Ausgang des Senders zu symmetrieren und am Eingang des Empfängers wieder entsprechend zu entsymmetrieren. Durch die Verwendung eines Eingangübertragers wird oftmals eine bessere Störgeräuschunter-

drückung erzielt [9].

3.3 Kabel

Jeder Leiter, der von Wechselstrom durchflossen wird, wird auch von einem elektrischen Wechselfeld umgeben. Die Stärke des Feldes nimmt mit der Entfernung ab. Audiokabel können durch Schirmung vor den Einstreuungen solcher Felder geschützt werden (s. Abbildung 10). Befindet sich ein Audiokabel in der Nähe eines anderen Kabels, so besteht eine Kapazität C_C zwischen den Leitern. Bei Spannungsänderungen zwischen ihnen, fließt ein Strom über C_C . Ohne Schirmung bewirkt dieser Strom ein Rauschen, welches sich direkt zum Audiosignal addiert. Bei vorhandener Schirmung fließt der Störstrom zur Masse der beiden Geräte ab. Je dichter die Schirmung, desto besser ist der Schutz gegen elektrische Felder [9].

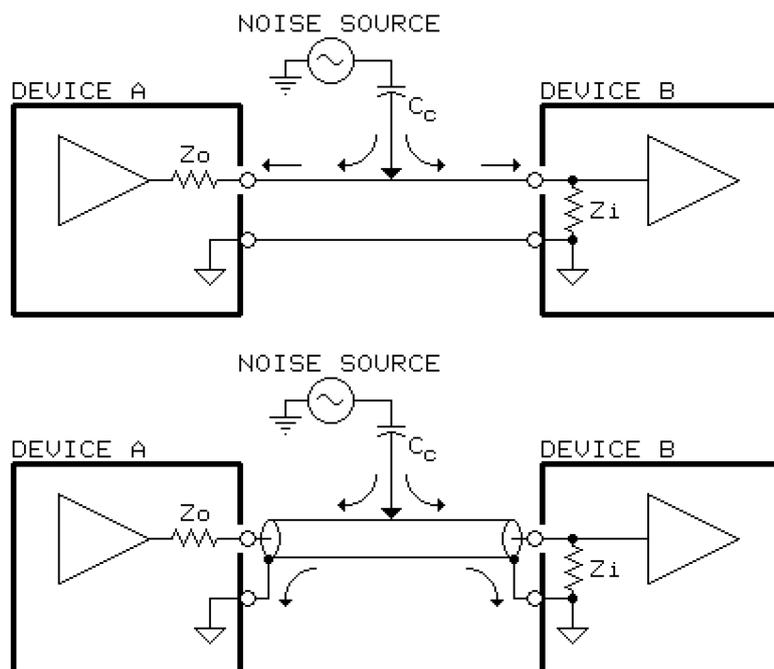


Abbildung 10: Einstreuungen infolge elektrischer Felder bei unsymmetrischer Leitungsführung mit und ohne Schirmung [9].

Zu beachten ist, dass auch eine Kapazität, welche mit der Kabellänge zunimmt, zwischen signalführender Ader und Masseleitung besteht. In Abbildung 11 ist zu sehen, dass die Ausgangsimpedanz Z_o von Gerät A mit der Kabelkapazität C einen Tiefpass bildet. Daraus folgt, dass sich bei hoher Ausgangsimpedanz

in Kombination mit einem langen Kabel oder einem Kabel mit hoher Kapazität das Übertragungsverhalten für hohe Frequenzen verschlechtern kann [9].

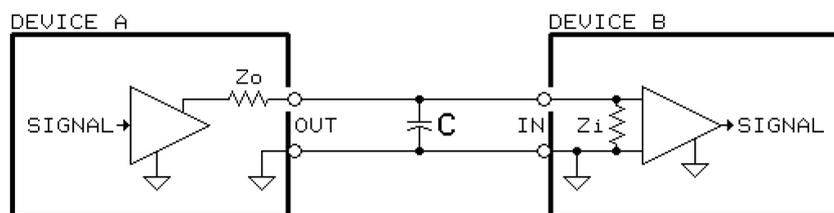


Abbildung 11: Die Kabelkapazität zwischen Tonader und Masseleitung bildet zusammen mit dem Ausgangswiderstand Z_o einen Tiefpass [9].

Des weiteren sind unsymmetrische Kabel empfindlich gegenüber magnetischen Wechselfeldern. Das Resultierende Rauschen kann nicht unterdrückt werden, was bei symmetrischer Kabelführung dagegen möglich ist [9].

Ein gutes unsymmetrisches Kabel sollte einen sehr geringen Schirmwiderstand und eine geringe Kapazität besitzen [9].

4 Symmetrische Audiointerfaces

4.1 Symmetrische Leitungen

Es wird unterschieden zwischen symmetrischen Signalen (engl. symmetrical) und symmetrischer Leitungsführung (engl. balanced). Symmetrische Signale haben die gleiche Amplitude aber mit einer Phasenverschiebung von 180° zueinander. Um Störspannungen zu unterdrücken, die durch unterschiedliche Signalmassen der Geräte oder durch magnetische oder elektrische Felder hervorgerufen werden können und im Gleichtakt auf beiden Tonadern vorhanden sind, ist Signalsymmetrie allerdings nicht notwendig. Sie dient der Auslöschung von kleinen Signalströmen, die sonst durch kapazitive Kopplung zwischen den Tonadern und der Schirmung in der Schirmung fließen würden [6].

Die Unterdrückung von Störspannungen geschieht durch symmetrische Leitungsführung. Dafür ist es notwendig, dass die Impedanzen beider Leiter gleich groß in Bezug auf Masse sind. Wichtig dabei ist, dass die Impedanz eines Leiters durch alles bestimmt ist, was an diesen Leiter angeschlossen ist. Das beinhaltet somit die Ausgangsstufe, das Kabel selbst und die Eingangsstufe (s. Abbildung 12). Dadurch sind Störspannungen auf beiden Leitungen gleich stark vorhanden. Der Eingang von Gerät B besteht aus einem Differenzverstärker, der nur die zwischen seinen beiden Eingängen liegende Differenzspannung verstärkt und Störspannungen, die im Gleichtakt an beiden Eingängen liegen, unterdrückt [6].

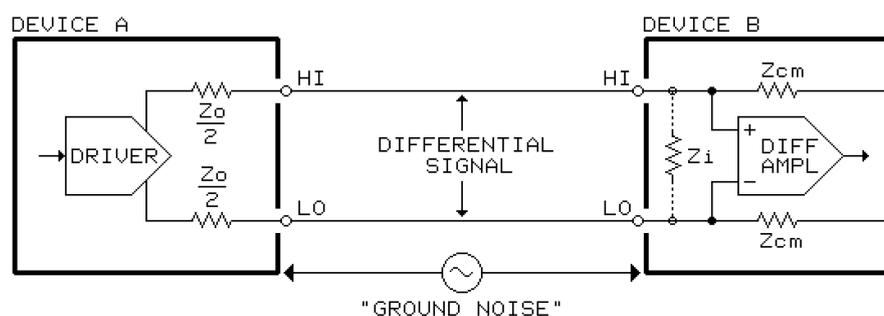


Abbildung 12: Symmetrische Leitungsführung: die Impedanzen beider Leiter, sowie die Ausgangsimpedanzen von Gerät A und die Eingangsimpedanzen von Gerät B müssen jeweils gleich groß gegenüber Masse sein, um Gleichtaktstörspannungen vollständig zu unterdrücken [9].

Wie gut das funktioniert, wird durch die sogenannte Gleichtaktunterdrückung CMRR (engl. common-mode rejection ratio) beschrieben. Sie ist das Verhältnis zwischen der Verstärkung des Differenzsignals A_D und der Verstärkung des

Gleichtaktsignals A_{CM} und wird in dB angegeben (CM steht für common-mode) [1]:

$$CMRR = 20 \cdot \log \frac{A_D}{A_{CM}} . \quad (1)$$

Solange die Gleichtaktspannungen an den Eingängen einer perfekten Eingangsstufe exakt gleich groß sind, ist die Gleichtaktunterdrückung unendlich. Werden diese Spannungen in irgendeiner Weise ungleichmäßig gedämpft, so wird aus der Gleichtaktspannung teilweise eine Differenzspannung, die vom Differenzverstärker mitverstärkt wird. Die Gleichtaktunterdrückung verschlechtert sich somit [6].

4.1.1 Symmetrische Leitungsführung als Wheatstone-Brücke

Abbildung 13 zeigt die symmetrische Leitungsführung als Wheatstone-Brücke. Sie besteht aus einer Spannungsquelle, die die durch Einstreuungen und unterschiedliche Massepotentiale bedingte Störspannung repräsentiert, und zwei Zweigen, die Ausgangs- und Eingangsstufe (Sender und Empfänger) miteinander verbinden. Der Empfänger reagiert, wie oben beschrieben, nur auf Differenzspannungen zwischen den Leitern. Folgende Rechnung zeigt, dass, wenn die Brücke abgeglichen ist, Störspannungen komplett unterdrückt werden. Dabei sei U_{St} die Störspannung (Hum & Buzz), die im Gleichtakt auf beiden Leitungen zwischen Sender und Empfänger vorhanden ist. Z_{C1} und Z_{C2} sind die Gleichtaktausgangsimpedanzen und Z_{C3} und Z_{C4} sind die Gleichtakteingangsimpedanzen. Z_{OD} ist die Ausgangsimpedanz für das Differenzsignal und Z_{ID} ist die Differenzeingangsimpedanz. Es gilt:

$$U_{Z_{C3}} = U_{St} \frac{Z_{C3}}{Z_{C1} + Z_{C3}}$$

$$U_{Z_{C4}} = U_{St} \frac{Z_{C4}}{Z_{C2} + Z_{C4}} .$$

Für die Differenzspannung $U_{Z_{ID}}$ zwischen den zwei Leitern am Empfänger folgt:

$$U_{Z_{ID}} = U_{Z_{C3}} - U_{Z_{C4}} = U_{St} \left(\frac{Z_{C3}}{Z_{C1} + Z_{C3}} - \frac{Z_{C4}}{Z_{C2} + Z_{C4}} \right)$$

$$= U_{St} \frac{Z_{C2}Z_{C3} - Z_{C1}Z_{C4}}{(Z_{C1} + Z_{C3})(Z_{C2} + Z_{C4})} .$$

Die Abgleichbedingung lautet:

$$\frac{Z_{C1}}{Z_{C3}} = \frac{Z_{C2}}{Z_{C4}} \iff Z_{C1} \cdot Z_{C4} = Z_{C2} \cdot Z_{C3} . \quad (2)$$

Wenn $Z_{C1} = Z_{C2}$ und $Z_{C3} = Z_{C4}$ ist, sind die Impedanzen beider Leitungen gleich groß. Dann ist Gleichung (2) erfüllt und $U_{Z_{ID}} = 0$ bzw. liegt nur das zu übertragene Audiosignal am Differenzeingang an. Das bedeutet also, dass, wenn Ausgangsstufe, Kabel und Eingangsstufe komplett symmetrisch bezüglich ihrer Impedanzen sind, vorhandene Gleichtaktstörspannungen keine Spannungsdifferenz am Eingang des Differenzverstärkers hervorrufen und daher unterdrückt werden. Das heißt aber auch, dass bei Änderung einer Impedanz ein Teil der Gleichtaktspannung in eine Differenzspannung umgewandelt wird und somit vom Differenzverstärker auch verstärkt wird.

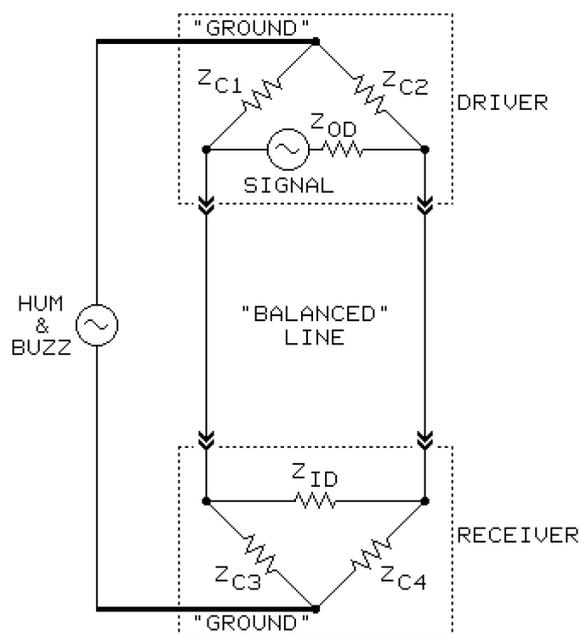


Abbildung 13: Symmetrische Leitungsführung als Wheatstone-Brücke [8].

Die Wheatstone-Brücke ist am empfindlichsten gegenüber Impedanzschwankungen, wenn alle Impedanzen gleich groß sind. Wenn die Impedanzen einer Seite, also der Senderseite oder der Empfängerseite, sehr groß sind und die anderen beiden Impedanzen klein sind, ist die Brücke am stabilsten. Da vom Sender zum Empfänger möglichst viel Spannung übertragen werden soll, müssen die Impedanzen des Senders klein und die des Empfängers groß sein [8].

4.2 Eingangs- und Ausgangsstufen

Die Leitungsführung innerhalb von Geräten ist unsymmetrisch aufgebaut. Da aber die Verbindungsleitungen zwischen den Geräten in der professionellen Tontechnik

symmetrisch sind, sind Symmetrierstufen an den Ein- und Ausgängen notwendig. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten, die Symmetrierung bzw. Entsymmetrierung zu realisieren: passiv mit Hilfe von Übertragern oder aktiv. Durch einen Übertrager am Ein- und Ausgang ergibt sich der Vorteil, dass beide Geräte galvanisch voneinander getrennt sind. Dies führt zu einer geringeren Empfindlichkeit gegenüber Störspannungen. Der Nachteil liegt wiederum in den hohen Kosten für Übertrager mit linearem Übertragungsverhalten und geringen nichtlinearen Verzerrungen [2]. Abbildung 14 zeigt die Verbindung zweier Geräte, die an ihrem Ein- bzw. Ausgang jeweils einen Übertrager haben.

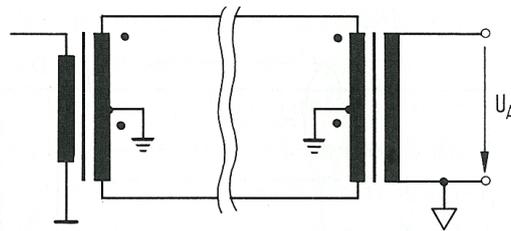


Abbildung 14: Prinzip der Verbindung zweier Audiogeräte, die an ihrem Ein- bzw. Ausgang jeweils einen Übertrager haben [5].

Abbildung 15 zeigt die symmetrische Leitungsführung mit einem Eingangsübertrager \ddot{U} , einer Signalquelle U_S mit dem Innenwiderstand R_i , welcher symmetrisch am Anfang der Leitung wirksam ist. Der Übertrager kann nur Signale mit unterschiedlicher Polarität, also Differenzsignale, zwischen den Punkten a und b übertragen. Störspannungen, die im Gleichtakt vorliegen, rufen keinen Stromfluss in der Primärwicklung hervor und werden deswegen nicht übertragen [4].

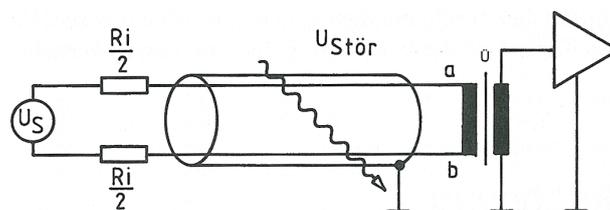


Abbildung 15: Die symmetrische Leitungsführung verhindert die Übertragung von Gleichtaktspannungen, da sie auf beiden Leitungen gleich stark vorhanden sind [4].

Aktive symmetrische Eingangsstufen bestehen hingegen aus Operationsverstärkern und einer sehr präzise abgestimmten Beschaltung aus Widerständen um algebraische Subtraktion der beiden Eingangssignale durchzuführen [6]. Es gibt verschiedene Schaltungsvarianten. Abbildung 16 zeigt einen Differenzverstärker,

der mit vier $10\text{ k}\Omega$ -Widerständen beschaltet ist. Die Widerstandswerte müssen sehr genau abgestimmt sein, um eine hohe Gleichtaktunterdrückung zu erreichen. Die Schaltung ist aber sehr empfindlich gegenüber Ungleichheiten der Ausgangsimpedanzen des Senders, was die Gleichtaktunterdrückung stark reduziert [7].

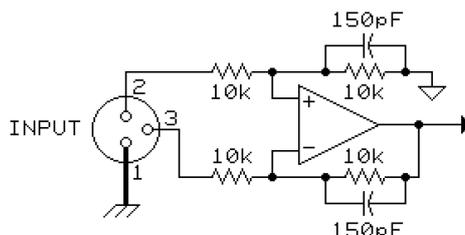


Abbildung 16: Ein typischer symmetrischer Eingang [7].

In Abbildung 17 kann man sehen, dass die Gleichtaktunterdrückung von Netzbrummen mit Übertrager-Eingangsstufen wesentlich besser funktioniert als mit aktiven Differenzverstärkerschaltungen. Je höher die Abweichung der Ausgangswiderstände des Senders ist, desto schlechter wird die Gleichtaktunterdrückung, vor allem bei aktiven Differenzverstärkerschaltungen [6].

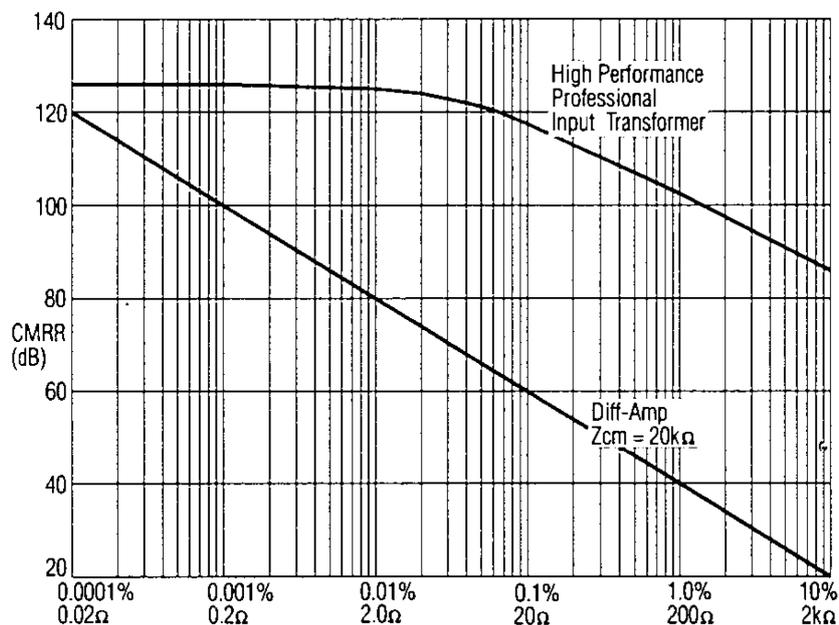


Abbildung 17: Vergleich der Gleichtaktunterdrückung von 60Hz-Brummen einer Übertrager-Eingangsstufe und eines aktiven Differenzverstärkereingangs für unterschiedliche Abweichungen der Ausgangswiderstände [6].

Symmetrische Ausgangsstufen können ebenfalls aus Operationsverstärkern aufgebaut sein, oder einen Übertrager am Ausgang haben. Sie liefern ein symmetrisches Signal und haben gleiche Ausgangsimpedanzen auf beiden Leitungen. Abbildung 18 zeigt einen symmetrischen Ausgang mit Operationsverstärkern. Werte für R_S und C_S befinden sich ungefähr im gleichen Bereich wie für semi-professionelles Equipment (s. Kapitel 3.1). Die Werte für die Ausgangsimpedanzen sollten möglichst genau übereinstimmen, da sie kritisch für die Gleichtaktunterdrückung der ganzen Übertragung sind, vor allem bei der Verbindung mit aktiven Eingangsstufen [6], [7].

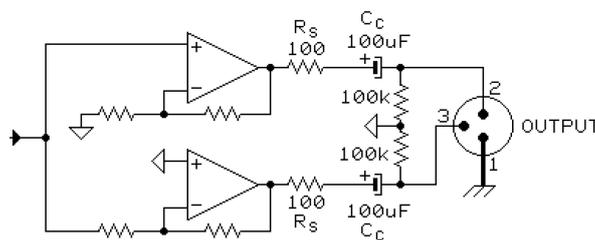


Abbildung 18: Eine typischer symmetrischer Ausgang [7].

Auch bei symmetrischer Leitungsführung kann, ebenso wie bei unsymmetrischer Leitungsführung, die Gleichtaktunterdrückung durch einen Übertrager zwischen Aus- und Eingangsstufe verbessert werden [9].

4.3 Kabel

Ähnlich wie bei unsymmetrischen Kabeln kann auch bei symmetrischer Leitungsführung durch kapazitive Kopplung Rauschen auf die Signalleiter eingestreut werden. Bei symmetrischer Leitungsführung werden theoretisch gleiche Spannungen auf den beiden symmetrischen Leitungen hervorgerufen. Da die Einstreuungen Gleichtaktspannungen sind, werden diese theoretisch vom Empfänger unterdrückt. In der Praxis ist diese Unterdrückung jedoch durch die Abstimmung sowohl der kapazitiven Kopplung beider Leiter zur einstreulenden Quelle als auch der Abstimmung der Leitungsimpedanzen begrenzt. Die Stärke der kapazitiven Kopplung kann durch Verdrillen des symmetrischen Leiterpaares angeglichen werden. Dadurch werden die Abstände beider Leiter zur Quelle des einstreulenden Feldes gemittelt. In jedem Fall kann das Problem der Einstreuungen durch eine geerdete Schirmung, welche die Rauschspannungen zur Masse ableitet, gelöst werden [9].

Jedoch kann die Verbindung der Schirmung mit der Masse die Gleichtaktunterdrückung beeinflussen. Typischerweise unterscheiden sich die Kabelkapazi-

täten zwischen jedem Leiter und der Schirmung um 4 bis 6 %. Wenn nun die Schirmung auf der Empfängerseite geerdet ist, bilden die Ausgangsimpedanzen des Senders zusammen mit den Kabelkapazitäten jeweils einen Tiefpass für Gleichtaktspannungen zwischen beiden Geräten (s. Abbildung 19). Die Ausgangsimpedanzen können ebenfalls um 5 % oder mehr voneinander abweichen. Folglich sind die beiden Tiefpassfilter nicht gleich, wodurch ein Teil der Gleichtaktspannung in eine Differenzspannung gewandelt wird, die wiederum von der Differenzeingangsstufe verstärkt wird. Dies kann dadurch verhindert werden, dass die Schirmung ausschließlich auf der Seite des Senders geerdet wird. Dadurch gibt es keine Gleichtaktspannung über die Kabelkapazitäten und somit auch keine Filter, weil alle Teile des Filters auf der gleichen Seite geerdet sind (s. Abbildung 20) [6], [9].

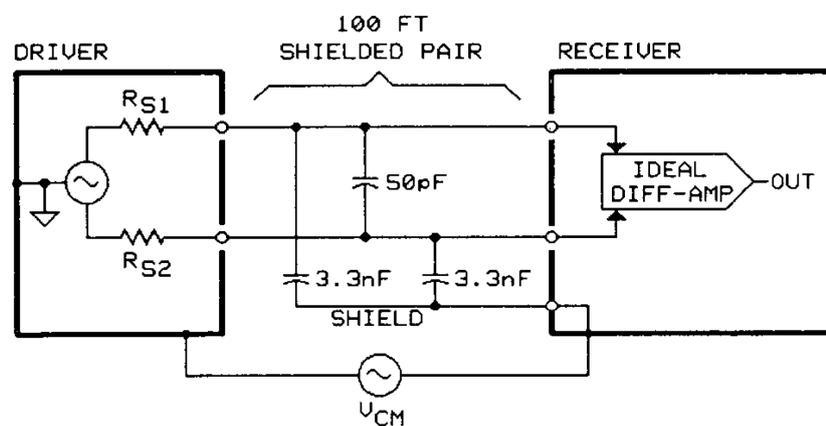


Abbildung 19: Die Schirmung nur auf der Empfängerseite mit Masse zu verbinden, ist ungünstig. Wenn R_{S1} nicht exakt gleich R_{S2} ist und die zwei 3,5 nF-Kabelkapazitäten nicht genau übereinstimmen liegt ein Teil der Gleichtaktspannung V_{CM} als Differenzspannung am Eingang an [6].

Wird der Schirm auf der Seite des Senders und des Empfängers geerdet, so ist der Vorteil, dass dadurch die Spannung selbst zwischen beiden Geräten reduziert werden kann. Andererseits kann die Unterdrückung derselben Spannung durch den Empfänger verschlechtert werden [6].

Wie schon in Kapitel 4.1 erwähnt, ist Signalsymmetrie nicht notwendig, um Gleichtaktspannungen zu unterdrücken. Von jedem Leiter fließen durch kapazitive Kopplung Signalströme auf den Schirm. Sind die Signale exakt symmetrisch zueinander und die Kapazitäten zwischen den Leitern und dem Schirm gleich groß, so heben sich die Signalströme, die sonst in den Schirm fließen würden, auf. In der Praxis jedoch gibt es immer entweder nicht komplett symmetrische Signale, oder ungleiche Kapazitäten zwischen Leitern und Schirm. Sofern das Kabel nur

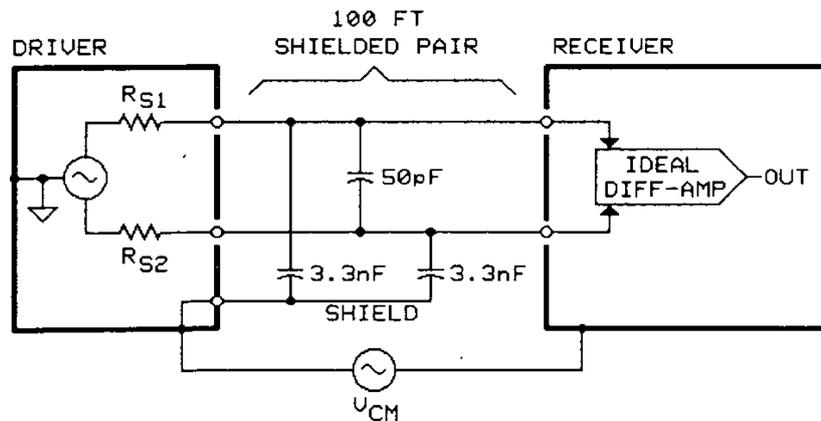


Abbildung 20: Wird die Schirmung nur auf der Senderseite mit Masse verbunden, so liegt keine Gleichtaktspannung über den Kapazitäten an. V_{CM} wird nicht durch ungleiche Tiefpassfilter in eine Differenzspannung gewandelt [6].

auf der Seite des Senders geerdet ist, fließen diese Ströme zurück zum Sender und haben dadurch praktisch keine Auswirkungen [6], [9].

Jeder Leiter, in dem hohe Wechselströme fließen, wird von einem starken magnetischen Wechselfeld umgeben, welches jedoch schnell mit der Entfernung abnimmt. Befindet sich in diesem magnetischen Wechselfeld ein Leiter (für Audioübertragung), so wird Spannung in ihn induziert. Bei perfekter symmetrischer Leitungsführung der Audioleitung mit perfekten Ein- und Ausgangsstufen würde auf beiden Leitern die gleiche Spannung induziert werden, wodurch es eine Gleichtaktspannung wäre, die komplett vom Empfänger unterdrückt werden würde. In der Praxis hängt die Unterdrückung der Einstreuungen jedoch davon ab, wie sehr sich die magnetischen Einstreuungen auf beiden Leitungen unterscheiden und wie gleich die Impedanzen beider Leitungen sind. Verdrillung des Leiterpaares bewirkt (bei gleichen Impedanzen beider Leitungen) fast komplette Unempfindlichkeit gegenüber magnetischen Feldern [9].

Es ist jedoch sehr schwierig magnetische Felder effektiv abzuschirmen. Dies ist nur mit magnetischem Material möglich, eine normale Schirmung schützt nicht. Übrigens wird auch ein magnetisches Feld von den kleinen Strömen im Schirm erzeugt [9].

5 Verbindungsmöglichkeiten zwischen unsymmetrisch und symmetrisch

Es gibt zwei mögliche Richtungen, wie unsymmetrische mit symmetrischen Geräten verbunden werden können: unsymmetrisch-zu-symmetrisch Interfaces und symmetrisch-zu-unsymmetrisch Interfaces.

5.1 Unsymmetrisch-zu-symmetrisch Interfaces

Die im Folgenden gezeigten Möglichkeiten, unsymmetrische Sender mit symmetrischen Empfängern zu verbinden, liefern nicht die Pegelanhebung um 12 dB, die eigentlich nötig ist, wenn Consumer-Equipment mit professionellem verbunden wird. Der Referenzpegel im Consumerbereich beträgt -10 dBV (316 mV RMS) und im professionellem Bereich $+4$ dBu (1,23 V RMS). Für die Pegelanhebung kann ein aktives Interface nötig sein [7].

Die einfachste Art der Verbindung ist ein Adapterkabel (s. Abbildung 21). Dadurch liegt am symmetrischen Eingang das Audiosignal der unsymmetrischen Ausgangsstufe an. Durch die unterschiedlichen Potentiale der beiden Gehäuse (s. Kapitel 2) fließen jedoch in der Schirmung Wechselströme. Die entsprechenden Störspannungen, die im Gleichtakt vorhanden sind, werden von der differentiellen Eingangsstufe theoretisch unterdrückt. Die Gleichtaktunterdrückung wird aber dadurch, dass die Ausgangsimpedanzen beider Leitungen (HI und LO) unterschiedlich sind (LO liegt auf Masse), stark verschlechtert und ist über den gesamten Frequenzbereich konstant (vgl. Abbildung 24) [7].

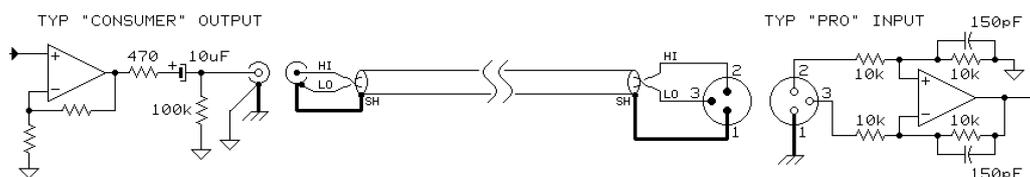


Abbildung 21: Die einfachste Möglichkeit, einen unsymmetrischen Ausgang mit einem symmetrischen Eingang zu verbinden, ist ein Adapterkabel [7].

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, einen Übertrager am Ausgang der unsymmetrischen Stufe („Ausgangsübertrager“) zu verwenden (s. Abbildung 22). Dadurch wird die Gleichtaktunterdrückung der aktiven, symmetrischen Eingangsstufe für tiefe Frequenzen (d.h. Brummen) verbessert. Für hohe Frequenzen (oberhalb von 1 kHz) fällt die Gleichtaktunterdrückung flach ab (s. Abbildung 24). Ge-

genüber der Verbindung mittels Adapterkabel ergibt sich also nur eine Verbesserung für tieffrequente Störspannungen [7], [9].

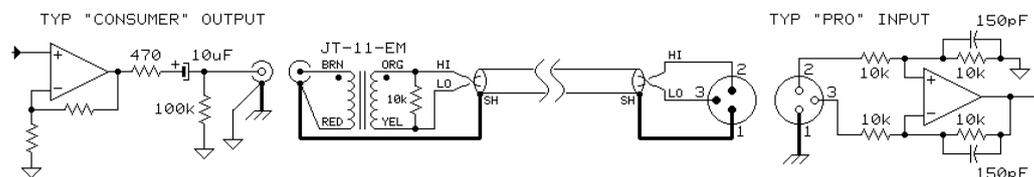


Abbildung 22: Verbindung von unsymmetrisch zu symmetrisch mit Hilfe eines Ausgangsübertragers [7].

Des Weiteren kann zur Verbindung einer unsymmetrischen Ausgangsstufe mit einer symmetrischen Eingangsstufe ein Übertrager vor dem Eingang („Eingangsübertrager“) verwendet werden (s. Abbildung 23). Dieser hat eine Faraday'sche Abschirmung zwischen den Windungen, was die kapazitive Kopplung zwischen ihnen verhindert. Dadurch werden Gleichtaktspannungen kaum noch übertragen, auch bei unterschiedlich großen Quellenwiderständen. In Abbildung 24 ist die Verbesserung der Gleichtaktunterdrückung gegenüber den beiden obigen Verbindungsmöglichkeiten deutlich zu sehen. Es werden damit sowohl Brummen, als auch hochfrequente Störgeräusche unterdrückt. Die Eingangsstufe wird durch die Erdung des negativen Eingangs und den Anschluss des positiven Eingangs an den Ausgang des Übertragers unsymmetrisch betrieben. Das Kabel zwischen Eingangsübertrager und Eingangsstufe muss daher kurz sein. Bei zu großen Kabellängen ist die kapazitive Belastung durch die Kabelkapazität zu groß und hohe Frequenzen werden somit gedämpft [7], [9].

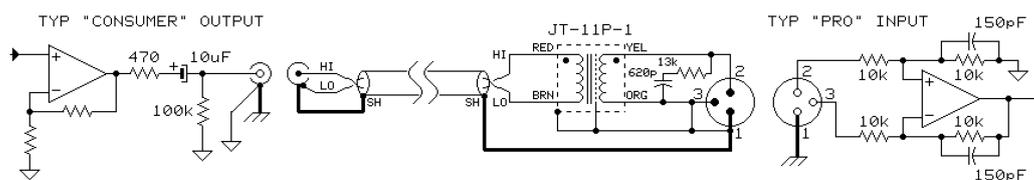


Abbildung 23: Verbindung von unsymmetrisch zu symmetrisch mit Hilfe eines Eingangsübertragers [7].

In Abbildung 24 wird die Gleichtaktunterdrückung der drei Verbindungsmöglichkeiten verglichen. Die Ausgangsimpedanz der unsymmetrischen Ausgangsstufe betrug bei den Messungen 600Ω . Die aktive symmetrische Eingangsstufe war ein Instrumentationsverstärker bestehend aus drei Operationsverstärkern. Die Gleichtakt-Eingangsimpedanz betrug $20 \text{ k}\Omega$ [9].

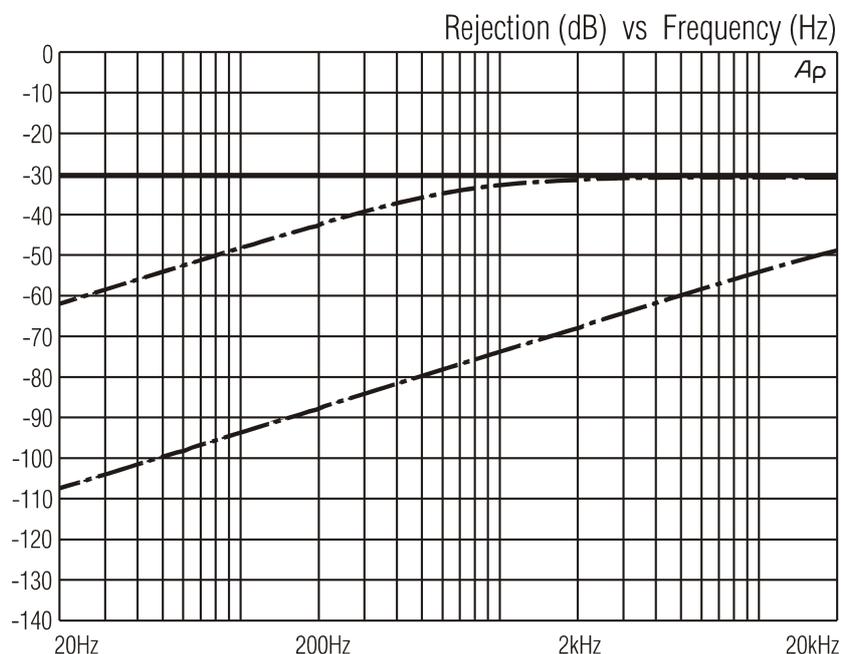


Abbildung 24: Gleichtaktunterdrückung für die Verbindung eines unsymmetrischen Ausgangs mit einer symmetrischen Eingangsstufe, wenn diese mit einem Adapterkabel (obere Kurve, -30 dB), einem Ausgangsübertrager (mittlere Kurve) oder einem Eingangsübertrager (untere Kurve) zusammenschaltet werden [9].

5.2 Symmetrisch-zu-unsymmetrisch Interfaces

Auch bei der Verbindung eines symmetrischen Ausgangs zu einem unsymmetrischen Eingang gibt es unterschiedliche Varianten. Dabei ist es nötig, den höheren Pegel professioneller Geräte um ca. 12 dB zu dämpfen, um Consumer-Geräte nicht zu übersteuern. Darüberhinaus sollen Störspannungen, die durch unterschiedliche Massepotentiale immer vorhanden sind, möglichst gut unterdrückt werden. Die direkte Verbindung mit Hilfe eines Adapters oder Adapterkabels ergibt keine Unterdrückung von Störspannungen (s. Abbildung 27) [9].

Eine Möglichkeit besteht darin, einen Ausgangsübertrager zusammen mit einem Dämpfungsglied zu verwenden (s. Abbildung 25). Die Gleichtaktunterdrückung nimmt jedoch mit 6 dB pro Oktave ab, sodass zwar Brummen effektiv unterdrückt wird, hochfrequenten Rauschen allerdings nicht (vgl. Abbildung 27). Durch parasitäre Kapazitäten des Übertragers werden bei hohen Frequenzen auch Gleichtaktspannungen übertragen. Somit wird die Leitung bei hohen Frequenzen unsymmetrisch. Die Dämpfung des Signals um 12 dB wird durch das aus zwei Widerständen bestehende Dämpfungsglied bewirkt [7].

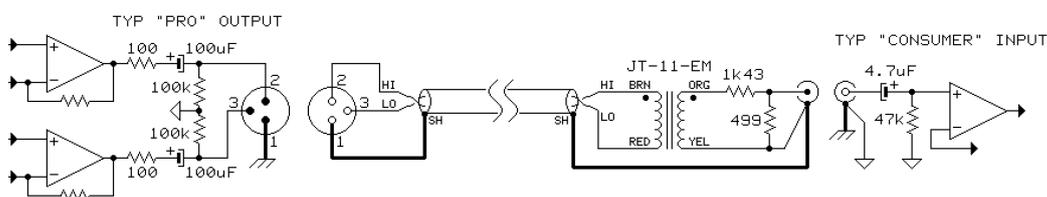


Abbildung 25: Verbindung von symmetrisch zu unsymmetrisch mit Hilfe eines Ausgangsübertragers [7].

Eine bessere Variante besteht darin, einen Eingangsübertrager mit einem Wicklungsverhältnis der Primär- zur Sekundärseite von 4:1 zu verwenden. Dadurch wird das Signal im gleichen Verhältnis gedämpft. Bei der in Abbildung 26 gezeigten Schaltung werden sowohl Netzbrummen als auch hochfrequente Verzerrungen unterdrückt (vgl. Abbildung 27). Der Übertrager muss, wie in Abbildung 26 gezeigt, direkt vor den Eingang geschaltet werden, um kapazitive Lasten von zu langen Kabeln zu reduzieren [7].

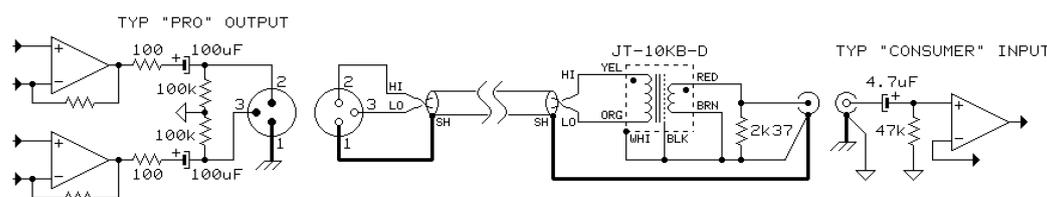


Abbildung 26: Verbindung von symmetrisch zu unsymmetrisch mit Hilfe eines Eingangsübertragers [7].

In Abbildung 27 wird die Gleichtaktunterdrückung der drei Verbindungsmöglichkeiten verglichen. Die differentielle Ausgangsimpedanz der symmetrischen Ausgangsstufe betrug bei den Messungen $600\ \Omega$ und die Gleichtakt-Ausgangsimpedanzen betragen $300\ \Omega$. Die unsymmetrische Eingangsstufe hatte eine Eingangsimpedanz von $50\ \text{k}\Omega$ [1].

5.3 DI-Box

Eine DI-Box (Direct-Injection-Box) hat einen unsymmetrischen Eingang mit hoher Impedanz. Der symmetrische Ausgang wird mit dem Mikrofoneingang (niedriger Pegel, niedrige Impedanz) eines Mischpultes verbunden. Meist werden DI-Boxen für E-Gitarren, Synthesizer oder andere Bühneninstrumente verwendet [1]. Eine DI-Box besteht im Wesentlichen aus einem Übertrager. Die Abschirmung bzw. Masseleitung kann meistens durch einen Ground/Lift-Schalter unterbrochen

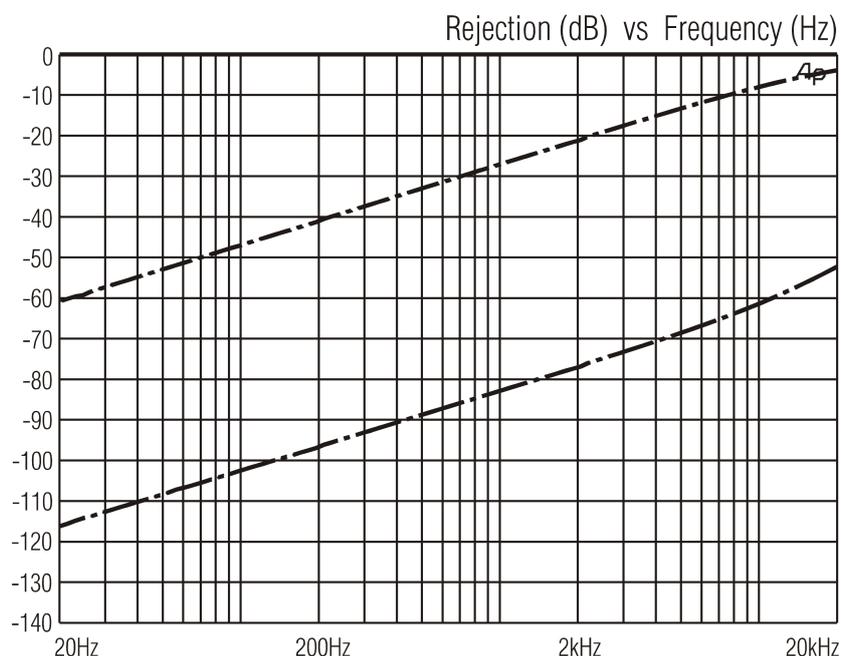


Abbildung 27: Gleichtaktunterdrückung für die Verbindung eines symmetrischen Ausgangs mit einer unsymmetrischen Eingangsstufe, wenn diese mit einem Adapterkabel (obere Kurve, 0 dB), einem Ausgangsübertrager (mittlere Kurve) oder einem Eingangsübertrager (untere Kurve) zusammenschaltet werden [9].

werden. Um bestmögliche Anpassung an den Pegel der Quelle zu gewährleisten, gibt es in der Regel Abschwächer oder unterschiedliche Eingänge. Es gibt passive DI-Boxen ohne Verstärker (s. Abbildung 28 und 29) und aktive DI-Boxen (s. Abbildung 30). Aktive DI-Boxen haben einen integrierten Verstärker, der mit einer Batterie oder durch die Phantomspeisung des Mischpultes mit Spannung versorgt wird. Meistens gibt es zusätzlich zum Ausgang, der an einen Mikrofonvorverstärker angeschlossen wird, auch einen Ausgang für den Anschluss an einen Instrumentenverstärker [3].

Die Impedanzen werden durch einen Übertrager, also auch durch eine DI-Box, mit dem Quadrat des Windungszahlverhältnisses gewandelt. Wenn das Verhältnis der Windungszahlen von Primär- zu Sekundärwicklung 12:1 beträgt, so werden die Impedanzen mit 144:1 gewandelt. Ein typischer Mikrofoneingang eines Mischpultes hat eine Eingangsimpedanz von $1,5 \text{ k}\Omega$. Somit beträgt die Eingangsimpedanz der DI-Box ca. $144 \cdot 1,5 \text{ k}\Omega = 216 \text{ k}\Omega$. Das Instrument am Eingang der DI-Box „sieht“ somit eine hohe Eingangsimpedanz. Entsprechend ist die Ausgangsimpedanz aufgrund des umgekehrten Verhältnisses klein [1].

Mögliche Anwendung einer DI-Box:

Eine E-Gitarre kann mit Hilfe einer DI-Box direkt an den Mikrofoneingang eines Mischpultes angeschlossen werden. Es erfolgt eine Symmetrierung der Leitung und eine Anpassung des Pegels und der Impedanz (s. oben) an den Mikrofonverstärker des Mischpultes. Zusätzlich kann das Signal in der DI-Box aufgesplittet werden, sodass es auch am unsymmetrischen Ausgang der DI-Box abgegriffen werden kann, um es über den Instrumentenverstärker auf der Bühne verstärken zu können [3].

Abbildung 28 zeigt ein einfaches Schaltbild einer passiven DI-Box. Die „AC coupling option“ dient der Entkopplung von Gleichspannungen. Mit „Output pad option“ ist die Schaltung eines Dämpfungsgliedes gemeint, welches z.B. bei sehr starken Eingangssignalen verwendet werden sollte. Der Pegel des Ausgangssignals ist bei dieser Schaltung 23 dB geringer als der Eingangspegel, mit Dämpfungsglied ist er um 37 dB geringer. Das Kabel am Ausgang der DI-Box sollte keine Verbindung zwischen Pin-1 und dem Gehäuse herstellen, da sonst der Ground Lift-Schalter zur Trennung der Massepotentiale keine Verwendung mehr hat [10].

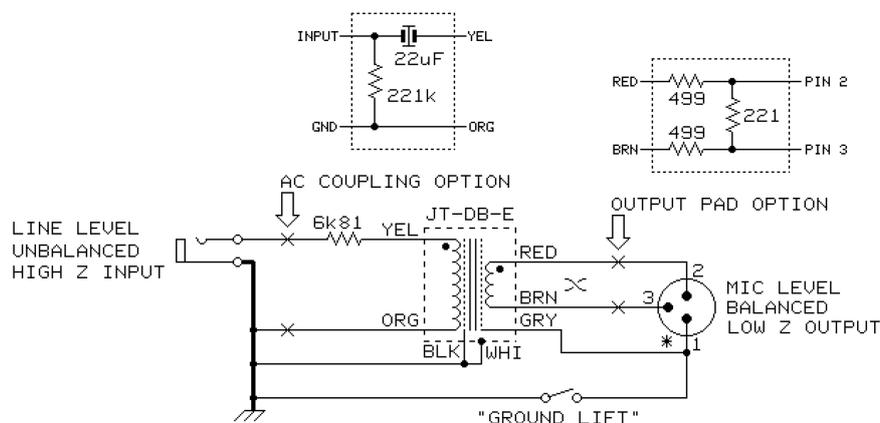


Abbildung 28: Eine passive DI-Box für Musikinstrumente oder Synthesizer [10].

Abbildung 29 zeigt das Schaltbild einer weiteren passiven DI-Box. Mit den Schaltern $S1a$ und $S1b$ besteht die Möglichkeit ein Dämpfungsglied einzuschalten. Ist der Schalter $S2$ nach oben gekippt, beträgt die Dämpfung -10 dB, in der unteren Stellung beträgt sie -20 dB. Sie sollte für Quellen mit hohem Pegel, z.B. Synthesizer oder Gitarrenverstärkerausgänge, generell aktiviert sein [11]. Bei eingeschalteter Dämpfung kann das Signal über den Kondensator $C3$ zusätzlich Tiefpass-gefiltert werden ($S3$ auf *on*). Das RC-Netzwerk aus $R5$ und $C4$ dient der Unterdrückung von Einstreuungen hochfrequenter (kHz- und MHz-Bereich) elek-

romagnetischer Wellen. Durch den GND/Lift-Schalter kann, auf gleiche Weise wie in Abbildung 28, die Masseleitung der Ein- und Ausgangsseite voneinander getrennt werden. Außerdem besteht bei dieser DI-Box die Möglichkeit, das Eingangssignal zusätzlich unverändert an *J2* abzugreifen.

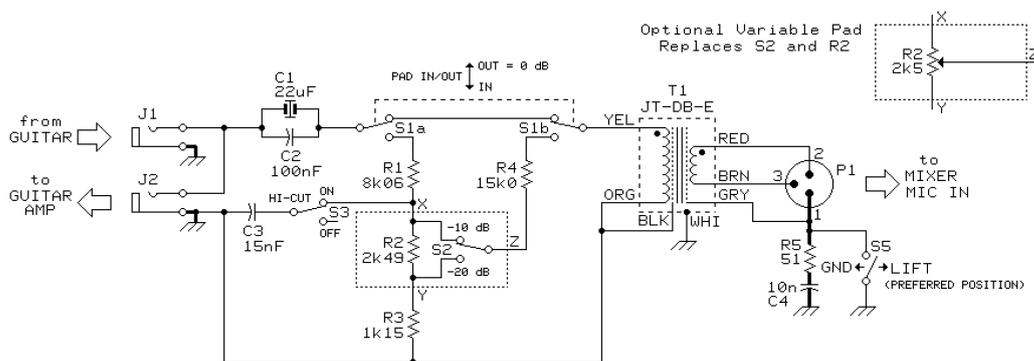


Abbildung 29: Eine passive DI-Box [11].

In Abbildung 30 ist eine aktive DI-Box mit 48V-Spannungsversorgung aus der Phantomspeisung dargestellt. Sie besteht im Wesentlichen wieder aus einem Übertrager. Vor diesen ist ein Verstärker geschaltet. Es gibt einen symmetrischen Ausgang für den Anschluss an einen Mikrofonverstärker und einen unsymmetrischen Ausgang für den Anschluss an einen Musikverstärker.

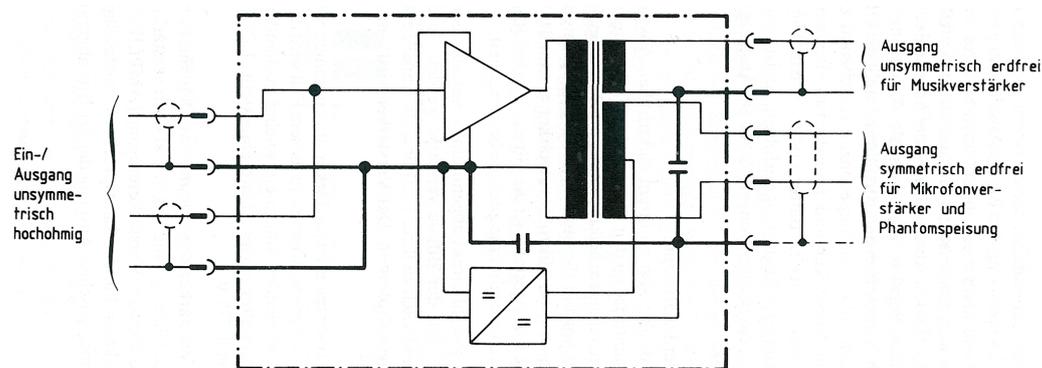


Abbildung 30: Eine aktive DI-Box mit 48V-Spannungsversorgung aus der Phantomspeisung [3].

Es gibt darüber hinaus auch aktive DI-Boxen ohne Übertragersymmetrierung¹. Diese ermöglichen keine echte Potentialtrennung, haben aber den Vorteil sehr

¹<http://www.sound.westhost.com/project35.htm>

hohe Eingangsimpedanzen und sehr kleine Ausgangsimpedanzen realisieren zu können.

6 Zusammenfassung

Um analoge Audiosignale zu übertragen gibt es zwei Möglichkeiten der Leitungsführung:

- unsymmetrische und
- symmetrische.

Ob es sich dabei um unsymmetrisch oder symmetrisch handelt, hängt von den Impedanzen beider Leiter gegenüber Masse ab. Dabei müssen auch die Ausgangs- bzw. Eingangsimpedanzen von Sender bzw. Empfänger berücksichtigt werden.

Bei unsymmetrischer Leitungsführung ist ein Leiter geerdet, während der andere eine höhere Impedanz gegen Masse hat. Störspannungen, die zwischen beiden Geräten (Sender und Empfänger) aufgrund unterschiedlicher Massepotentiale (s. Kapitel 2) anliegen, werden bei dieser Leitungsführung praktisch vollständig von der Eingangsstufe verstärkt. Abhilfe schaffen Übertrager, die zwischen die Geräte geschaltet werden, weil dadurch der Stromkreis für Spannungen zwischen beiden Geräten aufgetrennt wird (s. Kapitel 3.2.1). Einstreuungen infolge elektrischer Felder können durch die Schirmung gegen Masse abgeleitet werden.

Bei symmetrischer Leitungsführung haben beide Signaladern (zusammen mit den Ein- und Ausgangsimpedanzen beider Geräte) die gleiche Impedanz gegen Masse. Störspannungen aufgrund unterschiedlicher Massepotentiale zwischen beiden Geräten sind somit im Gleichtakt und mit gleicher Amplitude auf beiden Leitungen vorhanden. Diese Signale werden also nicht von der Differenzeingangsstufe des Empfängers verstärkt. Dort wird nur das Audiosignal, welches als Differenz zwischen beiden Eingängen anliegt, verstärkt. Sind die Impedanzen beider Leitungen nicht exakt gleich, so werden die Störspannungen z.T. in Differenzspannungen zwischen den Leitern gewandelt (s. Kapitel 4.1.1) und somit auch von der Eingangsstufe verstärkt.

Einstreuungen auf die Leitungen infolge externer Felder werden effektiv unterdrückt, da sie auf beiden Leitungen gleich stark vorhanden sind und damit nicht verstärkt werden. Zusätzlichen Schutz vor kapazitiven Einkopplungen von Störungen bietet die Schirmung. Symmetrische Signale haben nicht direkt mit der Unterdrückung von Störspannungen zu tun. Trotzdem werden auf den beiden Leitungen symmetrische Signale übertragen, weil dadurch kapazitiv gekoppelte Signalströme, die bei unsymmetrischen Signalen in die Schirmung fließen würden, aufgehoben werden.

Für die Verbindung unsymmetrischer Ausgangsstufen mit symmetrischen Eingangsstufen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Am einfachsten ist die Verwen-

dung eines Adapterkabels. Um die Unterdrückung von Gleichtaktstörspannungen weiter zu verbessern, kann zusätzlich ein Übertrager zwischen beide Geräte geschaltet werden (s. Kapitel 5.1). Des weiteren kann ein unsymmetrischer Ausgang (eines Instrumentes) mit Hilfe einer DI-Box an einen symmetrischen Eingang (Mikrofoneingang eines Mischpultes) angeschlossen werden (s. Kapitel 5.3). Die Verbindung von symmetrischen Ausgangsstufen mit unsymmetrischen Eingangsstufen kann ebenfalls mittels Übertrager erfolgen (s. Kapitel 5.2).

Literatur

- [1] Ballou, G. (Ed.) u.a.: Handbook for sound engineers, 3. Aufl., Focal Press, 2001
- [2] Henle, H.: Das Tonstudio-Handbuch: Praktische Einführung in die professionelle Aufnahmetechnik, GC Gunther Carstensen Verlag, München 1990
- [3] Dickreiter, M.: Handbuch der Tonstudioteknik (Band 2), 6. Aufl., K. G. Saur Verlag, München 1997
- [4] Haas, G.: Audioschaltungen für Tontechnik, Studio und PA, Elektor-Verlag, Aachen 1996
- [5] Skritek, P.: Schirmungen in der Audio-Schaltungstechnik: Konstruktive und schaltungstechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Störsicherheit, Franzis´ Verlag, München 1989
- [6] Whitlock, B.: Balanced lines in audio systems: fact, fiction, and transformers, J. Audio Eng. Soc., Vol. 43, No. 6, p. 454-464, June 1995
- [7] Whitlock, B.: Interconnection of balanced and unbalanced equipment, Jensen Application Note AN003, www.jensen-transformers.com, 1995
- [8] Whitlock, B.: Answers to common questions about audio transformers, Jensen Application Note AN002, www.jensen-transformers.com, 1995
- [9] Whitlock, B.: Understanding, finding & eliminating ground loops in audio & video systems, Generic Seminar Template, www.jensen-transformers.com, 2005
- [10] Jensen Transformers: Application Schematic AS007, www.jensen-transformers.com, 1995
- [11] Jensen Transformers: Application Schematic AS066, www.jensen-transformers.com, 1996