



Erdungskonzepte für Audioinstallationen

Bachelorarbeit

durchgeführt von

Philipp Schmidt

Institut für Breitbandkommunikation

der Technischen Universität Graz

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

Betreuer: *Dipl.-Ing.* Thorsten Rohde

Graz, im Juni 2009

Inhaltsverzeichnis

1. EINFÜHRUNG	3
1.1 Das Stromversorgungsnetz	4
1.1.1 Einphasenwechselstromnetz	4
1.1.2 Dreiphasenwechselstrom	5
1.2 Erde	6
1.2.1 „echte“ Erde, Betriebserde (AC-Ground)	6
1.2.2 Gehäuseerde (Chassis-Ground)	7
1.2.3 Audioerde (Audio-Ground)	8
1.2.4 Zusammenfassung der unterschiedlichen Referenzen	9
1.3 Einige Gedanken zur Sicherheit	10
2. PROBLEME UND STÖRGERÄUSCHE BEI DER VERBINDUNG ZWEIER GERÄTE	12
2.1 Erdschleifen	12
2.2 Common Impedance Coupling	13
2.3 Das Pin 1-Problem	13
2.4 Einstreuungen auf den Signalweg	15
2.5 Lösungen bei hörbaren Erdschleifen	18
3. SYSTEMWEITE ERDUNGSKONZEPTE FÜR AUDIOSYSTEME	21
3.1 Isolierte Sternerdung	21
3.2 Mehrpunkterdung	26
3.3 Trennung der Erdenpotentiale	27
4. STROMVERSORGUNG IN TONSTUDIOS	30
4.1 Netzspannungskonstanthalter	32
4.2 Auftrennung der Stromkreise	33
4.2.1 Nutzung der unterschiedlichen Phasen	34
4.2.2 Isolierte Tonstromversorgung	34
4.3 Netzfilter	35
4.4 Überspannungsschutz	36
5. ZUSAMMENFASSUNG	38
6. QUELLENVERZEICHNIS	40

1. Einführung

Die Erdung von Audiosystemen ist eine Thematik, der im Alltag oft eine zu geringe Aufmerksamkeit beigemessen wird. Meist werden Erdungsprobleme, die sich durch unerwünschte Geräusche im Signalweg bemerkbar machen, erst in dem Moment offenbar, an dem sie auftreten. Wenn man in einschlägigen Internetforen nach schnell implementierbaren Lösungen sucht wird man meist enttäuscht. Die Qualität der empfohlenen Maßnahmen reicht von lebensgefährlichen Tipps zum Durchtrennen des Schutzleiters bis zu komplexen Beschreibungen des Aufbaus von beispielsweise Sternerdungen. Gerade heute, wo in großer Zahl kleinere, sogenannte Projektstudios entstehen, geht dem Studioaufbau selten eine angemessene Planungsphase voraus. Häufig werden diese Tonstudios in Abhängigkeit des erwirtschafteten Gewinnes sukzessive erweitert. Im Gegensatz zu einmalig geplanten großen Studios (auch in diesen werden Erweiterungen vorgenommen, jedoch meist seltener als in den genannten Projektstudios) ist also zu Beginn der Aufbauarbeiten nicht bekannt, welchem Umfang das Studio in Zukunft erweitert werden wird.

Dennoch ist es mit einer gründlichen Konzeption und Planung möglich, Erdungsprobleme und die damit verbundenen Geräusche im Signalweg zu verhindern. Diese Konzepte bedingen ein grundlegendes Wissen über den Sinn der Erdung und können in lokale oder systemweite Konzepte differenziert werden. Während es bei lokalen Konzepten um die Verbindung zweier Geräten und die hierbei entstehenden Probleme geht, werden allgemeine Erdungsprobleme mit systemweiten Konzepten abgedeckt. In der Arbeit werden beide Konzepte unterschieden, es sollte dem Anwender jedoch bewusst sein, dass sich Beide für eine störffreie Audioumgebung bedingen. Ohne eine fehlerfreie Erdung der verwendeten Geräte kann kein störungssicheres Audiosystem aufgebaut werden, genau so wenig wie dies mit einer mangelhaften Erde zu schaffen ist.

In der folgenden Arbeit sollen nun lokale und systemweite Konzepte für die Erdung von Audiosystemen beschrieben werden. Hierzu werden zunächst die Grundlagen erläutert um danach auf Probleme bei der Verbindung zwischen zwei Geräten einzugehen. Danach sollen übergreifenden Erdungskonzepte vorgestellt und evaluiert werden. Abgeschlossen wird die Arbeit mit einer Überlegung in wie weit und mit welchen

Mitteln das Audiosystem vom normalen Stromnetz abgekoppelt werden sollte, um einen möglichst störungsfreien Signalverlauf zu gewährleisten.

1.1 Das Stromversorgungsnetz

Das Stromnetz dient dazu, den Verbraucher mit Strom zu versorgen. Über weite Strecken wird der Strom mit hoher Spannung (bis zu 400kV) und einer definierten Frequenz (in Europa 50Hz, Nordamerika 60Hz) transportiert und erst im Bereich des Verbrauchers auf geringere Werte heruntertransformiert. Gebräuchliche Versorgungsstrukturen in Europa sind das Einphasenwechselstromnetz mit 230V/50Hz oder das stärkerer Dreiphasenwechselstromnetz mit 400V/50Hz (Starkstromanschluss).

1.1.1 Einphasenwechselstromnetz

Das Einphasenwechselstromnetz ist das Stromnetz mit dem die meisten Menschen direkt in Kontakt kommen, da es das herkömmliche Haushaltsnetz darstellt. Es handelt sich um einen dreipoligen Anschluss der aus Außenleiter (schwarz/braun), Neutralleiter (blau) und Schutzleiter (gelb-grün) besteht. Der Außenleiter trägt in Europa im Bezug auf den Neutralleiter eine Wechselspannung von 230V/50Hz. Da beide Leiter Strom führen können werden sie als aktive Leiter bezeichnet. Der Schutzleiter ist zur Erdung von Fehlströmen gesetzlich vorgeschrieben.

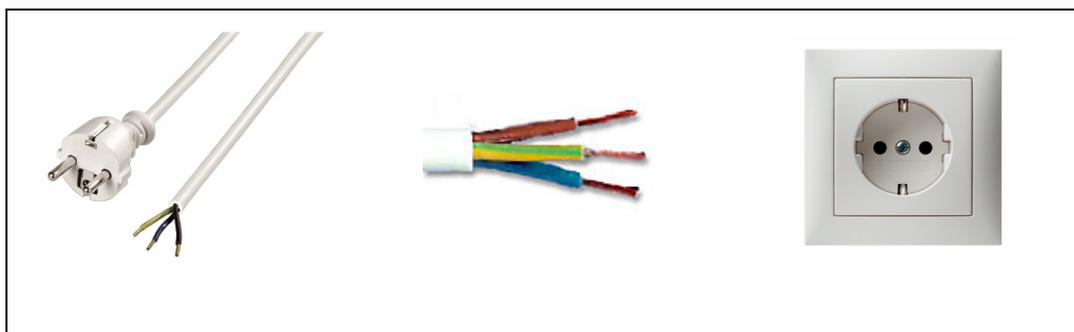


Abb. 1.1: Stecker, Kabel und Steckdose eines Einphasenwechselstromes¹

¹ Grafiken entnommen aus:

<http://www.hama.de/bilder/00110/abb/00110840abb.jpg>

http://www.das-baulexikon.de/nxs/378///www.das-baulexikon.de/schablone1/elektroleitungen_und_was_man_ueber_sie_wissen_muesste.htm

<http://www.elektro-friedrichsen.de/S1steckdose.jpg>

1.1.2 Dreiphasenwechselstrom

Diese Stromversorgung ist umgangssprachlich auch unter dem Namen „Starkstrom“ bekannt. Es handelt sich um ein System in dem drei Wechselströme über eine Phasenverschiebung von jeweils 120 Grad miteinander verkettet werden. Das Netz besitzt drei Außenleiter sowie einen Neutralleiter. Der Vorteil der drei Spannungsführenden Leiter besteht darin, dass nicht nur die zwischen den Außenleitern anliegende Spannung von 400V (Leiterspannung) genutzt werden kann, sondern auch eine weitere zwischen einem Außenleiter und dem Neutralleiter anliegende Spannung (Strangspannung). Diese errechnet sich aus dem Verkettungsfaktor des Dreiphasensystems und der Leiterspannung:

$$U_{St} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{400V}{\sqrt{3}} \approx 230V$$

An dieser Rechnung wird deutlich, dass das oben genannte Haushaltsnetz und das Starkstromnetz dieselbe Infrastruktur nutzen können. Für das Haushaltsnetz wird also einfach „eine Phase“ des Dreiphasenwechselstromes genutzt, wohingegen Geräte mit hohem Energieverbrauch (in normalen Haushalten sind dies üblicherweise der Herd sowie Wasserthermen oder Nachtspeicheröfen) die höhere Spannung nutzen können.

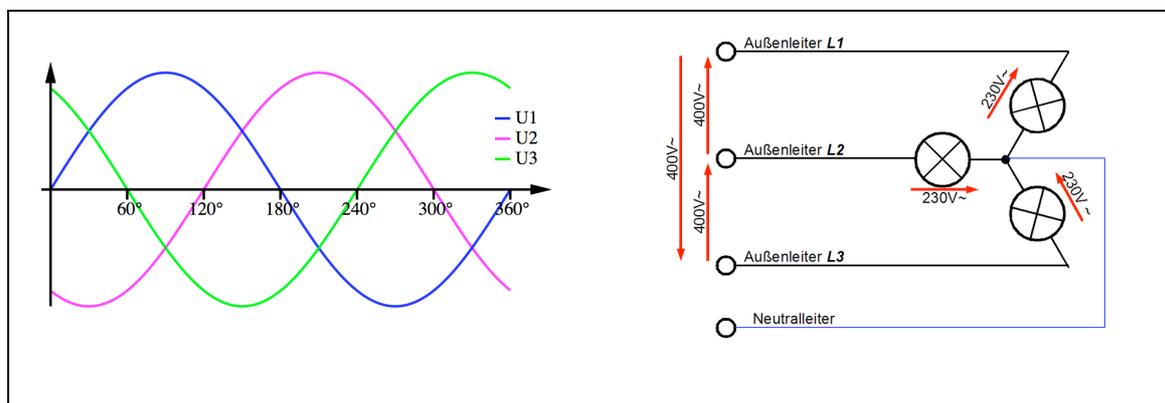


Abb. 1.2: Darstellung des Dreiphasenwechselstromes² (links) und Vierleitersystemes³ (rechts)

² Grafik entnommen aus:

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/3/3f/Dreiphasenwechselstrom.svg>

³Grafik entnommen aus:

<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Drehstromnetz.png&filetimestamp=20041120115218>

Auch für den Studiobetrieb wird das Dreiphasenwechselstromnetz gelegentlich für das Netzteil des Mischpultes verwendet. Außerdem kann es für Studiostromversorgung wichtig sein, die als Zuleitung verwendete Phase zu kennen (s. 4.2a „Nutzung der unterschiedlichen Phasen“).

1.2 Erde

In der Elektrotechnik ist häufig die Rede von „Erdung“ beziehungsweise „Erde“. Im Prinzip handelt es sich hierbei lediglich um die Definition eines Bezugspotentiales. Je nach Situation kann es sich hierbei jedoch um unterschiedliche Systeme und somit unterschiedlichen Bezugsreferenzen handeln. Morrison definiert den Begriff Erdung wie folgt [3]:

„To the power industry the world ground implies a conductor that eventually connects to earth or soil. In electronics this is not a requirement, although some grounds are eventually tied to earth. A ground is a reference conductor in a circuit. It can be one side of a power supply, a centertap on a transformer, or the frame of a metal cabinet. There can be many grounds or reference conductors in one circuit or facility. Grounds can even float; that is, they can have little or no association with another circuit.“

Im Folgenden möchte ich auf die im Audiobereich gebräuchlichen Bezugspotentiale eingehen und diese näher erläutern.

1.2.1 „echte“ Erde, Betriebserde (AC-Ground)

Bei der „echten“ Erde handelt es sich um das tiefste erreichbare Potential nämlich um sie selbst. Da die Erde als größter Elektronenspeicher mit quasi unbegrenzter Kapazität betrachtet werden kann, ist es nicht möglich, ein tieferes Potential auf ihr selbst zu erreichen. Um ein System zu erden können folgende Möglichkeiten genutzt werden:

- Tiefenerder

Hierbei wird ein Erdspeer tief in den Boden getrieben um eine Erdverbindung herzustellen. Der Vorteil des Speeres ist, dass eine Verbindung hergestellt wird, bei der Feuchtigkeits- oder Temperatureinflüsse und somit eine Änderung des Erdwiderstandes durch die Wahl einer genügenden Tiefe ausgeschaltet werden können. Ein Tiefenerder wird aus diesem Grund oft bis zu 15m in den Boden geschlagen.

- **Oberflächenerder**
Oberflächenerder werden als Draht oder leitendes Band in geringer Tiefe (0.5m - 1m) horizontal über eine größere Fläche verlegt. Hierbei kann auch auf bestehende metallische Strukturen wie beispielsweise das Wasserleitungssystem zurückgegriffen werden. Der Nachteil der Oberflächenerdung besteht darin, dass der Erdwiderstand durch die geringe Tiefe sehr stark von den äußeren Bedingungen, d.h. Feuchtigkeit und Temperatur abhängt. Wenn der Bodenzustand unbekannt ist kann dies die Auslegung des Erders sehr erschweren.
- **Fundamenterder**
Hierfür wird die Erdung in Neubauten in das Fundament mit eingelegt. Aufgrund der geringen Tiefe und der flächigen Ausbreitung kann man den Fundamenterder als eine Sonderform des Oberflächenerders betrachten.

Während die Zuleitung zum Verteilerkasten eines Haushaltes meist noch als „echte“ Erde bezeichnet wird, bezeichnet man die Referenz ab dem Verteilerkasten als „Betriebserde“.

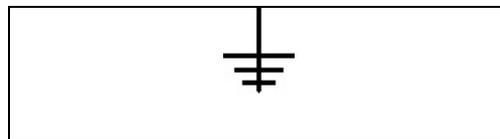


Abb. 1.3: Schaltbild für Betriebserde

Der Schutzleiter in einem Haushalt trägt immer das Potential der Betriebserde. Im ersten Moment wirkt dies wie eine willkürliche Definition, da unter normalen Bedingungen Erde und Betriebserde das selbe Potential aufweisen. Wenn man allerdings in Betracht zieht, dass jeder Haushalt durch einen Verteilerkasten und einen FI-Schutzschalter ein eigenes System darstellt, so macht es durchaus Sinn, innerhalb dieses Systems von einer eigenen Referenz zu sprechen. Da Audiosysteme meist innerhalb eines „Haushaltes“ aufgebaut sind, wird in weiterer Folge die Betriebserde das tiefste zu erreichende Potential des Systems darstellen.

1.2.2 Gehäuseerde (Chassis-Ground)

Die Gehäuseerde ist eine bei Metallgehäusen vereinfachte Form der Erdung. Praktisch handelt es sich um eine Verbindung mit einer Stelle des (leitenden) Gehäuses. Es wird

angenommen, dass das Gehäuse eine genügend große Kapazität aufweist um eine sichere Referenz zu bieten. Begünstigt wird diese Idee dadurch, dass das Gehäuse in europäischen Ländern immer mit dem Schutzleiter des Stromnetzes verbunden sein muss, wodurch die Kapazität und die Referenzierung noch verbessert werden. Trotzdem bietet die Gehäuseerde in der professionellen Audioerdung keinen verlässlichen Referenzpunkt, da sie meist nur über schlechter leitende Schraubverbindungen, bzw. Schweißpunkte an das Gehäuse angebunden ist (s. Abb. 1.4). Wie sich in den weiteren Betrachtungen zeigen wird sollten Referenzpunkte außerdem nur an einem Punkt im Schaltkreis geerdet werden. Werden mehrere Erdungspunkte, beispielsweise durch zusätzliche Gehäuseerdpunkte, verwendet, so besteht die Gefahr der Potentialdifferenz zwischen diesen Punkten und hierdurch eine erhöhte Störgeräuschwahrscheinlichkeit (siehe hierzu auch Kap. 3.2).

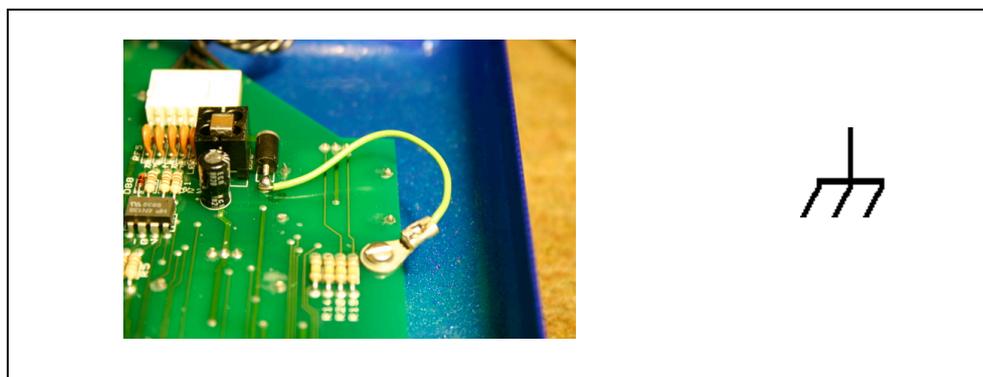


Abb. 1.4: Gehäuseerdung⁴ und das entsprechende Schaltbild

1.2.3 Audioerde (Audio-Ground)

Die Audioerde ist diejenige Referenz, die für alle Audioschaltungen eines Gerätes genutzt wird. Da diese Schaltungen ausschließlich mit Gleichstrom betrieben werden dient hierzu üblicherweise eine 0 Volt Gleichstromreferenz.

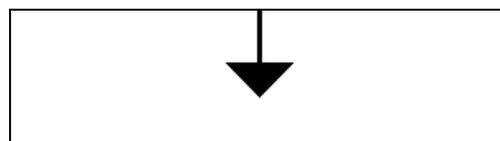


Abb. 1.5: Schaltbild für Audioerde

In der folgenden Abbildung 1.6 ist der Sachverhalt detailliert beschrieben.

⁴ Grafik entnommen aus:

<http://www.dandugan.com/downloads/Notron%20chassis%20ground.jpg>

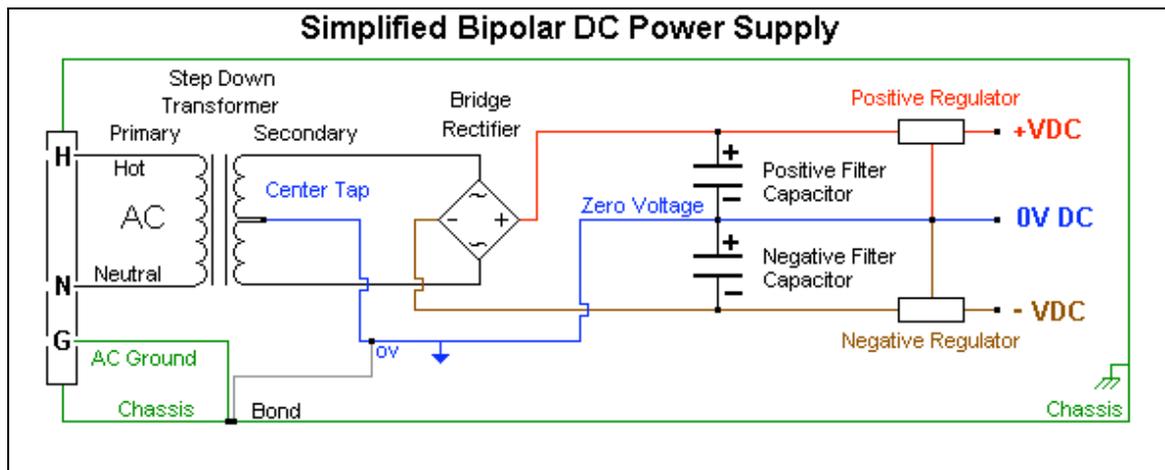


Abb. 1.6: Vereinfachte Darstellung eine Gleichstromversorgung⁵

Aus dem anliegenden Wechselstrom wird mittels eines Transformators und einem nachgeschalteten Brückengleichrichter ein Gleichstrom erzeugt. Der Transformator besitzt auf der Sekundärseite zwei Windungen die in der Mitte den sog. Centertap bilden. An den beiden Windungen fällt jeweils die Hälfte der sekundärseitigen Spannung ab. Der Centertap wird nun mit der Betriebs Erde verbunden und zieht dadurch die Audioerde auf dessen Potential (angenommen werden hier 0V). Hierdurch fällt an der oberen Wicklung der Transformators eine positive, an der unteren Wicklung eine negative Spannung ab. Beide werden durch einen Brückengleichrichter und Kapazitäten stabilisiert und bilden zwei Gleichspannungen die nachfolgend zum Betrieb der Audioschaltung verwendet werden können. Durch die richtige Verbindung der Audioerde mit der Betriebs Erde kann eine einheitliche Referenz auch zwischen mehreren Audiogeräten gewährleistet werden. Dies ist bei einer Zusammenschaltung mehrerer Audiogeräte zur Vermeidung von Brummschleifen essentiell und wird später in dieser Arbeit noch eingehender besprochen.

1.2.4 Zusammenfassung der unterschiedlichen Referenzen

Im folgenden Schaltbild sind nochmals alle Referenzpotentiale übersichtlich dargestellt. Gepeist vom Stromnetz setzt ein Transformator die Wechselspannung in die haushaltsüblichen 230V/50Hz um. Wie erwähnt gilt an dem Transformator selbst noch „echte“ Erde (Local Earth Ground), da hier der Verbindungspunkt zum Erder des

⁵ Grafik entnommen aus:

http://pws.prserve.net/SGhome/gndtss/pages/s1_agnd.htm [iQ15]

Haushaltes besteht. Ab diesem Punkt wird von Betriebserde (AC-Ground) gesprochen. Innerhalb des entsprechenden Audiogerätes wird die ankommende Spannung in einen Gleichstrom transformiert und zwei weitere Referenzen, Gehäuse (Chassis) und Audioerde entstehen.

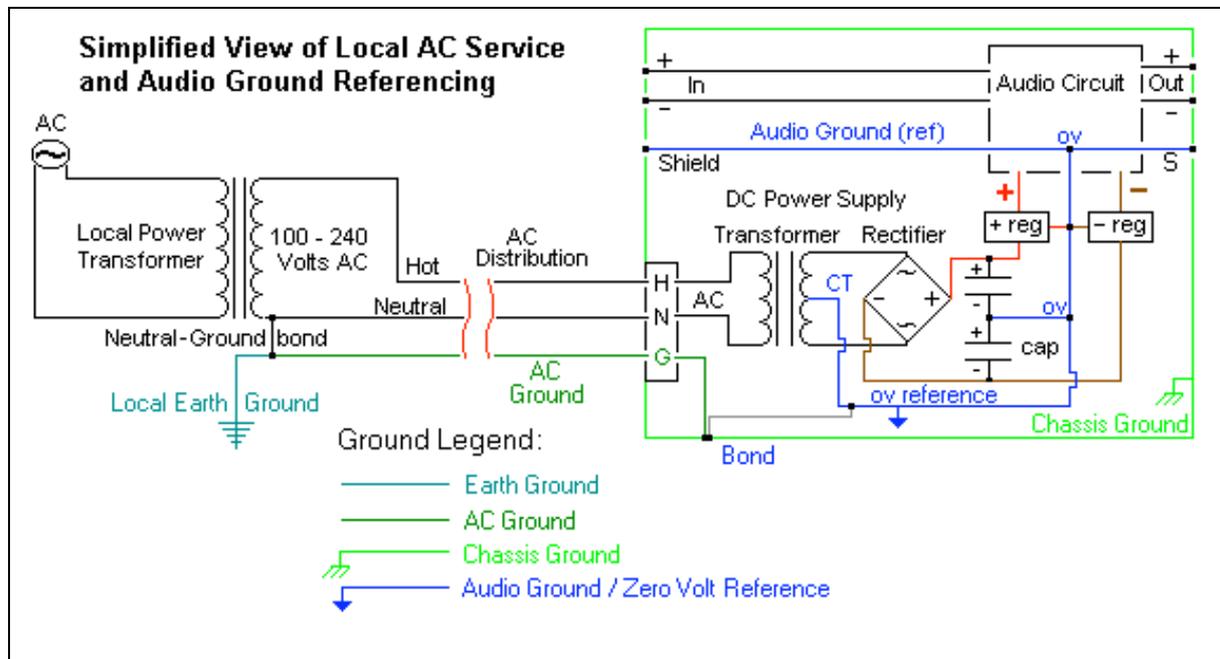


Abb. 1.7: Zusammenfassung der unterschiedlichen Referenzen⁶

1.3 Einige Gedanken zur Sicherheit

Die bisherigen Aussagen zur Erdung waren fast ausschließlich darauf hin ausgerichtet diese als Bezugspotential zu nutzen. In der Realität hat die Erdung eine weitere essentielle Funktion. Sie soll den Nutzer vor Fehlfunktionen und damit eventuell entstehenden Fehlerströmen schützen. Aus diesem Grund heißt der passive Leiter eines haushaltsüblichen Einphasensystems nicht Betriebserde, sondern Schutzleiter und muss (in Europa) als grün-gelb gekennzeichnete Leiter ausgeführt werden. Sollte durch einen Fehler eine direkte Verbindung von stromführenden Teilen mit einem leitenden Gehäuse entstehen, so wird der auf dem Gehäuse liegende Strom über Gehäuseerdung direkt über den Schutzleiter in die Erde abgeleitet und nicht über den menschlichen

⁶ Grafik entnommen aus:
http://pws.prserve.net/SGhome/gndtss/pages/s1_ref.htm#top [iQ15]

Körper.⁷ Zusätzliche Fehlerschutzschalter im Sicherungskasten können detektieren, dass dem Stromkreis zugeführte Energie falsch abfließt und sperren die Stromzufuhr innerhalb von wenigen Millisekunden.

In weiten Teilen der Welt ist die Verwendung eines Schutzleiters bei leitenden Gehäusen Pflicht. Die oft praktizierte Methode des Abklebens des Schutzleiters zur Vermeidung von Erdschleifen ist daher illegal und stellt eine lebensgefährliche Bedrohung für den Benutzer dar! Mit einem grundlegenden Wissen über die Entstehung von Störgeräuschen können diese Probleme auch ohne Gefahr für Leib und Leben gelöst werden, wie ich in den folgenden Abschnitten darstellen möchte.

⁷ in der Realität kann aber dennoch ein Strom durch die berührende Person fließen, da die Verbindung aus Körper Schutzleiter und Erde wie ein Stromteiler wirkt. Durch den wesentlich höheren Widerstand des menschlichen Körpers gegenüber der Erdung ist der Strom jedoch sehr gering und nicht schädlich.

2. Probleme und Störgeräusche bei der Verbindung zweier Geräte

Werden zwei Audiogeräte miteinander verbunden, so kann es unter Umständen zu Störgeräuschen kommen. Diese äußern sich gemeinhin als Brummen oder Summen und lassen sich in vielen Fällen direkt auf mangelhafter Referenzierung zurückführen. Es fließen Ausgleichsströme die als Geräusche hörbar werden. Im folgenden Kapitel möchte ich auf die häufigsten Probleme eingehen die bei der Zusammenschaltung von zwei Audiogeräten entstehen können und Lösungsansätze für diese Probleme bieten.

2.1 Erdschleifen

Häufig werden Störgeräusche im Audiobereich durch Erdschleifen verursacht. Als Erdschleife bezeichnet man eine Verbindung zwischen zwei Geräten über deren gemeinsames Referenzpotential. Im folgenden Schaltbild ist ein Beispiel für solch eine Schleife farblich hervorgehoben.

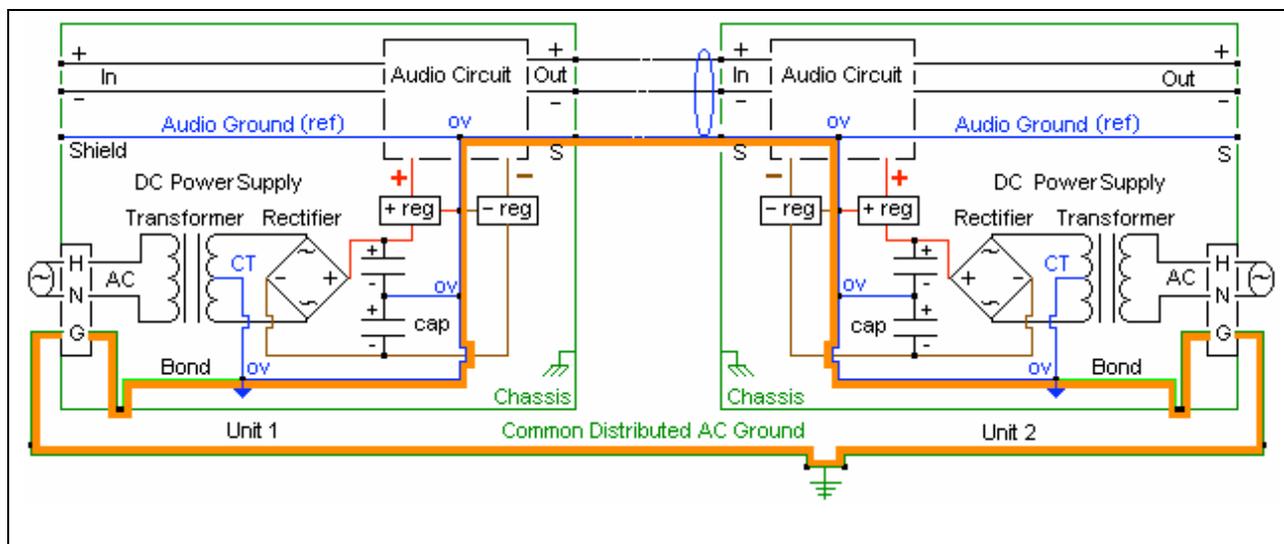


Abb. 2.1: Darstellung einer Erdschleife⁸

Die Erdschleife selbst verursacht jedoch keinerlei störende Geräusche. Diese gelangen erst in das Signal, wenn zwischen den Geräten unterschiedliche Potentiale bestehen und aus diesem Grund ein Ausgleichstrom von einem zum anderen Gerät fließt. Der Weg

⁸ Grafik entnommen aus:

<http://pws.prserv.net/SGhome/gndtss/pages/s2.htm#top> [iQ15]

des Stroms führt je nach Schaltungsentwurf durch die Audioschaltung oder moduliert dessen Referenz und kann nur deshalb als Geräusch wahrgenommen werden. Es sollen nun die Gründe für diese fehlerhaften Ströme und im Anschluss Lösungsansätze zur Entstörung des Signalweges aufzeigen werden.

2.2 Common Impedance Coupling

Das sogenannte Common Impedance Coupling kann immer dann auftreten, wenn ein „gemeinsamen Leiter mit einer Impedanz zwischen der Quelle und dem Empfänger“ [8] besteht. Durch Einstreuung einer elektrischen Störung auf die gemeinsame Referenz in Form von Leckströmen eines der beiden Geräte fällt in dem gemeinsamen verlustbehafteten Leiter eine Spannung $U_{CI} = Z_{Kabel} \cdot I_{Leck}$ ab. Hierdurch wird die Referenz des zweiten Gerätes moduliert was als Störgeräusch hörbar werden kann. Beispielhaft sei hier die Abbildung 2.1 angeführt, in dem beide Geräte ihre Audioschaltungen auf dasselbe Potential referenzieren. Sollte nun das Gerät 1 einen Strom auf die „Erdung“ ableiten, moduliert es dadurch die Audioreferenz des zweiten Gerätes. Wie stark dieser Effekt auftritt hängt unter anderem davon ab, wie weit beide Geräte voneinander entfernt sind, da die abfallende Spannung mit der Erhöhung der Leiterlänge und der damit zunehmenden Impedanz immer stärker wird. Ein weiterer wichtiger Faktor ist natürlich auch, inwiefern die Geräte Leckströme in die gemeinsame Referenz emittieren.

Zur Vermeidung des Common Impedance Coupling muss das systemweite Erdungskonzept des Audiosystems betrachtet werden. Die in 3.1 erläuterte isolierte Sternerdung führt beispielsweise alle Betriebserden an einem einzigen Punkt zusammen, so dass zwischen den Geräten keine Spannungen abfallen können und somit keine Modulation der Referenzpotentiale möglich ist.

2.3 Das Pin 1-Problem

Für eine hörbare Erdschleife muss aber nicht zwangsläufig eine fehlerhafte Referenzierung der Auslöser sein. Im Schaltungsdesign der Abb. 2.1 kann es, neben dem Common Impedance Coupling, noch zu anderen geräuschverursachenden Problemen kommen. Abb. 2.1 beherbergt ein weiteres signifikantes Problem, nämlich

den über die Audioreferenz geerdeten Kabelschirm. Dieser häufige Schaltungsfehler wird auch als Pin 1-Problem bezeichnet.

Mit dem Pin 1 eines XLR Steckers wird bei einem symmetrisch beschalteten Kabel der Schirm verbunden, durch welchen, nach dem Prinzip des Faraday'schen Käfigs, elektromagnetische Einflüsse vom Signalweg ferngehalten werden. Durch die metallische Ummantelung der signalführenden Leiter werden diese elektromagnetischen Einstreuungen, statt in den Signalweg, in die Abschirmung induziert. Dieser Störstrom verursacht aufgrund der Impedanz des Schirmes, wie auch beim Common Impedance Coupling, eine Spannung. Besteht zwischen der Abschirmung der Audioleitung und der Betriebserde ein Potentialunterschied, so fließt in einem der beiden Geräte ein Ausgleichsstrom über die Audio- zur Betriebserde. Hierbei wird das Referenzpotential, welches zur Verstärkung oder Veränderung des Audiosignals genutzt wird, direkt durch die auf den Schirm wirkende Einstreuungen beeinflusst. Das Ergebnis sind unterschiedliche Audioreferenzpotentiale zwischen den beiden Geräten und somit das hinlänglich bekannte Summen oder Brummen im Signalweg. Der oben gezeigte Schaltungsentwurf enthält also einen signifikanten Designfehler. Leider werden auch heute noch viele Geräte nach diesem Entwurf gebaut, obwohl eine störungsfreie Lösung sehr einfach möglich wäre, wie die folgenden Abbildung zeigt.

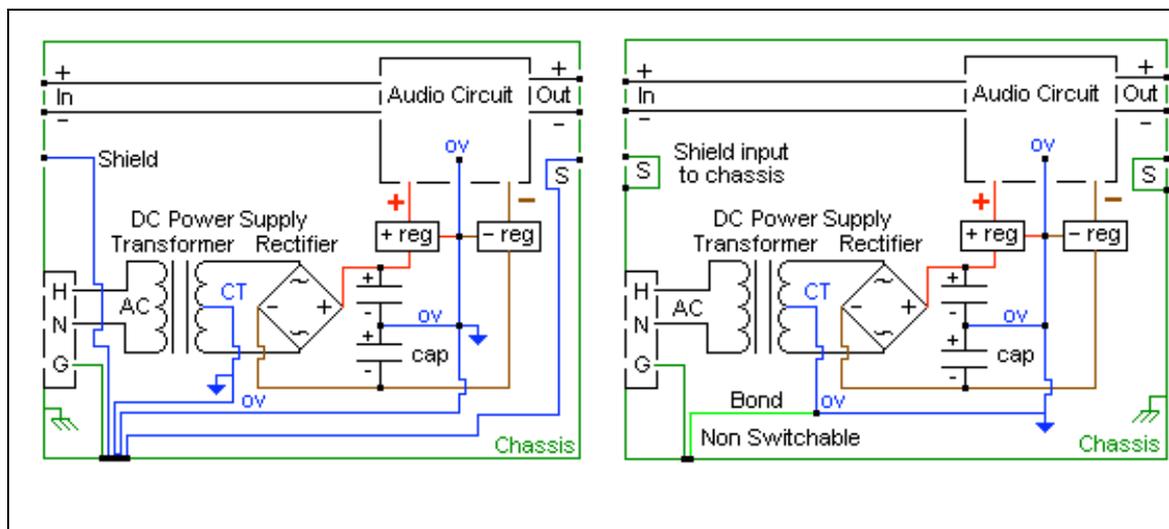


Abb. 2.2: Interne Sternerdung zur Vermeidung von Brummen (links) , vereinfachte Version (rechts)⁹

⁹ Grafiken entnommen aus:

http://pws.prserve.net/SGhome/gndtss/pages/s3_star.htm#top [iQ15]

http://pws.prserve.net/SGhome/gndtss/pages/s3_chsh.htm [iQ15]

Der Pin 1-Problematik lässt sich von vornherein entgegenreten, indem man den Schirm der Audioein- und Ausgänge nicht über die Audioerde abgeleitet, sondern nach dem Prinzip der Sternerdung direkt zu einem Erdungspunkt führt. So können keine Potentialdifferenzen entstehen, welche die Audioreferenz beeinflussen, da jeder Referenzpunkt des Schaltkreises separat und direkt auf das Potential der Betriebserde gezogen wird. Um den größtmöglichen Schutz gegen unterschiedliche Potentiale und daraus resultierende Brummschleifen zu erhalten, führt man alle Verbindungen an nur einem Punkt der Schaltung zur Betriebserde zusammen.

In einer häufig verwendeten, vereinfachten Version wird der Schirm über die Gehäuseerde geleitet. Hierbei sollte aber beachtet werden, dass die Verbindung über schlecht leitende Schraubverbindungen an das mehr oder weniger leitende Gehäuse meist nicht so gut wie eine direkte Verkabelung ist. Wenn aber die Erdung des Schirmes schlecht ist, kann dies zu einem schlechteren Schutz gegen Einstreuungen führen.

2.4 Einstreuungen auf den Signalweg

Da sich Audiosysteme üblicherweise in belebten Gegenden befinden, muss bei der Planung auch eine Belastung durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder beachtet werden. Um einen Einfluss auf die signalführenden Leiter und Bauteile mittels des Faraday'schen Prinzips zu verhindern nutzt man Kabelschirme die am emittierenden oder am empfangenden Bauteil angebracht werden. Es spricht für die Qualität eines Gerätes, wenn eine bereits in der Designphase konzeptionierte Schirmung Störgeräusche von empfindlichen Bauteilen fernhält, da ein nachträglicher Einbau sehr aufwändig ist und sich in den meisten Fällen nicht lohnt. Doch auch gegen externe Einstreuungen wie Radio- oder Handywellen müssen Vorkehrungen getroffen werden da gerade Audioverbindungen zwischen Geräten für solche einstreudenden Felder empfindlich sind. Man kann zwischen den folgenden Feldern unterscheiden:

Elektrische Felder

Ein elektrisches Feld ist ein Vektorfeld, das durch ruhende (Elektrostatik) oder bewegte Ladungen (Elektrodynamik) verursacht wird. Jedem Punkt im Raum kann ein Feldstärkevektor \vec{E} zugeordnet werden. Durch ein elektrische Feld wirkt auf die Ladungen des Leiters eine Kraft $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ wodurch ein Strom zu fließen beginnt. Dieser

verursacht an einem verlustbehafteten Leiter einen Spannungsabfall der als Störgeräusch wahrgenommen werden kann.

Zum Schutz vor solchen Einstreuungen kann der Leiter mit einem Leiterschirm versehen werden. Dieser wird meist als dichtes Drahtgeflecht um den Leiter gelegt und funktioniert nach dem Prinzip des Gaußschen Gesetzes, welches besagt, dass unabhängig von dem äußeren Feld das innere eines Leiters ladungsfrei sein muss¹⁰. Diese Ladungsfreiheit bleibt auch bei einem äußeren Feld intakt, da sich die Ladungen des Leiters gegensätzlich zum äußeren Feld auf der Leiteroberfläche verschieben. Wird ein Leiter durch eine das Kabel ummantelnde Schirmung geschützt, so ist das innere des Leiters feldfrei und somit ohne Störungen.

Um eine funktionierende Schirmung zu gewährleisten muss diese aus einem gut leitenden, möglichst durchgängigem Drahtgeflecht bestehen, um eine äquipotentiale Fläche um den Leiter herum zu bilden. Die folgende Abbildung zeigt einen solchen Kabelschirm am Beispiel eines Antennenkabels:



Abb 2.3:Beispiel eines Kabelschirms¹¹

Der Schirm muss über einen separaten Anschlusspunkt geerdet werden, damit die eingestreuerten Spannungen abgeleitet werden.

¹⁰Durch ihre gleiche Polung stoßen Elektronen sich voneinander ab und versuchen so weit wie möglich voneinander weg zu kommen. Dies ist auf der Leiteroberfläche der Fall, wodurch im inneren des Leiters ein feldfreier Raum entsteht.

¹¹ Bild entnommen aus:

http://e-special-shop.de/out/oxbaseshop/html/0/dyn_images/1/ui_p1.jpg

Magnetische Felder

Wird eine Leiterschleife mit der Fläche A von einem sich zeitlich ändernden Magnetfeld $\vec{B}(t)$ durchsetzt (Abb.2.5), so wird nach dem Faraday'schen Gesetz eine Spannung induziert:

$$U = 2\pi \cdot f \cdot B \cdot A \cdot \cos\theta$$

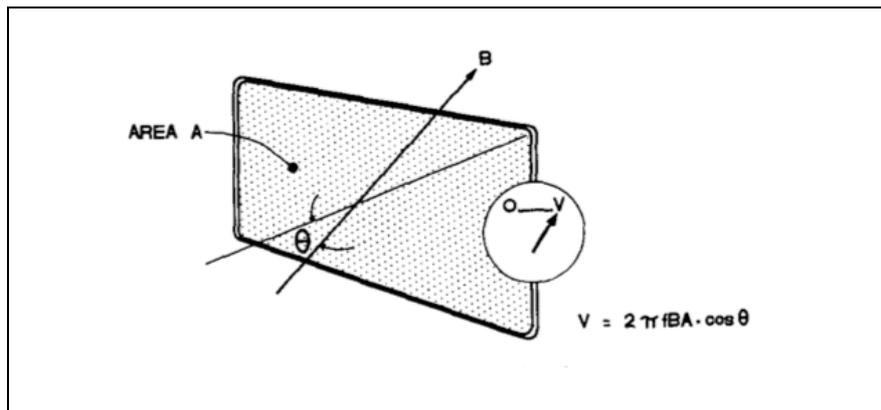


Abb. 2.4: Faraday'sches Gesetz¹²

An der genannten Formel kann man ablesen, dass die induzierte Spannung von der Frequenz f , der Stärke und dem Einfallswinkel des Magnetfeldes sowie der von der Leiterschleife überstrichenen Fläche abhängig ist. Frequenz und Stärke der magnetischen Wellen sind in den seltensten Fällen beeinflussbar und um ohne weitere Hilfsmittel wie Schirmung des Leiters eine Reduktion der Einstreuungen zu erreichen kann also nur die Leiterschleife verkleinert oder der Winkel der Schleife zum Emitter optimiert werden¹³. Eine echte Schirmung ist im Frequenzbereich von Audiosignalen nur durch eine aufwändige Isolierung mit hoch-permeablen Materialien möglich. In den meisten Fällen ist dies jedoch zu aufwändig.

Elektromagnetische Felder

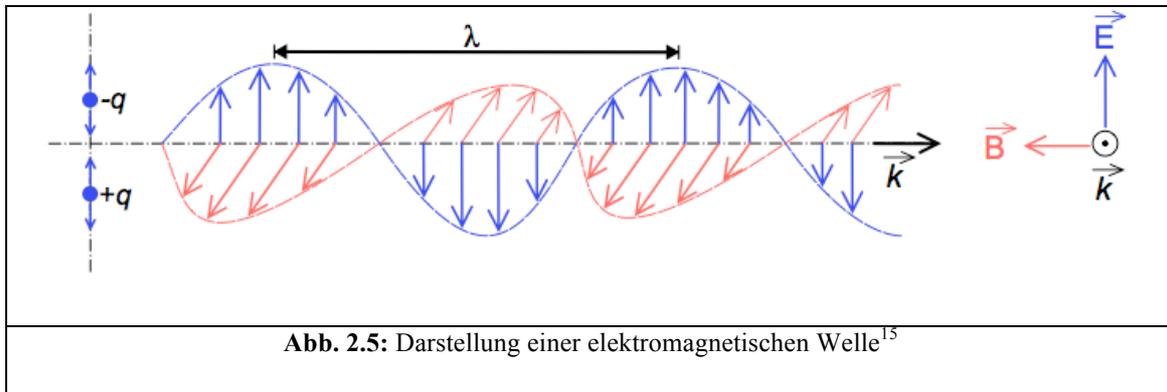
Eine elektromagnetische Welle ist „eine Welle aus gekoppelten elektrischen und magnetischen Feldern“¹⁴. Mathematisch kann man sie als das Vektorprodukt des

¹² Grafik entnommen aus [7]

¹³ Beim Schaltungsdesign ist oftmals bekannt welches Bauteil für die magnetischen Einstreuungen verantwortlich ist. Dementsprechend können die Leitungen mit Bedacht auf Störungssicherheit verlegt werden.

¹⁴ Nach [iQ10]

elektrischen und des magnetischen Feldes betrachten. Zu ihnen zählen Radio-, Handy- sowie Funkwellen die uns heutzutage überall umgeben.



Um Audioverbindungen und Schaltkreise von Einstreuung durch diese Wellen zu schützen kann man eine Schirmung verwenden, die beiden Feldern gerecht wird. Sie muss hochleitend sein, um elektrische Felder abzuleiten, gleichzeitig aber auch möglichst hochpermeabel, damit die magnetischen Anteile das Signal nicht verfälschen.

2.5 Lösungen bei hörbaren Erdschleifen

Die beste Lösung der oben genannten Probleme besteht darin, für eine funktionierende Erdung beider Schaltungen auf dasselbe Potential, sowie für den richtigen Schaltungsentwurf zu sorgen. Zunächst sollten alle Schaltkreise professioneller Geräte an einem Punkt im Gehäuse mit der Betriebs Erde verbunden sein. Hierdurch ist eine studioweit gleiche Referenz gewährleistet wodurch es nicht zu Brummschleifen aufgrund falscher Referenzierung kommen kann.

Diese Lösung beziehen sich allerdings auf den Schaltungsentwurf und kann nur mit großem Aufwand im Nachhinein implementiert werden. Dennoch gibt es auch konkrete Lösungen im laufenden Betrieb der Geräte, die Brummfreiheit gewährleisten können. Eine davon stellt der oft an Geräten vorhandene Groundlift Schalter dar. Grundsätzlich kann man sich des Problems der Brummschleife nämlich entledigen indem man die Schleife an einem geeigneten Punkt unterbricht. Die bereits angesprochene und unter keinen Umständen empfehlenswerte Variante des Schutzleiter Abklebens stellt zwar eine funktionierende Möglichkeit in diesem Sinne dar, es besteht jedoch eine nicht

¹⁵ Grafik entnommen aus [iQ11]

tolerierbare Lebensgefahr für den Nutzer! Sicherer und legal sind deshalb nur die folgenden Lösungen:

Um die Schleife zu unterbrechen besitzen viele Geräte einen besonderen Schalter, der meist mit Groundlift bezeichnet ist. Durch diesen Schalter kann die Verbindung des Audioreferenzpotentials zur Betriebs Erde unterbrochen werden. Man erkennt in der folgenden Darstellung eines solchen Groundlift (Abb. 2.6), dass das Gehäuse aber weiterhin über den Schutzleiter geerdet ist und somit keine Gefahr für den Benutzer entsteht. Der Groundlift kann als unterbrechender Schalter oder als zuschaltbarer Widerstand ausgeführt sein. Die Audioerde des rechten Gerätes ist damit direkt über den Kabelschirm mit der Referenz des linken Gerätes verbunden, wodurch beide Geräte auf dasselbe Audioreferenzpotential gezogen werden. Als problematisch kann sich hierbei allerdings ein defekter Kabelschirm erweisen, da in diesem Fall das Gerät mit betätigtem Groundlift eine vollkommen andere Audioerde als das verbundene Gerät besitzt und dies mit großer Sicherheit zu Brummen führt.

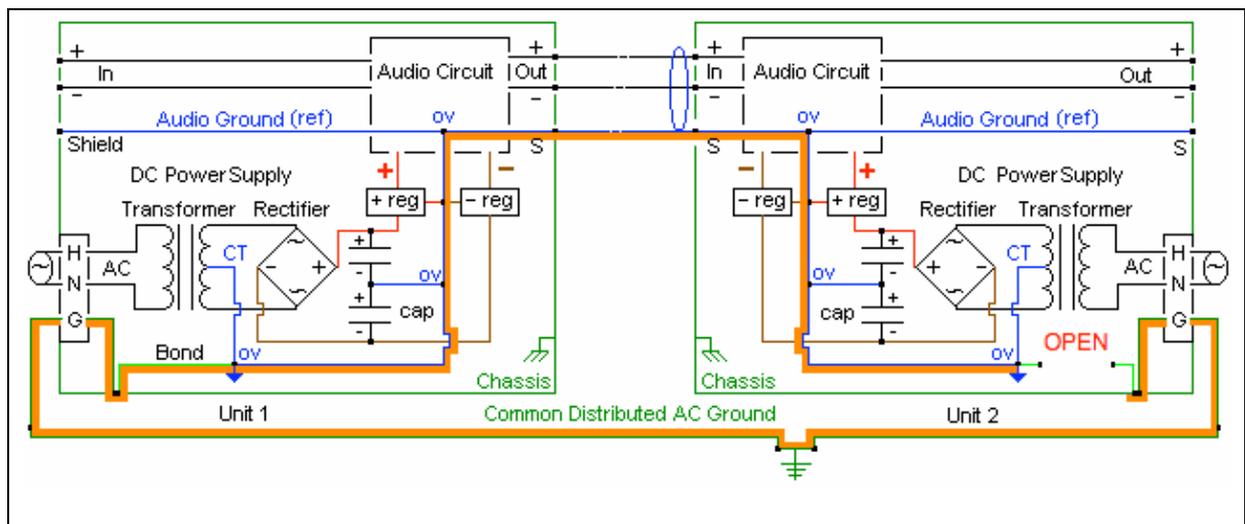


Abb. 2.6: Unterbrechung der Erdschleife durch die Verwendung eines Groundlift¹⁶

Wenn keines der Geräte einen solchen Groundlift Schalter besitzt und größere Modifikationen am Audioschaltkreis nicht vorgenommen werden sollen, kann man sich mit einer weiteren Lösung behelfen. Indem man die Schirmung am Eingang eines

¹⁶ Grafik entnommen aus:

http://pws.prserv.net/SGhome/gndtss/pages/s2_sol3.htm [iQ15]

Gerätes durchtrennt¹⁷, wird die Schleife unterbrochen. Die Schirmung des Kabels ist durch die einseitige Erdung weiterhin intakt und die Audioreferenzpotentiale werden auf dieselbe Betriebs Erde gezogen. Beide Geräte referenzieren auf dasselbe Bezugspotential und es können keine Geräusche durch Potentialunterschiede entstehen. Wichtig ist hierbei natürlich, dass beide Audioerden trotzdem mit der Betriebs Erde verbunden sind, da sich ansonsten unterschiedliche Referenzpotentiale ausbilden.

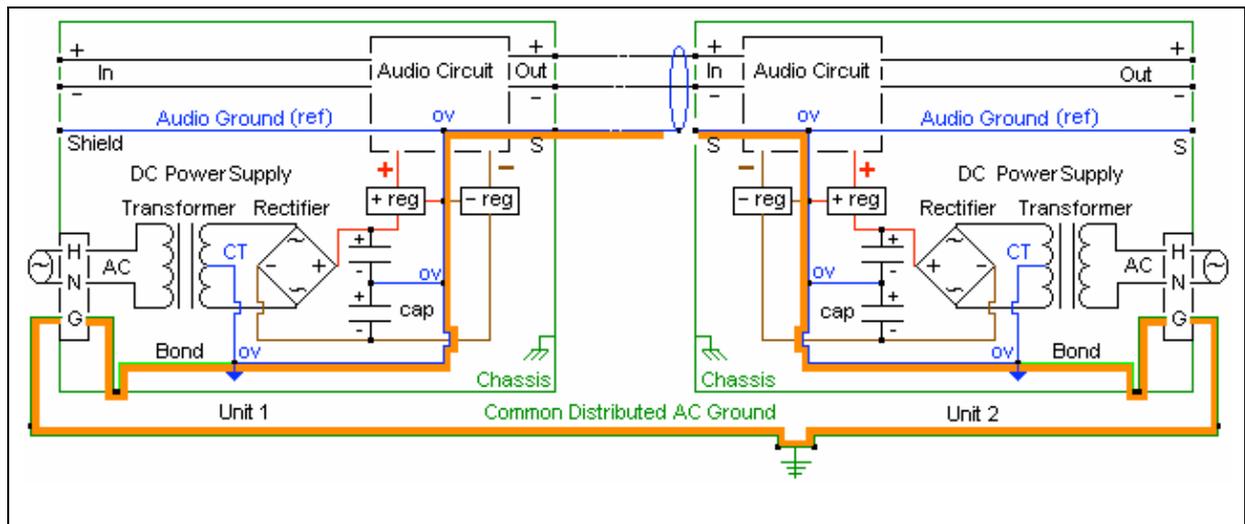


Abb. 2.7: Unterbrechung der Erdschleife durch Durchtrennen des Kabelschirmes¹⁸

¹⁷ Anstatt das Kabel zu durchtrennen bietet es sich an, die Erdung an einem Stecker nicht zu belegen.

¹⁸ Grafik entnommen aus:
http://pws.prserv.net/SGhome/gndtss/pages/s2_sol5.htm [iQ15]

3. Systemweite Erdungskonzepte für Audiosysteme

Bisher wurde in der Arbeit nur auf die Verbindung zweier Geräte und die hierbei entstehenden Probleme eingegangen. Dabei wurde davon ausgegangen, dass für die Audiogeräte eine stabile und sichere Betriebserde besteht. Um dies zu gewährleisten muss man sich jedoch bereits beim Aufbau eines Studios grundlegende Gedanken über ein Erdungskonzept machen, um Probleme unterschiedlicher Betriebspotentiale und die hierdurch entstehende Störgeräuschgefahr zu vermeiden. Auch Probleme wie das „common impedance coupling“ können mit einem guten Erdungskonzept vermieden werden. Die Erdung sollte zudem eine sichere Stromversorgung in einem Haushalt ermöglichen. Der auf Betriebserde liegende Schutzleiter leitet eventuell entstehende Fehlströme zwischen dem Schaltkreis und dem Gehäuse sicher ab und verhindert somit Verletzungen. Außerdem kann die Betriebserde als Referenz eines Schaltkreises verwendet werden.

Bei empfindlichen Geräten wie Audioequipment, muss zusätzlich penibel auf die Stabilität sowie eine geringer Impedanz der Erdung geachtet werden. Stabilität ist wichtig, um eine korrekte Referenzierung aller Audioschaltkreise auf ein Bezugspotential zu ermöglichen. Sollten diese unterschiedlich sein, können durch fließende Ausgleichsströme Störgeräusche wie Brummen oder Summen entstehen. Die Impedanz hat über das Ohmsche Gesetz Einfluss auf die Stärke einer eventuell auftretenden Ausgleichsspannung. Nach dem Ohm'schen Gesetz ($U = Z \cdot I$) folgt, dass durch eine Erhöhung der Impedanz die abfallende Störspannung und somit auch ein eventuelles Störgeräusch ansteigt.

Für die Verwendung von sensiblen Geräten haben sich deshalb spezielle Erdungskonzepte, auf die ich im Folgenden eingehen möchte, als sinnvoll erwiesen.

3.1 Isolierte Sternerdung

Die isolierte Sternerdung ist das weitaus am häufigsten verwendete Konzept zur Erdung von sensiblem Audioequipment. Sie wird aufgrund ihrer Komplexität meist bei fest installierten Systemen angewendet. Die Idee besteht darin, alle Erdreferenzpotentiale in

nur einem Punkt der Schaltung zusammenzuführen. Dieser Punkt wird als „technische Erde“ (technical ground) des Systemes bezeichnet. Er ist als einziger Punkt mit der echten Erdung des Stromnetzes verbunden. Durch die folgende Grafik soll das Prinzip der Sternerdung im Gegensatz zur üblicherweise gebräuchlichen Serienerdung verdeutlicht werden.

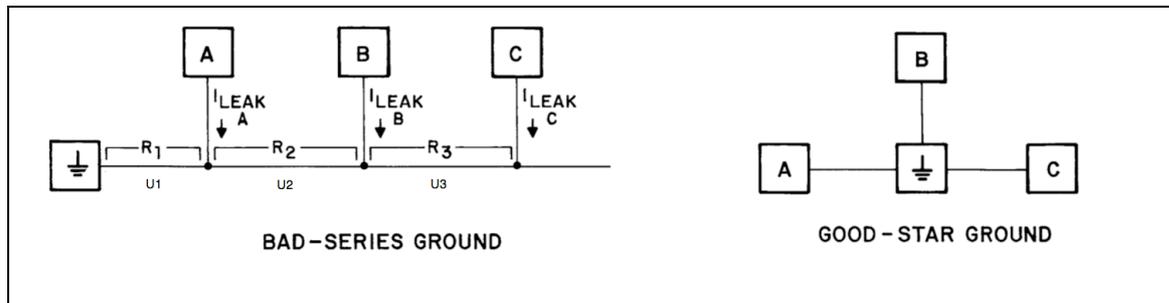


Abb. 3.1: Vergleich einer Serienerdung (Daisy-Chain) und Sternerdung¹⁹

Das augenscheinliche Problem der Serienerdung ist, dass zwischen den einzelnen Geräten unterschiedliche Kabelimpedanzen bestehen. Wird nun beispielsweise ein auf den Kabelschirm induzierter Strom über die Erdung abgeleitet, so fällt nach dem Ohm'schen Gesetz eine Spannung über die entsprechende Impedanz ab.

$$U_3 = R_3 \cdot I_{leakC}$$

$$U_2 = R_2 \cdot (I_{leakA} + I_{leakB})$$

$$U_1 = R_1 \cdot (I_{leakA} + I_{leakB} + I_{leakC})$$

Zwischen den Geräten bestehen also bei einem Störstrom Potentialunterschiede. Hierdurch kann bei der Zusammenschaltung zweier Geräte über Audioverbindungen ein Ausgleichsstrom fließen. Diese Ausgleichsströme können wie bereits erwähnt als Brummen oder Summen wahrnehmbar sein.

Bei der Sternerdung wird hingegen jeder Schutzleiter direkt mit der technischen Erde verbunden. Alle, durch Kabelimpedanzen entstehende Spannungen werden direkt auf das Erdpotential gezogen, so dass zwischen den Geräten kein Potentialunterschied verbleibt. Die folgende Abbildung 3.2 zeigt eine einfache Implementation der isolierten Sternerdung.

¹⁹ Grafik entnommen aus [5]

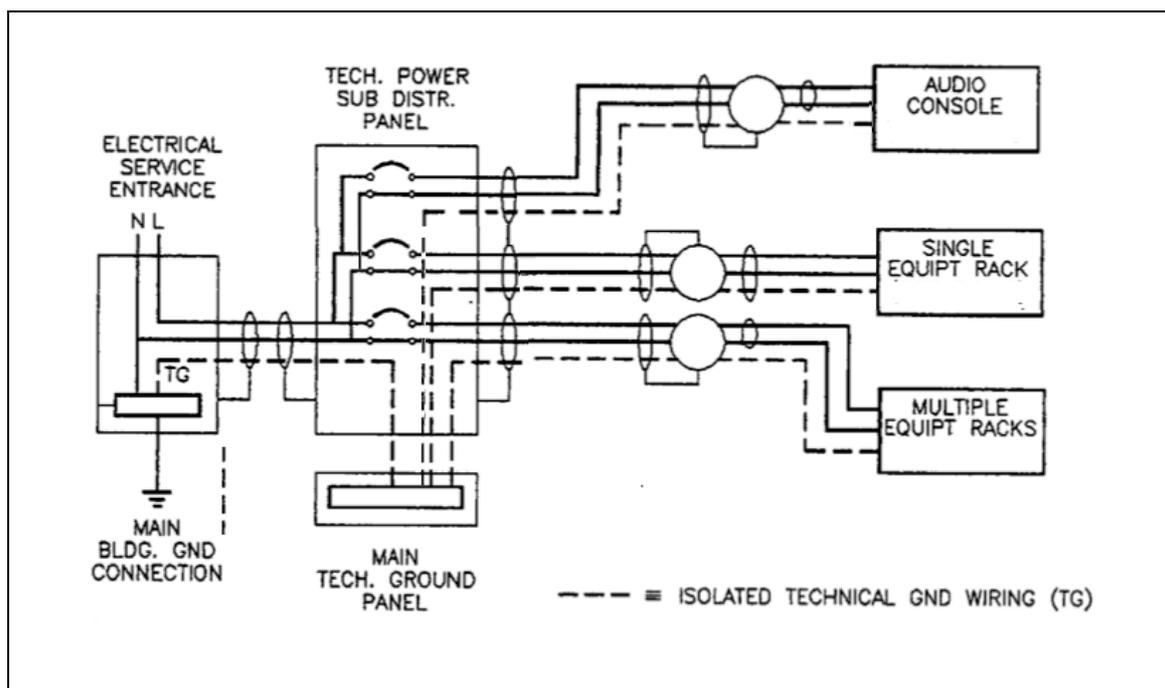


Abb. 3.2: Prinzip der isolierten Sternerdung²⁰

Während die stromführenden Leiter die Geräte seriell mit Strom versorgen können, müssen die jeweiligen Schutzleiter parallel zur technischen Haupterde (Main Tech. Ground Panel) geführt werden. Jedes serielle Verschalten der Schutzleiter führt unweigerlich zu einer Serienschaltung der Erdleiter und zu unterschiedlichen Referenzpotentialen²¹ (vgl. Abb. 3.1).

Die „Technische Erde“ selbst ist eine von der Umgebung isolierte Erdungsplatte die als einziger Punkt über ein ausreichend dimensioniertes Kabel (siehe [4]) mit der „echten“ Erde des Stromnetzes verbunden wird. Häufig sind solche technischen Haupterder auch in ältere Analogmischpulte zu finden. In [5] wird aus diesem Grund vorgeschlagen, das Mischpult als Ausgangspunkt der technischen Erde zu verwenden. Dies wirkt sich positiv auf den SNR des Mischpultes aus, da jeder Einfluss auf die Audioreferenz der Verstärker eben diesen vergrößert.

²⁰ Grafik entnommen aus [4]

²¹ In herkömmlichen Haushalten werden die Schutzleiter wie die stromführenden Leitern üblicherweise seriell an Steckdosen angeschlossen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, Erdungskonzepte für Audioeinrichtungen bereits in der Planungsphase eines Gebäudes mit zu berücksichtigen.

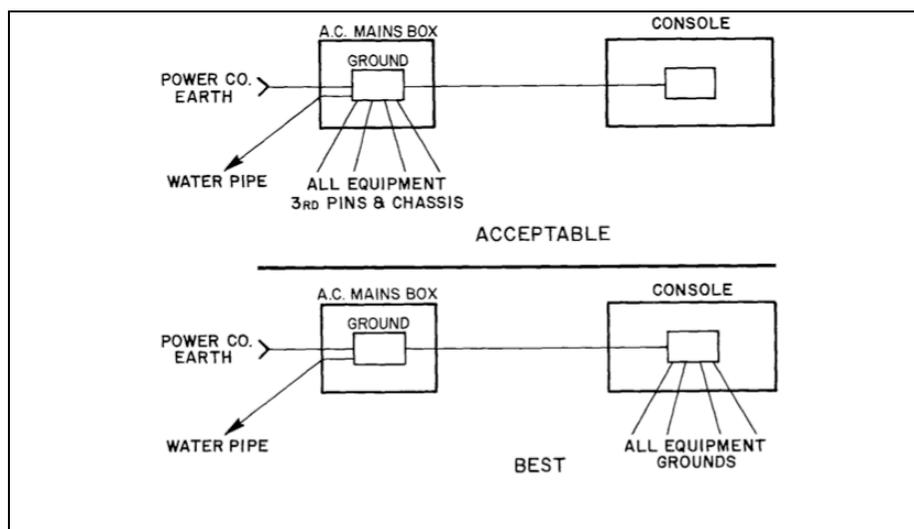


Abb. 3.3: Verwendung des Mischpultes als technischen Erder²²

Dieses Vorgehen ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn sich alle Geräte relativ nahe beieinander befinden. In einem großen Studiokomplex mit mehreren Räumen ist es meist viel zu kompliziert die Erdungen aller Geräte auf nur einer Erdungsplatte zusammenzuführen. Dieser Problematik lässt sich mit einer Erweiterung des oben gezeigten Schaltbildes entgegenzutreten (s. Abb. 3.4). Es können zusätzlich regionale Referenzpotentiale eingeführt werden, auf die alle Schutzleiter und Erdungskabel des jeweiligen Raumes bezogen werden. Auch diese Erder müssen isoliert von ihrer Umgebung ausgeführt werden und über ein einziges Kabel mit der systemweiten technischen Erde verbunden werden. Durch diese Konstruktion werden alle Schutzleiter parallel auf das Erdepotential bezogen. Da alle regionalen Erder ihrerseits wiederum parallel auf die technische Haupteerde bezogen werden, kann es an keinem Punkt des Systems zu Potentialunterschieden kommen. Dies ist wichtig, damit die Möglichkeit besteht, Audioverbindungen auch zwischen den unterschiedlich geerdeten Räumen zu installieren.

In der Praxis ist es zweckmäßig, die technische Haupteerde im zentralen Maschinenraum²³ zu installieren. Alle dort betriebenen Geräte können direkt auf das technische Hauptreferenzpotential geerdet werden. Die regionalen Erder können dann in den jeweiligen Räumen installiert werden.

²² Grafik entnommen aus [5]

²³ Als Maschinenraum wird in Audioeinrichtungen der Raum bezeichnet, in dem sich alle lauten Geräte befinden. Außerdem stellt er oft den zentralen Verteilungspunkt aller Signale dar.

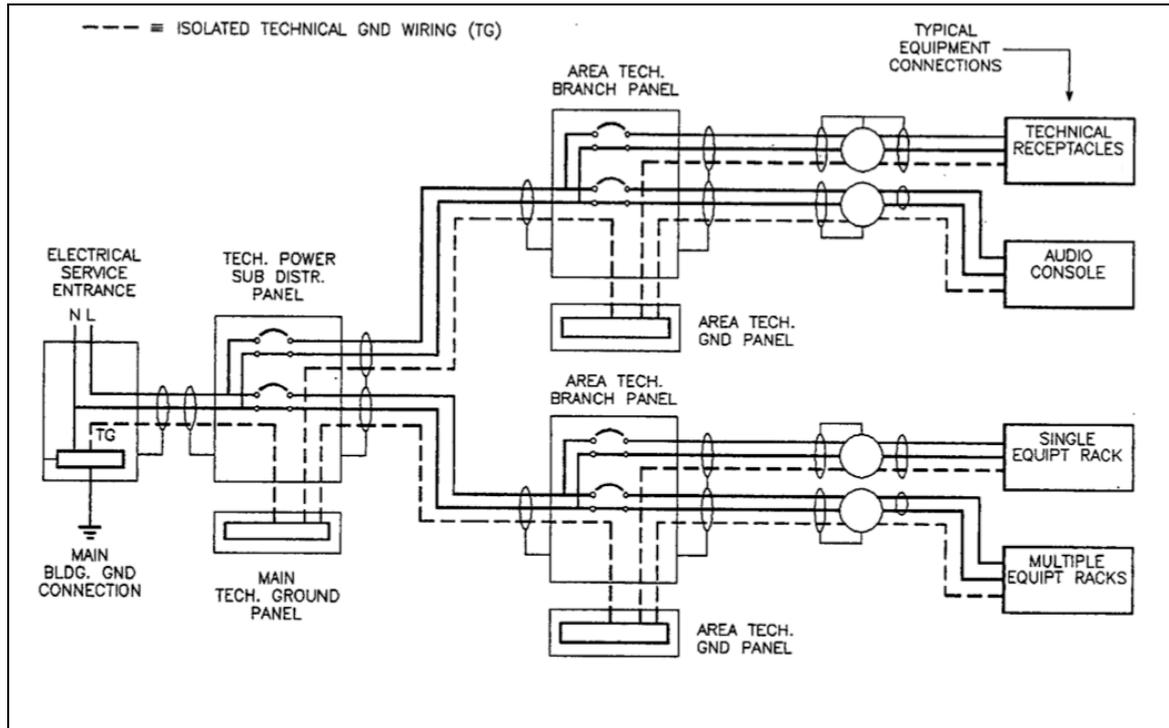


Abb. 3.4: Erweiterung der isolierten Sternerdung²⁴

Selbstverständlich sollten auch komplexere Strukturen betrachtet werden. In [4] werden auch Beispiele für die adäquate Erdung von Studioracks beschrieben. Gerade im Rack befinden sich sehr viele Geräte deren Schutzleiter einzeln zu diesem Punkt geführt werden müssen.

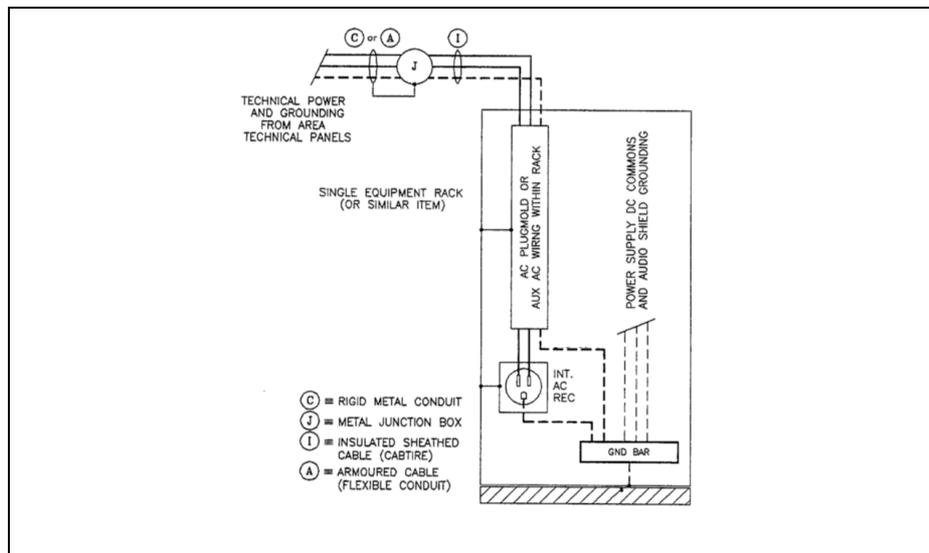


Abb. 3.5: Korrekte Erdung eines Studioracks

²⁴ Grafik entnommen aus [5]

Wie in Abb. 3.5 dargestellt ist es in diesem Fall ist es sinnvoll, die Sternerdung ein weiteres Mal zu verzweigen und innerhalb eines oder mehrerer Racks einen weiteren Erdungspunkt zu installieren. Prinzipiell müssen hierbei wieder die oben genannten Regeln angewendet werden und darauf geachtet werden, dass keine Serienschaltungen der Erdleiter entstehen.

3.2 Mehrpunkterdung

Bei dieser Art der Erdung kann es, wie der Name schon vermuten lässt, mehrere Erdungspunkte geben. Im Gegensatz zu dem bei der Sternerdung angebotenen einzelnen Punkt wird dieser zu einer Äquipotentialfläche erweitert. Alle Geräteerdungen müssen auf dem kürzest möglichen Weg mit dieser Fläche verbunden werden, die selbst wiederum mit der „echten Erde“ des Energieversorgers verbunden ist. Statt eines einzigen definierten Erdungsweges (Sternerdung) bestehen in diesem Fall unendlich viele Möglichkeiten, die Geräte zu erden. Die Äquipotentialfläche kann entweder als leitende Matte oder aber als verzweigtes Gitternetz implementiert werden. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass die Maschengröße so klein wie möglich wird, um das Gitter einem massiven Erder anzunähern.

Allerdings besteht in der Realität das Problem, dass bei dem ausgebreiteten Leiterpunkt nicht davon ausgegangen werden kann, dass es sich tatsächlich um eine äquipotentiale Fläche handelt, da zwischen zwei an unterschiedlichen Punkten angebrachten Erdungen in jedem Fall ein vom Weg durch die Erdplatte abhängigen Widerstand entstehen wird. In diesem Fall kann es leicht zu dem in Kapitel 2.2 bereits besprochenem „impedance coupling“ kommen und Störgeräusche in den Signalweg induziert werden. Eine korrekte Installation ist außerdem außerordentlich komplex, da sicher gestellt sein muss, dass der Erder an keinem Punkt einen Masseschluss mit dem Gebäude oder anderen Systemen hat. Dies würde unweigerlich zu einer Verschmutzung des Referenzpotentials führen.

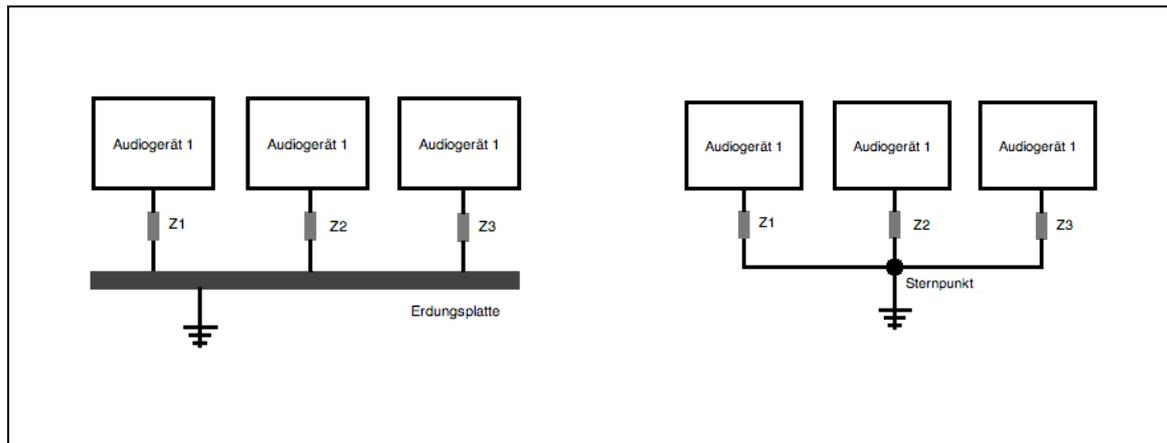


Abb. 3.6: Vergleich der Mehrpunktterdung mit der Sternerdung

Trotz der genannten Nachteile kann es Situationen geben, in denen eine Mehrpunktterdung Sinn macht. Gerade bei portablen Systemen kommt es häufig vor, dass der Aufbau des Equipment durch fachfremdes Personal durchgeführt wird. Mit einer Erdmatte und vorinstallierten Anschlüssen kann aber auch in diesem Fall, ohne dass Wissen über die Erdungsthematik vorhanden ist, eine geräuschfrei funktionierende Erdung ermöglicht werden.

3.3 Trennung der Erdenpotentiale

Eine Erweiterung der bisher genannten Systeme für eine störungsfreie Erdung stellt die Auftrennung der unterschiedlichen Referenzpotentiale dar. So sollte beispielsweise das technischen Erdenpotential der Audioschaltung von der zum Schutz vor Fehlströmen bestehenden Gehäuse- und Schutzterde getrennt werden. Hierfür werden alle Audioreferenzpotentiale auf eine gesonderte technische Erde, die Gehäuse der entsprechenden Geräte aber über den normalen Schutzleiter des Netzes geführt. Für die Audioerde wird ein vollkommen neues Referenzpotential geschaffen. Dadurch soll vermieden werden, dass es in der zur Audioreferenzierung dienenden Erde durch Einstreuungen auf die Kabelschirme oder Fehlfunktion von Geräten überhaupt zu Leckströmen kommen kann. Wenn die Audioreferenz vollkommen frei von diesen Strömen ist, kann es theoretisch zu keinem Potentialunterschied und somit keinen geräuschverursachenden Ausgleichsströme zwischen den Geräten kommen. Ein weiterer Grund ist, dass die vom Energieversorger angebotene Erdleitung meist zusammen mit mehreren Haushalten oder aber auch von anderen, das Erdenpotential

verschmutzende Geräten genutzt wird²⁵. Eine Modulation dieser Referenz kann unter Umständen auch die Erde des Audiosystems beeinflussen und hörbare Artefakte verursachen. Durch die vollständige Isolierung des Audioreferenzpotentials kann man diesen Einflüssen vorbeugen. Im folgenden Bild ist das Prinzip der Erdtrennung grafisch dargestellt.

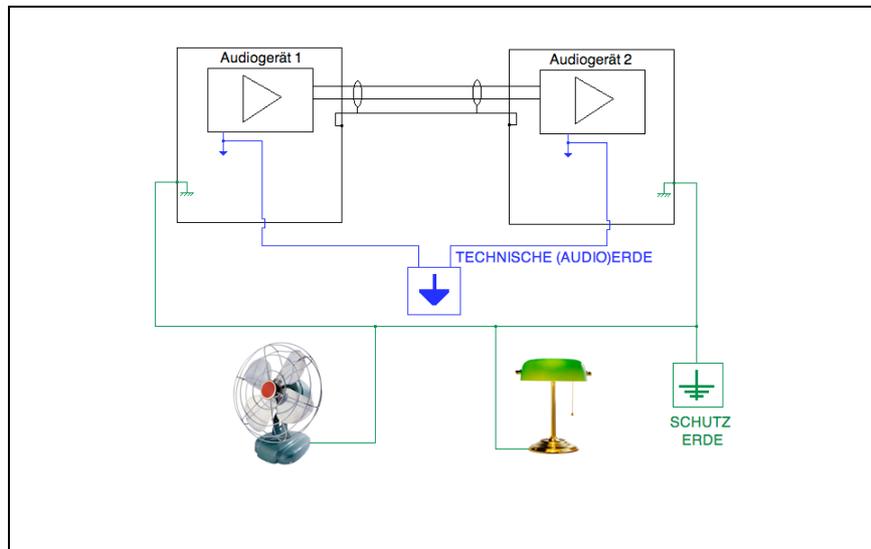


Abb. 3.7: Erdtrennung

Auch wenn in dieser Anordnung theoretisch keine auf den Kabelschirm induzierten Ströme in die technische Audioerde gelangen sollten, ist es dennoch sinnvoll, die Referenzpotentiale sternförmig in einem Punkt zusammenlaufen zu lassen oder eine Mehrpunkterdung zu verwenden. Sollte ein Gerät durch mangelhaftes Schaltungsdesign oder größere Fertigungstoleranzen Leckströme in die Audioerde emittieren, können auch hier Potentialunterschiede zwischen den Geräten vermieden werden.

Die Audioerde wird mit einem der in Kapitel 1.2 genannten Systeme, unabhängig von der Schutz Erde des Stromnetzes, geerdet. Exemplarisch möchte ich die in [6] beschriebene „Erdung mittels Erdspeiben“ kurz erläutern. Für eine funktionierende Erdung muss der Erdanschluss sehr gut, der Übergangswiderstand der Elektroden in das Erdreich also sehr klein sein. Wäre dies nicht der Fall, würde eine Spannung am Erder abfallen. Um solch einen niedrigohmigen Erder zu erhalten, müssen mehrere Erdspeibe verwendet werden, die, um Umwelteinflüsse wie zu trockenem und damit schlecht

²⁵ Gerade Klimaanlage oder Beleuchtungseinrichtungen mit Neonröhren sind bekannt für ihre Einstrahlungen ins Stromnetz und die Schutz Erde. Auf die Einstrahlungen auf die stromführenden Leiter werde ich an einem späteren Punkt noch eingehen.

leitendem Boden zu vermeiden, in mindestens 4 m Abstand voneinander installiert werden. Die Spieße werden mit einem großzügig dimensionierten Kupferkabel verbunden und bilden einen Anschlusspunkt (Terminal) für die Audioerde. Die folgenden Grafiken der Abbildung 3.8 verdeutlichen diesen Sachverhalt. Oben ist eine mögliche Ausführungsform eines Erdspießes aufgezeigt, unten die Zusammenschaltung eines Arrays von Spießen.

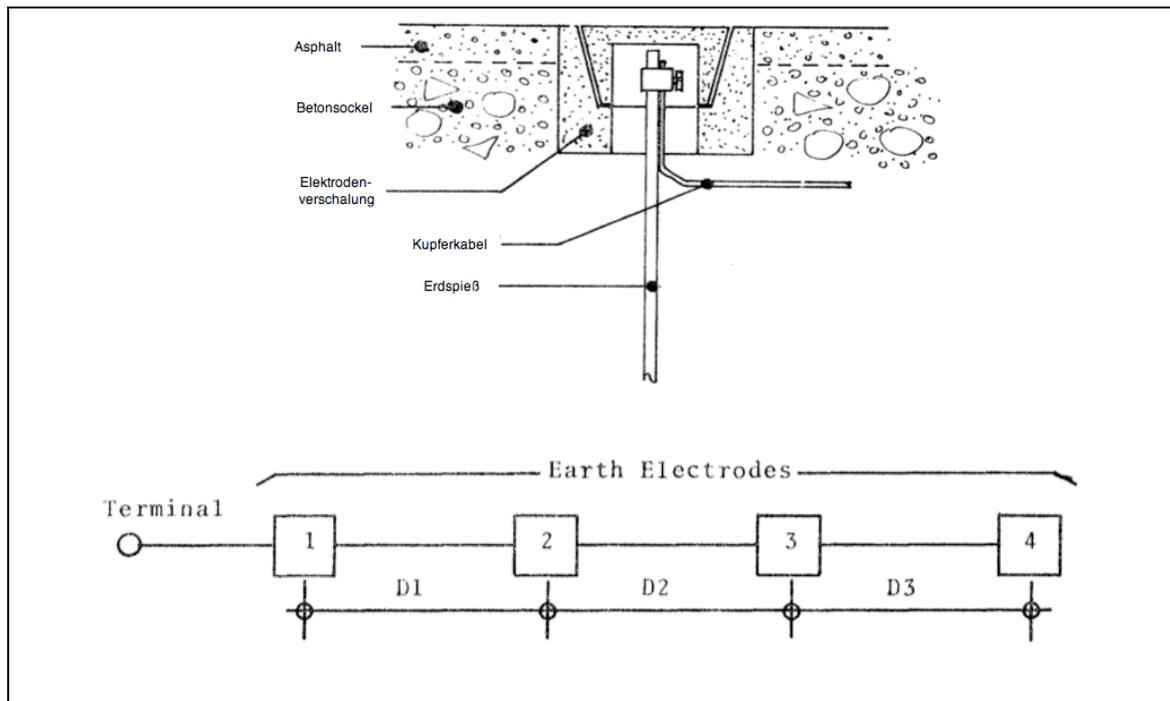


Abb. 3.8: Erdung mittels Erdspeisen²⁶

Für komplexen Audioinstallationen kann es sogar nötig sein, mehr als zwei Erdsysteme zu verwenden. Bei komplexen Tonsystemen mit integrierten Videoarbeitsplätzen können beispielsweise Audio und Video voneinander isolierte technische Erden zugewiesen werden, um zu Verhindern, dass systemspezifische Einstreuungen systemübergreifende Störströme auslösen können.

²⁶ Grafiken entnommen aus [6]

4. Stromversorgung in Tonstudios

Die Stromversorgung eines Tonstudios bedarf einer grundlegenden Planung und Konzeption, da eine gute Versorgung für den störungsfreien Betrieb unabdingbar ist. Allein um für die Audioversorgung eine technische Erdung erstellen zu können muss das Audiostromnetz vom restlichen Netz getrennt werden. Dies sollte spätestens im Sicherungskasten des Haushaltes geschehen. Durch eine in Abbildung 4.1 dargestellten zu einfache Konzeption lässt sich jedoch nur die Erdung vom restlichen Stromnetz abtrennen und diese oftmals auch nur unzureichend (siehe Kapitel 3.3).

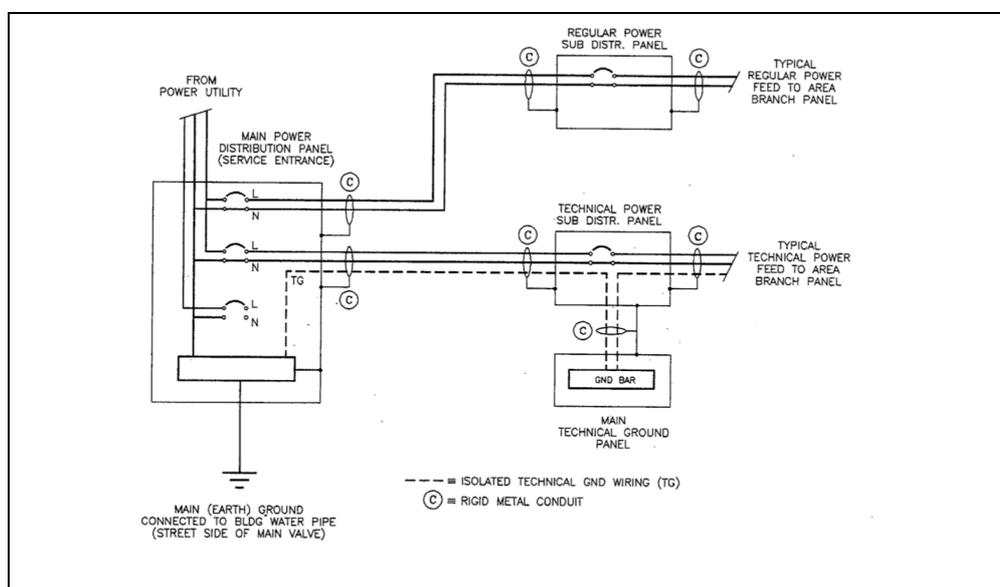


Abb. 4.1: Stromverteilung im Sicherungskasten²⁷

Als problematisch erweist sich, dass im Stromnetz häufig Störungen auftreten, die gerade bei sensiblen Audiogeräten zu hörbaren Artefakten führen können. Diese Störungen lassen sich wie folgt unterteilen:

- *Spannungsschwankungen des Netzstromes*

Durch die Belastungsänderungen die während eines Tagesablaufes auf das Stromnetz einwirken, kann es zu mehr oder weniger starken Schwankungen der Versorgung kommen. Die Spannung kann hierbei in kritischen Gegenden²⁸ um

²⁷ Grafik entnommen aus [4]

²⁸ Kritische Gegenden sind in diesem Fall Orte, in deren Nähe sich starke Verbraucher befinden wie beispielsweise die Nähe von großen Elektromotoren oder Industriegebieten.

bis zu 10% schwanken. Da sich solche eine Änderungen direkt auf die Betriebsspannung der Geräte auswirken (bei einer zu starken Erhöhung kann es sogar zu einem Geräteschaden kommen), sollten sie so gut als möglich unterbunden werden.

- *Mittel- und hochfrequente Einstreuungen durch elektrische Geräte*

Durch Schaltvorgänge emittieren viele Geräte Spannungsspitzen in das Stromnetz. Die maximal erlaubte Emission eines Gerätes ist zwar gesetzlich geregelt, durch die Menge an Geräten entstehen aber dennoch signifikante Störungen im Netzstrom. Diese können wie auch die Spannungsschwankungen die Schaltkreise von Audiogeräten hörbar beeinflussen. Als besonders kritisch gelten in diesem Fall Stromkreise die mit Lichtdimmern, (defekten) Halogentrafos oder Klimaanlage in Kontakt kommen. Das wohl bekannteste Geräusch, das Knacken beim Einschalten eines Gerätes kann jedoch theoretisch von jedem Schalter verursacht werden. Unglücklicherweise gehören aufgrund ihrer pulsierenden Arbeitsweise oft auch CD oder DVD Geräte zu den Geräten, die Störungen in das Stromnetz zurückreflektieren. Dies ist besonders kritisch, da sich diese Geräte meist im direkten Verbund mit dem restlichen Tonequipment befinden. Eine Lösung hierfür bieten die in Kapitel 4.3 beschriebenen passiven Netzfilter, die den Einfluss auf den Netzstrom mindern.

- *Gleichstromanteile*

Manche elektrischen Geräte , wie haushaltsübliche Geräte wie Staubsauger oder Föhns, können einen Gleichstromanteil in das Netz emittieren. Gleichstromanteile können beispielsweise den Wirkungsgrad von Lautsprechern rapide vermindern, da die Membran durch einen gleichmäßigen Stromanteil durchgängig ausgelenkt wird und der Betriebspunkt des Chassis somit von vornherein näher am Nichtlinearen Bereich liegt. Gleichstromanteile können an den entscheidenden Stellen mittels Trenntransformatoren, deren Windungszahlen auf Primär- und Sekundärseite gleich sind, gelöst werden.

- *Einflüsse elektromagnetischer Strahlung*

Die im Haus verlegten Stromkabel wirken durch ihre Eigenschaften als Leiter wie eine große Antenne. Elektromagnetische Wellen, wie sie von Radiostationen, Handys oder Mobilfunkmasten ausgesendet werden, können „empfangen“ und auf den reinen Sinus des Stromnetzes aufmoduliert werden. Es entstehen hochfrequente Anteile im Strom die gelegentlich als Ursache eines „grellen, unruhigen Klangbildes“²⁹ angeführt werden.

- *Natürliche Einflüsse*

Auch Blitzeinschläge oder andere natürliche elektrische Phänomene können zu Spannungsstörungen im Netzstrom führen.

All diese Einflüsse können zu hörbaren Störungen im Tonbetrieb führen. Um eine störfreie Audioumgebung zu ermöglichen sollte in professionellen Einrichtungen nicht nur die Erdung sondern auch die Stromversorgung der Audiogeräte von den restlichen Geräten des Gebäudes getrennt werden. Hierdurch können die innerhalb des Stromkreises eingespeisten Störungen von den Audiogeräten ferngehalten werden. Um die bereits im Stromnetz vorhandenen Einflüsse zu mindern gibt es zahlreiche Konzepte, wobei gerade bei dieser Thematik der Grat zwischen highfidelem Placeboeffekt und belegbaren Ingenieurlösungen sehr schmal ist. Ich möchte im folgenden Lösungen vorstellen, die sich der Problematik mehr oder weniger global nähern um durch das Stromnetz entstehende Störgeräusche zu vermeiden.

4.1 Netzspannungskonstanthalter

Da schon geringe Abweichungen der Netzspannung und des Stromes zu größeren Schwankungen der Leistung führen³⁰ sollte einer konstanten Spannungsversorgung verstärkt Aufmerksamkeit geschenkt werden. Um Schwankungen des Stromnetzes auszugleichen können sogenannte Spannungskonstanthalter verwendet werden. Die Geräte funktionieren prinzipiell auf zwei unterschiedliche Weisen:

²⁹ http://www.fl-electronic.de/live_connection/netztricks.html [iQ19]

³⁰ Der Zusammenhang zwischen Leistung und Spannung ist durch $P=U \cdot I$ gegeben. Wenn sich nun Spannung und Strom um 10% verringern, so verringert sich die Leistung bereits um 19%.

Regelung mit Stelltransformator

Diese mechanische Nachregelung der Spannung erfolgt mit einem Transformator, dessen Windungsverhältnis während des Betriebes durch einen kleinen Motor verändert werden kann. Ein Schleifkontakt kann auf der sekundären Windungsseite verschoben werden und die den Windungszahlen entsprechende Spannung abgreifen. Durch die Verwendung der mechanischen Elemente ist die Regelung zwar relativ langsam, dafür aber äußerst verlust- und verzerrungsarm.

Magnetische Regelung

Für die magnetischen Nachregelung bildet eine Drossel und ein Kondensator einen Schwingkreis der nach einen Transformator geschaltet wird. „Bei der Stabilisierung der Spannung wird das Sättigungsverhalten des Eisenkernes der Spule ausgenutzt.“³¹ Dieser magnetische Regler arbeitet zwar schneller als der Stelltransformator, dies jedoch nur in einem schmalen Regelbereich und hier auch nicht so genau wie dieser. Bedingt durch die nicht durchgängig lineare Hysteresekurve des Eisenkernes kommt es außerdem zu nichtlineare Verzerrungen.

Trotzdem besitzt ein magnetischer Netzspannungskonstanthalter gegenüber der mechanischen Version einen Vorteil. Durch die Verwendung eines Schwingkreises kann kurzfristig elektrische Energie gespeichert werden und so kurzfristige Netzausfälle (Wellenlängenbereich) kompensiert werden.

4.2 Auftrennung der Stromkreise

Wie oben bereits angesprochen können elektrische Geräte die Stromversorgung verunreinigen indem sie (Blind-) Leistungsanteile zurück in das Netz reflektieren. Um eine Beeinflussung des Audiostromkreises zu unterbinden bietet es sich zunächst einmal an, die Stromversorgung in unterschiedliche Versorgungskreise aufzutrennen. Hierbei kann unterschiedlich vorgegangen werden:

³¹ <http://de.wikipedia.org/wiki/Spannungsregler>

4.2.1 Nutzung der unterschiedlichen Phasen

Wie in Kapitel 1.1 beschrieben handelt es sich bei dem Stromanschluss eines Gebäudes um ein Dreiphasensystem bei dem, um eine gleichmäßige Auslastung zu gewährleisten, die drei Phasen gleichmäßig zwischen allen Steckdosen eines Haushaltes aufgeteilt werden. Man kann diese Aufteilung aber auch für die Trennung in einen Audiostrom sowie einen normalen Strom nutzen. Hierfür wird eine der Phasen nur für Audiogeräte reserviert und die beiden anderen zwischen den Steckdosen aufgeteilt. Selbstverständlich kann man eine weitere Phase nur für Videogeräte und die dritte für den üblichen Strom nutzen. Man muss sich bei der Installation und auch im späteren Betrieb des Audiosystemes aber strikt an die getroffene Trennung halten da der positive Effekt bereits durch ein störendes Gerät verloren gehen kann.

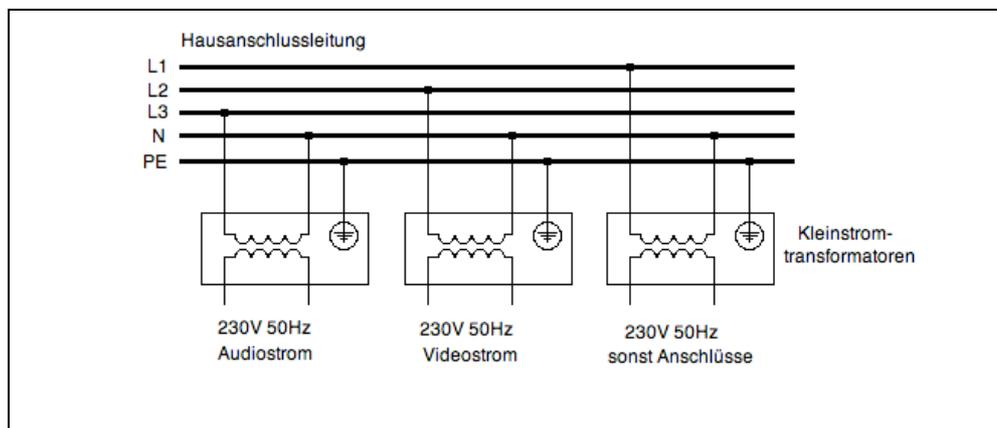


Abb. 4.2: Nutzung der drei Phasen zur Trennung der Stromkreise

Der Nachteil dieser Variante besteht darin, dass Störungen die außerhalb des Haushaltes auf das Stromnetz einwirken nicht verhindert werden können. Um solche Probleme zu lösen muss das System um die ab Kapitel 4.3 vorgestellten Filterlösungen erweitert werden. Dies macht auch die zweite Methode der Tonstromtrennung.

4.2.2 Isolierte Tonstromversorgung

Wie in Abbildung 4.1 dargestellt, kann bereits im Sicherungskasten ein Zweig nur für den Audiostrom reserviert werden. Eine reine Abzweigung genügt hierbei jedoch nicht, da Störungen auch über den zentralen Verteilerpunkt zurückgespiegelt werden können. Wenn das System jedoch von den störenden Verbrauchern „abgekapselt“ wird, kann mit

Hilfe der im folgenden Kapitel beschriebenen Geräte der Strom von Verunreinigungen befreit werden und eine „saubere“ Tonstromversorgung gewährleistet werden.

4.3 Netzfilter

Bei Netzfilter handelt es sich meist um mehr oder weniger komplizierte Tiefpässe aus Kondensatoren und Induktivitäten. Es wird zwischen passiven und aktiven Netzfiltern unterschieden. Passive Netzfilter sollen die von einem Gerät emittierten Störungen daran hindern in das Stromnetz zu gelangen. Sie befinden sich direkt am Gerät oder in der Steckerleiste des entsprechenden Gerätes. Aktive Filter sorgen hingegen dafür, dass die über das Netz übertragenen Störungen (elektromagnetische Störungen oder Einstreuungen von Geräten) nicht zu den Geräten gelangen können. Ist man sich sicher dass keines der studiointernen Geräte Störströme in das Netz zurückspiegelt, so kann es genügen, einen einzigen aktiven Netzfilter an den Beginn der Verbraucherkette zu installieren um den vom Netzbetreiber gelieferten Strom zu optimieren.

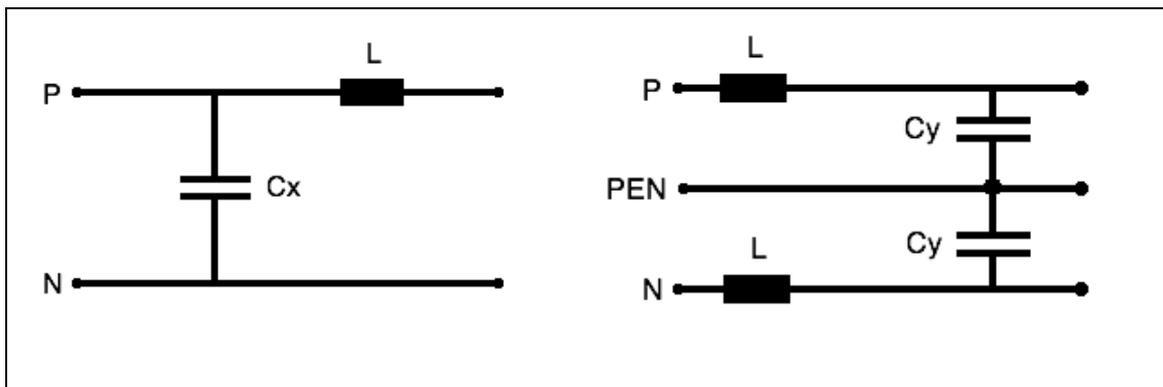


Abb. 4.3: Passiver und aktiver Netzfilter

In Abbildung 4.3 ist sowohl das Schaltbild eines passiven, als auch das eines aktiven Netzfilters skizziert. Bei beiden Filtern werden hohe Frequenzen durch den Kondensator kurzgeschlossen ($X_C = \frac{1}{\omega C}$) und auf die entsprechende Erde, bzw. den Neutralleiter abgeleitet. Im Gegensatz hierzu erhöht sich bei der seriell geschaltete Spule der Widerstand bei steigenden Frequenzen ($X_L = \omega L$). Es handelt sich also um einen Tiefpass zweiter Ordnung. Die Grenzfrequenz der Filter ist durch die Dimensionierung der Bauteile bestimmt. Hierbei ergeben sich jedoch technische Grenzen für die Bauteile. Da sich die Spulen seriell im Stromkreis befinden, müssen sie für den Maximalstrom ausgelegt werden, wodurch sie viel Platz verbrauchen und das

Gewicht extrem erhöhen können. Bei den Kondensatoren muss hingegen auf eine ausreichende Spannungsfestigkeit geachtet werden.

Wie bereits angedeutet kann ein einziger aktiver Netzfilter zur Unterdrückung externer Störungen und der Erzeugung eines „sauberen“ Tonstromes genügen. Es kann jedoch auch der Fall eintreten, dass ein aktiver Netzfilter zu einer signifikanten Verschlechterung des Tonstromes führt. Da die Bauteile des Filters die Impedanz zum Netz hin verändern, können die von Geräten emittierte Störströme in einem durch einen Netzfilter geschützten System nur noch stark vermindert in das Netz abgeleitet werden. Als Resultat werden die nach dem Filter geschalteten Geräte noch stärker durch die Strommodulationen beeinflusst. Abhilfe kann hier nur ein passiver Netzfilter am entsprechend „verschmutzenden“ Gerät schaffen.

Ein positiver Nebeneffekt von Netzfiltern besteht darin, dass kurze Spannungsspitzen aus dem Netz durch die Speicherfähigkeit der Bauteile aufgefangen werden können und über mehrere Perioden abgemildert an die Geräte weitergegeben werden. Für einen erweiterten Überspannungsschutz sollte jedoch auf spezielle Überspannungsschutzschaltungen zurückgegriffen werden.

4.4 Überspannungsschutz

Auch wenn durch die Implementation einen Überspannungsschutz keinerlei Klangverbesserung zu erreichen ist, so ist es in einem Tonstudio mit seiner kostspieligen Ausstattung an elektronischen Geräten dennoch wichtig, gegen Überspannungen abgesichert zu sein. Aus diesem Grund möchte ich an dieser Stelle kurz auf einen wirksamen Überspannungsschutz eingehen.

Die häufigste Ursache für Überspannungen im Netz sind Blitzschläge, die in bis zu 2km Entfernung eine Überspannung im Netz zur Folge haben. Geräte die diesen Überspannungen ausgesetzt werden nehmen aufgrund der erhöhten Spannung oft an ihren empfindlichsten Bauteilen Schaden, was nicht unmittelbar durch einen Ausfall des betroffenen Gerätes, wohl aber durch eine signifikante Klangverschlechterung offenbar wird. Um das Equipment eines Audiosystem hiervor zu schützen sollte also auf jeden Fall möglichst früh in der Stromversorgung ein Überspannungsschutz installiert werden.

Dieser wird heute meist mit Varistoren aufgebaut. Hierbei handelt es sich um spannungsabhängige Widerstände, deren Wert sich ab einer bestimmten Schwellspannung innerhalb von nur einer Nanosekunde signifikant verringert (siehe Abb. 4.4)

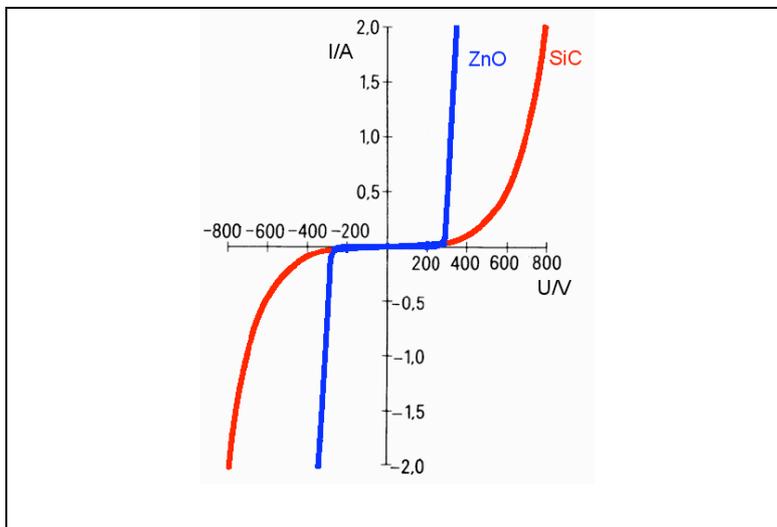


Abb. 4.4: Kennlinie von Varistoren aus verschiedenen Materialien³²

Durch diese Eigenschaft können mit Varistoren sehr einfach Schutzschaltungen aufgebaut werden bei denen eine Überspannung über eine mit einem Varistor gesicherte Erdung abgeleitet wird. Sobald eine Überspannung anliegt wird dieser niederohmig und die Überspannung wird direkt auf die Erde abgeleitet und die Geräte damit geschützt.

³² Grafik entnommen aus [iQ13]

5. Zusammenfassung

Im folgenden Kapitel sollen die erzielten Erkenntnisse kurz zusammengefasst werden und eine grobe Vorgehensweise zum korrekten Aufbau eines Audiosystems aufgezeigt werden. Es sollte jedoch beachtet werden, dass es sich hierbei um eine theoretische Darstellung handelt. In der Praxis kann es notwendig sein, bestimmte Punkte abzuwandeln oder vollkommen zu streichen.

- 1) Eine gute Audiostromversorgung beginnt bereits beim Stromanschluss. Wenn die Möglichkeit besteht sollte beim Netzversorger ein eigener Anschluss nur für den Tonstrom beantragt werden. Dies ist jedoch in der Praxis selten möglich, da sich Tonstudios o.ä. häufig in Bürokomplexen oder aber mit anderen Parteien innerhalb eines Gebäudes befinden und man sich somit einen Hausanschluss teilen muss. In diesem Fall sollte das Tonstromnetz jedoch möglichst früh im System abgezweigt werden. Der Hausanschluss ist hierfür der frühestmögliche Punkt den es zu nutzen gilt. Eine eventuelle Auftrennung der Phasen sollte direkt nach diesem Anschluss implementiert werden.
- 2) Direkt nach dem Netzanschluss sollte im Allgemeinen die Aufbereitung des Netzstromes folgen. Dies sollte noch vor der Implementation einer technischen Erde erfolgen, da eventuelle Störspannungen auf diese abgeleitet und das Erdpotential negativ beeinflussen würden. Wenn alle in Kapitel 4 genannten Komponenten verbaut werden, so empfiehlt sich die Reihenfolge Trenntransformator, Spannungskonstanthalter und nachfolgend der Netzfilter (aktiv).
- 3) Als nächstes erfolgt der Aufbau der technischen Erde. Grundsätzlich wird man sich in den meisten Fällen für eine Sternerdung entscheiden, da diese einfach und nachvollziehbar zu implementieren ist. Auch eine eventuelle Aufteilung der Erdpotentiale wie in Kapitel 3.3 beschrieben, sollte an diesem Punkt der Planung berücksichtigt werden. Nach diesem Schritt besteht eine sehr gute Strom- und Erdungsversorgung für ein Audiosystem. Sollten nach dem erfolgreichen Testen dieser Grundversorgung Problemen mit Störgeräuschen auftreten, so kann man davon ausgehen, dass es sich um Komplikationen handelt, die durch den Gerätepark verursacht werden.

- 4) Solche Komplikationen können durch die in Kapitel 2 beschriebenen mangelhaften Schaltungsdesigns von Audiogeräten auftreten. Um diese zu lösen muss man wie beschrieben die entstandene Erdschleife entweder durch die Implementation einer korrekten Erdung oder durch einen möglichen Groundlift Schalter unterbrechen.

Wenn die hier aufgezeigten Punkte bei dem Aufbau eines Audiosystems eingehalten werden, so sollte es innerhalb dieses Systems zu keinen hörbaren Erdungsproblemen mehr kommen.

6. Quellenverzeichnis

- (1) Neil Muncy
„*Noise Susceptibility in Analog and Digital Signal Processing Systems*“
JAES Volume 43 Issue 6 pp. 435-453; June 1995
- (2) Stephen R. Macatee
„*Considerations in Grounding and Shielding Audio Devices*“
AES Convention 97 (Nov. 1994) Paper No 3916
- (3) R.Morrison
„*Noise and Other Interfering Signals*“
Wiley, New York, 1992
- (4) Atkinson, Giddings
„*Grounding Systems and Their Implementation*“
JAES Volume 43 Issue 6 pp. 465-471; June 1995
- (5) Hay, Thomas M.
„*Differential Technology in Recording Consoles and the Impact of Transformerless Circuitry on Grounding Technique*“
AES Convention 67 (Oct. 1980), Paper No 1723
- (6) Edward J. Veale
„*Studio Earthing Systems*“
AES Convention 50 (March 1975), Paper No. L-55-2
- (7) Fause, Kenneth R.
„*Fundamentals of Grounding, Shielding, and Interconnection*“
JAES Volume 43 Issue 6 pp. 498-516; June 1995
- (8) Philip Giddings
„*An Introduction to Electromagnetic Compatibility (EMC) and Electromagnetic Interference (EMI) for Audio System Designers*“
JAES Volume 37 Issue 7/8 pp. 570-585; July 1989

Wikipedia

[iQ1] <http://de.wikipedia.org/wiki/Einphasenwechselstrom> (Zugriff 28.12.2008)

[iQ2] <http://de.wikipedia.org/wiki/Dreiphasenwechselstrom> (Zugriff 6.01.2009)

[iQ3] <http://de.wikipedia.org/wiki/Erdung> (Zugriff 6.01.2009)

[iQ4] <http://de.wikipedia.org/wiki/Brummschleife> (Zugriff 6.01.2009)

- [iQ5][http://en.wikipedia.org/wiki/Ground_loop_\(electricity\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Ground_loop_(electricity)) (Zugriff 6.01.2009)
- [iQ6]http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_interference (Zugriff 11.01.2009)
- [iQ7]http://en.wikipedia.org/wiki/Multipoint_ground (Zugriff 12.01.2009)
- [iQ8]<http://de.wikipedia.org/wiki/Spannungsregler> (Zugriff 13.12.2009)
- [iQ9]<http://de.wikipedia.org/wiki/Stelltransformator> (Zugriff 13.12.2009)
- [iQ10]http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrisches_Feld (Zugriff 16.04.2009)
- [iQ11] http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische_Welle (Zugriff 18.04.2009)
- [iQ12] <http://de.wikipedia.org/wiki/%C3%9Cberspannungsschutz> (Zugriff 18.04.2009)
- [iQ13] <http://de.wikipedia.org/wiki/Varistor> (Zugriff 18.04.2009)

Weitere verwendete Links

- [iQ14]<http://www.rane.com/note110.html> (Zugriff 4.01.2009)
- [iQ15]<http://pws.prserv.net/SGhome/gndtss/pages/contents.htm> (Zugriff 2.01.2009)
- [iQ16]<http://www.weidezaun.info/weidezaun/HTML/Erdung.htm> (Zugriff 11.02.2009)
- [iQ17]<http://www.jamboraudio.de/PSaudio.htm> (Zugriff 17.01.2009)
- [iQ18]http://www.sunshine.it/index.php?option=com_content&task=view&id=7665&Itemid=400 (Zugriff 18.01.2009)
- [iQ19]http://www.fl-electronic.de/live_connection/netztricks.html (Zugriff 13.02.2009)