

## **Hochfrequenzstörungen, der unterschätzte Störenfried bei der audiophilen Musikwiedergabe** (Ralf Koschnicke / ACOUSENCE, 2016)

*Im Allgemeinen noch immer massiv unterschätzt wird der Einfluss von hochfrequenten Störsignalen auf die Musikanlage. Solche Störungen werden heute eigentlich von jedem digital arbeitenden Gerät produziert, insbesondere von schlecht konzipierten Schaltnetzteilen, Computern, Mobilfunk und WLAN. Finden diese Störungen ihren Weg in die Audioelektronik, können diese durch Überlagerung mit den analogen Signalen zu Klangverschlechterungen führen. In digitalen Stufen bewirken HF-Störungen erhöhten Jitter und diese Taktschwankungen beeinflussen dann auf recht komplexe Art und Weise das analoge Ergebnis bei der DA-Wandlung.*

Jeder Computer und Mikrocontroller, oder eigentlich jedes Digitalgerät, produziert solche Signale in hohen Frequenzbereichen, die aus Sicht der Audioelektronik eigentlich Störsignale sind. Zu Beginn des Digitalzeitalters glaubte man, Einflüsse der Übertragungstrecke wären nun für immer überwunden. Es werden ja nur „Nullen und Einsen“ übertragen und solange diese auf der anderen Seite richtig ankommen, ist alles korrekt. Übersehen wurde allerdings, dass elektrisch übertragene Digitalsignale auch nur aus analogen Strömen und Spannungen bestehen. Da nun allerdings mindestens der Anfang und das Ende einer Audioübertragungstrecke immer analog sein müssen – Instrumente sind „analoge Technik“ und die menschliche Hörwahrnehmung funktioniert auch analog – interagieren diese digitalen Signale mit den analogen.

Besonders tückisch wird diese Interaktion nun durch die Beschaffenheit digitaler Signale hinsichtlich ihrer analogen Parameter. Digitale Signale werden in Form von Spannungen mit rechteckförmigem Amplitudenverlauf übertragen. Die Taktraten sind dabei in der Regel sehr hoch und durch die hohe Flankensteilheit eines Rechtecks gibt es einen hohen Anteil an Oberwellen. Die Frequenzbereiche bewegen sich selbst zwar meist weit jenseits des menschlichen Hörbereichs, diese Signale können aber trotzdem auf vielfältige Weise auf die Audioqualität einwirken. Besonders komplex wird die ganze Sache, weil solche hochfrequenten Signale nicht mehr an physikalisch vorhandene Leiter gebunden sind und in Form von elektromagnetischer Strahlung auch über die Luft übertragen werden. Jedes Stück Kabel kann dabei grundsätzlich als Antenne oder als Sender arbeiten; insbesondere wenn nicht perfekt geschirmt. Dann genügt ein kleiner Spalt, um ins Gehäuse zu gelangen. Ebenso werden diese Störungen aber auch über Signalkabel und die Stromanschlüsse übertragen. Und dann ist aus Sicht der analogen Audiosignale auch ein perfektes Digitalsignal eigentlich ein Störsignal. Alles in allem sind alle in einem Computer oder Mikrocontroller generierten Signale Störsignale für Audiotechnik. Erst einmal im Inneren des Audiogerätes, können diese Störsignale dann wieder Wege abseits physikalisch vorhandener Leiter nehmen. Somit darf man grundsätzlich von hochkomplexen Wechselwirkungen zwischen Computern, Digitalsignalen und Analogtechnik ausgehen. Die meisten Diskussionen über den Klang verschiedener Computer bzw. von Optimierungsmaßnahmen jeglicher Art an Computern sind auf genau dieses Problemfeld zurückzuführen, ebenso sicher auch ein Teil von Diskussionen über Kabelklang.

## **„Klang“ beim Computer und von Netzwerkkomponenten**

Für eine bestmögliche Musikwiedergabe muss somit die Wechselwirkung von HF-Störungen mit der Audioelektronik vermieden werden. Bei den analogen Stufen heißt das möglichst EMV-gerechtes Gerätedesign und entsprechende Verkabelung. Ein großes Problem sind diesbezüglich die in Heimanalgen so weit verbreiteten unsymmetrischen Audioverbindungen.

Im Digitalbereich helfen ausgeklügelte Übertragungskonzepte. Denn von richtiger Datenübertragung in Bezug auf die Daten selbst darf man heute bei allen Geräten ausgehen, sofern keine Defekte vorliegen. Wenn die Daten aber korrekt übertragen werden, kann nur die Taktqualität für Klangveränderungen verantwortlich sein. HF-Störungen generieren Jitter und diese Taktschwankungen verursachen komplexe Veränderungen am Analogsignal.

### **Afi(s)+USB**

Bei heutigen USB-Interfaces oder anderen Digitalschnittstellen werden die Daten also in der Regel richtig übertragen. Das kann durch Bitvergleich mit dem Originalsignal leicht überprüft werden. Außerdem erzeugt fast jedes USB-Interface oder eine in den DA-Wandler integrierte USB-Schnittstelle ihren Referenztakt theoretisch unabhängig vom Computer selbst; asynchrone Anbindung. Die unzähligen Diskussionen über Klangeinflüsse von Computern und von Optimierungsmaßnahmen an Hard- und Software sind nun eindrucksvoller Beleg, dass diese unabhängige, asynchrone Erzeugung des Referenztaktes nur in der Theorie wirklich unabhängig ist. Wenn die Daten richtig sind und trotzdem Klangunterschiede existieren, bleiben in rein digitalen Geräten – beispielsweise USB-Interfaces mit Digitalausgang – nur HF-Störungen, die den theoretisch unabhängigen Takt dann doch beeinflussen, als Erklärung.

Unser ausgeklügeltes Übertragungskonzept beim USB-Modul für Afis und Afi zielt nun darauf, diese HF-Störungen möglichst vollständig aus der Audiosignalverarbeitung herauszuhalten. Dabei sind mehrere Punkte entscheidend:

1. USB ist heute zwar die gängigste Schnittstelle, um Audiogeräte mit einem Computer zu verbinden; zumindest im Heimbereich. Aber USB ist eigentlich die denkbar schlechteste Schnittstelle dafür, weil sich USB nicht galvanisch trennen lässt. Eine galvanische Trennung ist zwar – wie oft fälschlicherweise angenommen – noch kein Allheilmittel gegen HF-Störungen. Aber dies ist ein wichtiger Bestandteil, um die Entstörung überhaupt erreichen zu können. Weil das aber nun nicht möglich ist, werden in hohem Maße alle im Computer generierten Störungen zum USB-Interface übertragen. Deshalb das kleine externe USB-Modul fern von der Audioelektronik.
2. Auch eine USB-Schnittstelle arbeitet mit einem Mikrocontroller und solche Prozessoren sind heute zum Teil schon enorm leistungsfähig, was wieder hohes Störpotential bedeutet. Auch deshalb ist die USB-Schnittstelle im externen USB-Modul untergebracht und somit weit entfernt von der Audioelektronik.
3. Das externe USB-Modul wird per Lichtwellenleiter mit dem eigentlichen Audiogerät Afi oder Afis verbunden. Diese Verbindung gewährleistet perfekte galvanische Trennung, maximale Störunterdrückung und völlige Immunität gegen Störeinstrahlung, und sie strahlt ebenso garantiert nicht selbst ab. Diese LWL ist in 2m und in 6m Länge erhältlich. Somit kann der Computer mit dem externen USB-Modul auch sehr einfach räumlich von der Audioelektronik getrennt werden. Entfernung ist der einfachste Schutz gegen Störeinstrahlung.

4. Der für die DA-Wandlung so entscheidende Takt wird nun unter optimalen Bedingungen, frei von Störeinflüssen aus Richtung Computer und frei von Störeinflüssen seitens der USB-Schnittstelle selbst im Afi bzw. Afis generiert. Das vom USB-Interface per Lichtwellenleiter ankommende Audiosignal wird dann auf Basis dieses Präzisionstaktes neu getaktet und ist somit frei von jeglichen Einflüssen aus Richtung Computer. Die Lichtwellenleiterverbindung schützt vor Störeinstrahlung und der Takt wird im Afi bzw. Afis erzeugt. Das Digitalsignal das nun vom Ausgang des Afi bzw. Afis zum DAC gesendet wird, besitzt eine optimale Taktqualität, und enthält keine vom Computer oder der USB-Schnittstelle kommenden HF-Störungen mehr, die im DA-Wandler die Taktbasis beim Wandlungsprozess stören könnten oder direkt die analogen Stufen.

**Fazit: Wesentliches Merkmal das Afi(s)+USB damit von allen anderen Lösungen unterscheidet ist die vollständige Trennung der Computertechnik inkl. USB-Schnittstelle von der Audioelektronik und damit eine außergewöhnlich gute Unterdrückung von HF-Störungen aus Richtung Computer. Eine direkte Wechselwirkung mit der empfindlichen Audioelektronik wird damit weitgehend unterbunden.**

#### **FAQ – häufig gestellte Fragen:**

- Leistet ein galvanischer Isolator für die USB-Schnittstelle nicht genau das Gleiche wie Afi(s)+USB

Nein. Galvanische Trennung ist zwar eine gute Basis für eine Störkopplung, aber nicht zwingend alleine ausreichend. Je nach Beschaffenheit des Koppel-elementes gilt die physikalische Trennung beider Seiten nur für einen bestimmten Frequenzbereich. Bei höheren Frequenzen koppeln dann aber trotzdem wieder Anteile durch. Deshalb ist unser Netzwerkisolator GISO beispielsweise auch sehr viel effektiver als die in Netzwerkschnittstellen sowieso eingebauten Übertrager. Die Kopplung bei hohen Frequenzen ist deutlich geringer. Bei USB kommt aber noch erschwerend hinzu, dass USB immer eine Gleichstromverbindung zum Computer braucht, um die verschiedenen Betriebsmodi umzuschalten. Deshalb ist eine rein passive Entkopplung wie mit dem GISO hier nicht möglich. USB-Isolatoren müssen deshalb wieder relativ viel Logik bzw. kleine Mikrocontroller beinhalten, die diese Umschaltung dann über die Trennelemente hinweg aktiv steuern. Das erklärt auch den verhältnismäßig hohen Preis der USB2.0-Isolatoren. Die Sekundärseite braucht außerdem auch wieder eine eigene Stromversorgung. Entweder ist das ein kleines Schaltnetzteil, das selbst wieder Störungen produzieren kann, oder die Betriebsspannung wird von der Primärseite her gewonnen. Dann können Störungen aber ebenso wieder durchkoppeln. In jedem Fall sind auf der Sekundärseite wieder zwei potentielle Störquellen: Die Mikrocontrollersteuerung und die Spannungsversorgung.

Ganz abgesehen davon bleibt dann ohnehin immer noch die USB-Schnittstelle, also deren kleiner potentiell störender Mikrocontroller, im Audiointerface und somit ist eine dritte Störquelle direkt im Gehäuse des Audiogerätes untergebracht.

Alle drei Einflussgrößen werden durch das Konzept des Afi+USB eliminiert.

- Hört sich alles ganz schön an, die Wiedergabequalität ist auch deutlich besser als ohne Afi(s)+USB, aber trotzdem höre ich noch subtile Unterschiede zwischen USB-

## Kabeln und bei Optimierungen am PC oder externer Spannungsversorgung des USB-Moduls

Das kann vorkommen und ist kein Widerspruch. Ist aber ein Zeichen für elektromagnetische Wechselwirkung des Computers direkt mit anderen Komponenten der Audioanlage. Wie bereits oben gesagt, ist jedes Kabel aus dem Computer kommend potentiell Sendeantenne. Diese elektromagnetische Strahlung wirkt dann auf schlecht geschirmte Teile der Anlage ein. Ganz sicher speist der Computer auch HF-Störungen ins Stromnetz zurück. Diese können über die Stromversorgung andere Audioelektronik beeinflussen. Die Unterbindung des direkten, primären Weges in Richtung des Audiosignalflusses verringert das ganze Problem mit HF-Störungen somit zwar deutlich. Maßnahmen am Computer können das Endergebnis aber trotzdem nochmal etwas abrunden. Wichtig ist ein gut und EMV-gerecht konstruierter Computer; Achtung bei Eigenbauten. Netzfilter sind anzuraten. Und die Verkabelung der Anlage sollte hinsichtlich Schirmung sauber gemacht sein. Wann immer es irgendwie möglich ist, keine unsymmetrischen Verbindungen, bei XLRs den Schirm am Gehäusekontakt anschließen und an Pin 1 nur wenn Geräte anders nicht miteinander funktionieren wollen. Isoliert eingebaute Buchsen sind zwar nützlich zur Vermeidung von Brummschleifen. Aber das ist gleichzeitig immer auch potentielle Eintrittsöffnung für HF-Störungen. Genauso unbedingt ungeschirmte Kabel an Audiogeräten vermeiden! Dann hat man ganz sicher HF im Gerät und solche Phänomene sind vorprogrammiert.

### **Etwas Historie bzw. ein jahrzehntelanger Erkenntnisprozess**

Die Vermeidung des Einflusses von Hochfrequenzstörungen auf die Audioelektronik ist aus meiner Sicht also so enorm wichtig für ein audiophiles Musikerlebnis. So sehr ich persönlich für diese Problematik auch sensibilisiert bin, so vergeht doch trotzdem kaum ein Monat ohne Erlebnisse die wieder einmal belegen, wie empfindlich Audioübertragung diesbezüglich tatsächlich ist. Weite Teile der Branche scheinen dieses Problemfeld aber trotzdem weitgehend zu ignorieren oder nur durch ein „Herumdoktern an Symptomen“ zu behandeln. Wieso also bei mir dieses Augenmerk auf die Problematik?

Nun, ich bin inzwischen über 20 Jahre in der Musikproduktion tätig und habe quasi die Anfänge der Computertechnik im Studio miterlebt. Dieser Wirkmechanismus begleitet mich also diese lange Zeit, auch wenn es zugegeben lange Zeit gebraucht hat, die Phänomene richtig zuzuordnen und dann zu verstehen. Richtig nach vorne gekommen auf dem Weg der Erkenntnis bin ich eigentlich auch erst, seit ich Hardware-Entwicklung betreibe.

Ich erinnere mich nur ungern an die Zeiten, als es in der Studioproduktion mit Computern losging. Es war zwar eine wunderbare Arbeitserleichterung, am Computer den Musikschnitt machen zu können. Später dann sogar an den Mehrspuraufnahmen. Aber spätestens ab dem Zeitpunkt wurde es zum Verzweifeln. Man konnte eigentlich mitverfolgen, wie mit jedem Schnitt das Klangbild matschiger und verhangener wurde. Damals noch Röhrenmonitore und analoge VGA-Kabel. Was habe ich damals alles versucht, damit die Mischung am Ende wieder optimal geklungen hat: Umrechnung der fertigen Projekte in große Gesamdateien, später Ausspielen in Echtzeit auf einen Hardware-Festplatten-Recorder, bevor dann von dort übers analoge Mischpult ohne Computer gemischt wurde. Wie oft habe ich mich bei den Softwareentwicklern beklagt und die haben verständnislos den Kopf geschüttelt.

Um bestmögliche Audioqualität zu erreichen war das Mischpult damals noch analog, genauso viele andere Gerätschaften. Somit gab es viele Geräte und viel Verkabelung die tendenziell offen für HF-Störungen waren. Verschärft wurde die Sache noch dadurch, dass viele Gerätschaften der Analogtechnik in Zeiten entwickelt wurden in denen diese Einflüsse gar nicht existierten. Folglich waren bzw. sind viele dieser alten Geräte aus heutiger Sicht nicht EMV-gerecht konstruiert.

Damals war es so lästig wie unerklärbar. Heute ist das im Nachhinein mit Wissen und Erfahrung hinsichtlich EMV alles klar. Also auch beim Ausspielen der fertigen Schnittprojekte auf den 24-Kanal Festplattenrecorder blieben die Daten zwar identisch. Das war nachprüfbar. Die Festplatten konnte man wieder auslesen und mit dem Original vergleichen. Nur der Rechner, die VGA-Leitung zum Monitor, die Digitalsignalkabel, vermutlich auch der Monitor selbst, haben – auch noch in Abhängigkeit von der Komplexität der Bildschirmdarstellung – ein unterschiedliches Profil an HF-Störungen ausgestrahlt und das verursachte die Klangunterschiede zwischen Computer und Festplattenrecorder. Die Softwareentwickler konnten also wirklich nichts dafür, wenn ihre komplexe Grafik und die sonstigen Vorgänge im Computer den Klang verschlechtert haben. Eigentlich hätte ich damals alles das wissen müssen was ich heute über EMV weiß und alle Studiogerätschaften und die Verkabelung auf Störfestigkeit optimieren müssen; genauso den Computer auf minimale Störstrahlung. Der Festplattenrecorder war damals die Lösung auf andere Art, weil der einfach als schlank konzipiertes Audiogerät deutlich weniger Störstrahlung machte und auch keine Grafikdaten generierte. Im Rückblick war dieser Weg der Erkenntnis sehr mühsam, aber heute profitieren alle unsere Entwicklungen von den seither gewonnenen Erkenntnissen.

### **GISO – erst Filter für AES/EBU, dann Isolator für Netzwerkleitungen**

Der GISO ist entstanden aus einer Lösung fürs Studio, um die 32 Digitalaudio-Verbindungen von unserer großen DAW im Maschinenraum ins Studio zu filtern. Das war die Frühzeit, als ich mit dem Erkenntnisprozess auf den richtigen Weg kam. Ich habe davor wie danach selten solch ein Klangverbesserung mit einer Einzelmaßnahme im Studio erlebt wie mit diesen Trennübertrager-Kästchen, quasi 4 GISO GBs. Schon damals hatte ich diese Übertragerkästchen mit RJ45-Steckern statt Sub-D ausgestattet, weil RJ45 einfach der bessere Stecker für Digitalsignale ist. Als ich dann privat meinen ersten Streamer bekommen habe, habe ich eines dieser Kästchen einfach mal für die Netzwerkleitung verwendet, und siehe da: gleicher Wow-Effekt. Noch etwas optimiert und schon war der GISO geboren.

So könnte ich nun eine nahezu endlose Reihe an Phänomenen aufzählen die alle aufs Gleiche deuten: Das vom Computer abgestrahlte und auf die Audiogeräte einwirkende Störspektrum im Hochfrequenzbereich ist verantwortlich für die allermeisten Klangveränderungen. Denn eines muss klar sein: wenn die Daten bit-identisch sind, gibt es keine weitere Informationsschicht in der irgendeine Klangunterschiede eingepreßt sein können. Solange wir nicht an Paralleluniversen, n-te Dimensionen oder Metaphysik glauben, ist das Fakt. Andererseits kann aber bereits die unterschiedliche Speicherung der Daten auf dem Computer, beispielsweise, ob eng zusammenliegend auf einer leeren Festplatte oder weit verteilt auf einer stark fragmentierten ein unterschiedliches Störspektrum verursachen. Das war gerade in der Anfangszeit mit Computern im Studio sehr eindrucksvoll. Ich habe damals dann nur noch mit Wechselrahmen gearbeitet, damit die Daten im Vergleich zu der Aufnahmereihenfolge nie umgeschichtet wurden. Denn aufgenommen wurde immer auf

einer frischen Platte und folglich waren alle zeitgleich entstandenen Einzelspuren eng beieinander gespeichert. Hat man aber kopiert, wurden alle Spuren getrennt sequenziell kopiert und anschließend musste der Lesekopf ständig quer über die Festplatte, um die zeitgleich benötigten Daten zu suchen. Das verursachte bei der Festplatte mehr Aktion und damit mehr HF-Störungen und genauso im ganzen Rechner, weil viel mehr gepuffert werden musste. Es war dann einfach deutlich mehr Rechnerleistung nötig und das verursachte mehr HF-Störungen.

Im Kleinen ist der Effekt der gleiche, nur eben wesentlich geringer und das ist m.E. genau das was heute die ganzen Diskussionen über Klangverbesserungen durch Optimierungen am Computer nährt. Ein Speicherstick oder eine SSD erzeugen ein anderes HF-Spektrum als eine konventionelle Platte mit Spindelmotor. Ein stark heruntergefahrenes Betriebssystem und ein Computer der gerade noch so viel Leistung hat wie für die Audiowiedergabe benötigt, strahlt weniger Störungen ab als ein Hochleistungsbolide.

### **Derzeit letzte Evolutionsstufe: Afi(s)+USB**

Der Afi(s)+USB ist nun quasi die Konsequenz aus all diesem reichhaltigen Erfahrungsschatz: Der „Störenfried“ Computer kann so möglichst weit weg von der Audioanlage installiert werden und ist bei bestmöglicher Störunterdrückung per Lichtwellenleiter an die Audioanlage angekoppelt. Die Phänomene sind zwar unter Umständen noch nicht völlig verschwunden, weil der Computer als solcher immer noch auf die Anlage einwirken kann, per Strahlung durch die Luft oder übers Stromnetz, rein durch seine Existenz im Raum. Aber die Phänomene sind mindestens um Größenordnungen reduziert und mit etwas Augenmerk auf den verwendeten Computer und – wenn möglich – große Distanz (es gibt auch ein 6 Meter LWL-Verbindung), gehören diese Phänomene ganz der Vergangenheit an. Die meisten Störungen kommen eigentlich über den direkten Pfad durch die Audio-, USB-, oder Netzwerkverbindung. Der Afi+USB sorgt dafür, dass die Audiodaten weitergereicht werden ohne dass ein Störspektrum vom Computer dem Signalstrom mit aufgeprägt ist. Dieser direkte und damit entscheidendste Weg ist nun ideal.