

Ein Kopfhörer mit aktiver Geräuschauslöschung

Kristina Lehtinen von der Kantonsschule Hottingen hat in ihrer Maturarbeit einen Kopfhörer mit aktiver Geräuschauslöschung entwickelt. Dafür wurde sie im letzten November mit dem Jugendpreis der NGZH ausgezeichnet. Wie sie die Funktionsweise dieses Kopfhörers nach und nach entschlüsselte, zeigt sie in diesem Beitrag auf.

Gerade erlebe ich ein kleines Déjà-vu aus der Zeit, als meine Maturarbeit noch ungeschrieben war, Lärm unbekämpfbar schien und ich, wie ich es im Vorwort meiner Maturitätsarbeit ausdrücke, am Sonntagmorgen nach Ruhe lechzend in meinem Zimmer nichts als schlafen wollte. Und jetzt? In einem ziemlich vollen Zug in die Berge, umgeben von Musik und Gesprächen, habe ich zum Glück meine Kopfhörer mit aktiver Geräuschauslöschung mitgebracht, die vielleicht nicht jedes nette Gespräch um mich herum verschwinden lassen, das monotone Rauschen der Schienen aber durchaus auslöschen können.

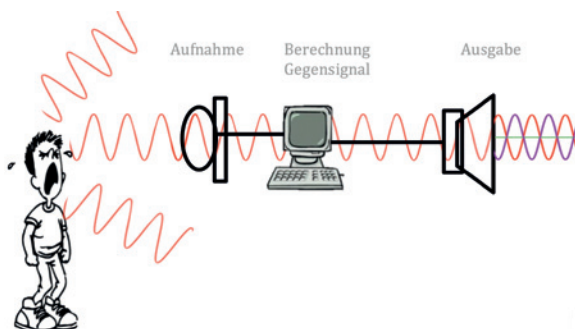
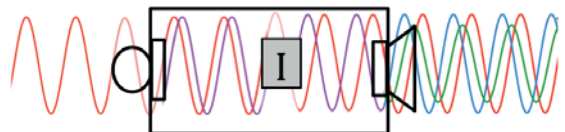
Das physikalische Prinzip dahinter ist die Interferenz, die bei allen möglichen Schallwellen funktioniert. Wenn sich zwei oder mehr Wellen überlagern, addieren sich zu jedem Zeitpunkt die Amplituden der einzelnen Wellen. Verstärken sich die Wellen, spricht man von konstruktiver Interferenz; schwächen sie sich gegenseitig ab, spricht man von destruktiver Interferenz. Wenn man also zwei gegenphasige Sinussignale mit gleicher Amplitude überlagert, resultiert ein Null-Signal.

Dieses Prinzip wird im aktiven Kopfhörer genutzt, um ein Störsignal (rot) auszulöschen. Dazu wird das Störsignal mit einem Mikrofon aufgenommen, in das passende Gegensignal durch Invertieren (graphisch gesehen durch Spiegeln des Störsignals) umgewandelt und schliesslich vom Lautsprecher wiedergegeben (violett).

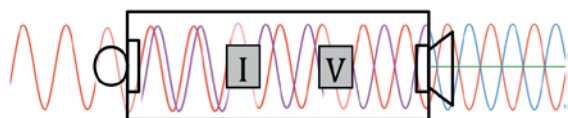
Allerdings breitet sich das störende Schallsignal während der Umwandlung weiter aus; das Aufnehmen, Berechnen und Wiedergeben muss also in einem bestimmten Zeitrahmen funktionieren. Dies ist nur möglich, weil die Schallgeschwindigkeit $v = 340 \text{ m/s}$ beträgt, elektrische Signale aber sozusagen unendlich schnell übertragen werden. So bleiben bei einem Abstand von 3 Zentimetern zwischen Mikrofon und Lautsprecher 88 Mikrosekunden Zeit.

Doch leider ist alles nicht so einfach. Wenn man ein Störgeräusch aufnimmt, wird es im Lautsprecher nämlich stark gedämpft und verzögert wiedergegeben. Die Aufnahme kann also nicht einfach «nur» invertiert werden, um das passende Auslöschungssignal zu erhalten. Man muss zusätzlich auch die Verzögerung und Dämpfung kompensieren.

Um diese beiden Faktoren besser zu verstehen, habe ich in meiner Arbeit Modelle erstellt. Diese sollen die notwendigen Schritte zeigen, wie aus der verzerrten Aufnahme ein auslöschendes Signal wird, dargestellt als Funktionsblöcke.

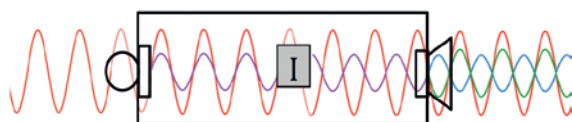


Wird die Verzögerung (als Phasenverschiebung zwischen rotem und violetterem Signal dargestellt) nicht kompensiert, resultiert keine Auslöschung, auch wenn das Signal zuvor im Funktionsblock I invertiert wurde. Um eine Auslöschung zu erreichen, muss die Verzögerung kompensiert werden, im Modell durch

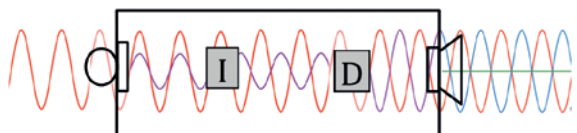


Funktionsblock V dargestellt. Das Mikrofon nimmt nun das Störsignal (rot) auf. Die Aufnahme ist nun ein elektrisches Signal (violett), das gegenüber dem Störsignal entsprechend verzögert und im Funktionsblock I invertiert wird, so dass das Störsignal ausgelöscht wird, wenn das umgewandelte Signal am Lautsprecher ausgegeben wird.

Dieses Modell hat noch die Dämpfung ausser Acht gelassen. Diese entsteht durch verschiedene Eigenschaften des Mikrofons und des Lautsprechers, weshalb sich das ursprüngliche Signal (rot) von dessen Aufnahme (violett) in der Höhe der Amplitude unterscheidet.



Wird die Dämpfung nicht behoben, würde das Störsignal nicht durch die Wiedergabe (blau) des invertierten, aufgenommenen Signals (violett) ausgelöscht. Wird die Dämpfung jedoch kompensiert, d.h. in diesem Fall das aufgenommene Signal (violett) im Funktionsblock D verstärkt, kann die Wiedergabe (blau) des im Funk-



tionsblock I invertierten Signals das Störsignal (rot) aufheben.

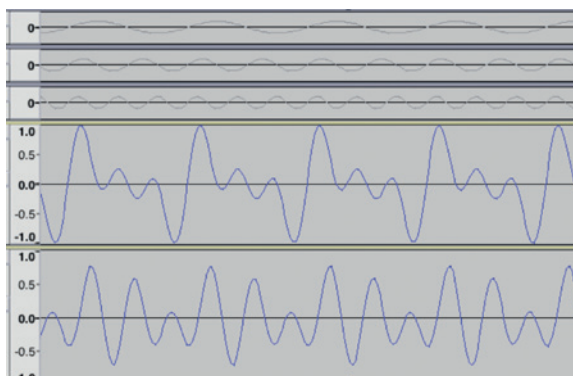
Eine genauere Untersuchung der Dämpfung ergibt eine Frequenzabhängigkeit, das heisst: Unterschiedliche Wellenlängen werden unterschiedlich stark gedämpft. Von Mikrofonherstellern wird dies in Form eines Frequenzganges dargestellt.

Bestätigt wird diese Vermutung der Frequenzabhängigkeit mittels eines Experimentes, bei dem ein so genannter Chirp generiert wird, ein Signal, bei dem die Frequenz im Bereich 440Hz bis 8800Hz kontinuierlich zunimmt. Dieser Chirp wird abgespielt und zeitgleich aufgenommen. Im Ausgangssignal erkennt man, dass das Signal bei einigen Frequenzen stärker gedämpft wird als bei anderen. Aus der Spektraldarstellung lässt sich nun für jede Frequenz die Dämpfung ablesen und damit die entsprechende notwendige Verstärkung ermitteln.

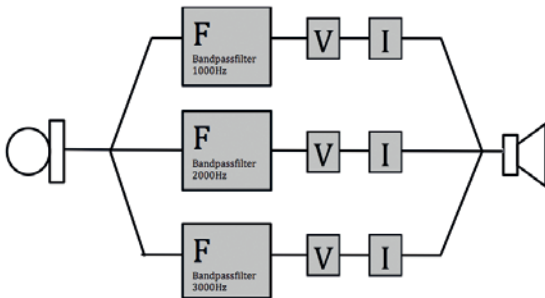
Beispielsweise ermittelt man in der Aufnahme für die Frequenz 5000 Hz die Amplitude 0,5. Setzt man nun diesen Wert in Relation zur Amplitude bei 5000 Hz beim ursprünglichen Signal kann man daraus den benötigten Verstärkungsfaktor zur Korrektur des Aufnahmesignals ermitteln. Mit viel Aufwand liesse sich das für alle Frequenzen durchführen und würde dem Frequenzgang entsprechen. Die Differenz der beiden Frequenzgänge ergibt die notwendigen Korrekturfaktoren. Analog zur Dämpfung gibt es auch eine ähnliche Frequenzabhängigkeit bei der Verzögerung.

Um die bisher gewonnenen Erkenntnisse zu überprüfen, habe ich in einem weiteren Teil meiner Arbeit Simulationen durchgeführt, um ein praktisches Verfahren zur Auslöschung von beliebigen Signalen zu entwickeln.

In diesen Simulationen habe ich ein Signal bestehend aus den drei Frequenzen 1000 Hz, 2000 Hz und 3000 Hz betrachtet, die einzeln generiert (Spuren 1 bis 3) und dann überlagert werden (Spur 4). Dieses Signal wird abgespielt und gleichzeitig aufgenommen (Spur 5).

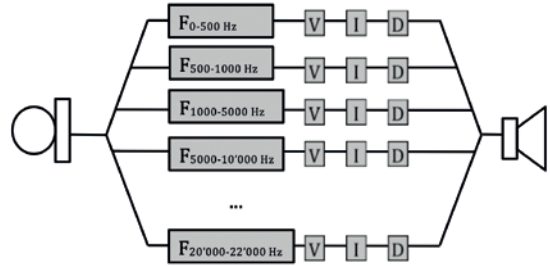


In einer Frequenzanalyse der abgespielten und aufgenommenen Spur werden die Frequenzanteile gemessen und die Differenzen ermittelt. Daraus wird ein Filter erstellt und auf das Signal in Spur 5 angewendet. Dieser Filter sollte die Dämpfung beheben. Das verstärkte Ergebnis ist dem Original jedoch in keiner Weise ähnlich, was auf die oben erwähnte frequenzabhängige Verzögerung hindeutet. Um diesen Aspekt auch noch zu untersuchen, habe ich die Aufnahme mit einem Filter in die drei Frequenzen aufgespalten, aus denen das Anfangssignal zusammengesetzt ist. Daraus ergeben sich drei Spuren, die nun entsprechend gegeneinander verschoben und dann wieder überlagert werden.



Das beschriebene Vorgehen kann auch als Blockschaltbild mit Funktionsblöcken, bereits bekannt aus den Modellen, dargestellt werden. Der Funktionsblock F spaltet das Signal in drei Frequenzbereiche auf und wendet gleichzeitig die passende Verstärkung an (siehe Filter). Am Ausgang der Filter kommen dann nur die gewünschten Frequenzen heraus und diese sind schon entsprechend verstärkt und werden schliesslich frequenzabhängig verzögert (V) und invertiert (I).

Ist das auszuschaltende Signal jedoch ein Geräusch aus dem Alltag, also meist nicht mehr periodisch, so können die Teilsignale nicht mehr beliebig aligniert werden. Die Dämpfung kann man noch immer durch Analyse der Frequenzgänge von Störsignal und dessen Aufnahme berechnen und beheben. Die Verzögerung stellt allerdings ein Problem dar, da unendlich viele Frequenzen berücksichtigt werden müssten, d.h. das Isolieren und Verschieben kann nicht analog zur oberen Simulation stattfinden.



Unter der Annahme, dass nahe beieinander liegende Frequenzen ähnlichen frequenzabhängigen Verzögerungen unterworfen sind, werden neu nicht einzelne Frequenzen isoliert, sondern ganze Frequenzbereiche, wie im Blockschaltbild dargestellt. So isolierte Frequenzbereiche lassen sich dann separat korrigieren.

Die durchgeführte Simulation und die weiterführenden Überlegungen sind alle im Rahmen von nicht-zeitgleichem Abspielen lassen und Auslöschen des Störsignales getätigt worden.

Um die praktische Anwendung zu testen, habe ich zusätzlich noch einen Prototypen gebaut und programmiert und mit Sinussignalen als Störgeräusche getestet. Periodische Störsignale konnten merklich gedämpft werden. Ob mit dem Prototypen auch Sprach- und Musiksignale ausgelöscht werden können, konnte in dieser Arbeit nicht verifiziert werden. Vermutlich ist dies aber nicht möglich, da der eingesetzte Computer zur Berechnung wahrscheinlich zu langsam ist. Die Aufnahme des Störsignals, die Berechnung des Gegensignals und dessen Wiedergabe benötigen also mehr Zeit als den durch die Schallgeschwindigkeit des Störsignals vorgeschriebenen Zeitrahmen.

Auch wenn kommerzielle Kopfhörer mit aktiver Schalldämpfung ziemlich ordinär aussehen, so steckt doch viel ausgeklügelte Technik dahinter. Deshalb bin ich froh, als Thema meiner ruhebringenden Maturitätsarbeit nicht das meiner Ansicht nach weniger spannende Pendant von Kopfhörern mit passiver Geräuschauslöschung – den Ohrstöpseln – gewählt zu haben. Auch wenn diese zugegebenermassen auch ganz gut funktionieren.

Kristina Lehtinen