

Digitale Signalverarbeitung für Mikrofone

Matthias Domke¹, Peter Holstein², Hans-Peter Schade³

¹ Ingenieurbüro Akustik & Audiotechnik, 06679 Granschütz, E-Mail: domke.matthias@t-online.de

² Sonotec Ultraschallsensorik GmbH, 06112 Halle, E-Mail: p.holstein@sonotec.de

³ Technische Universität Ilmenau, 98693 Ilmenau, E-Mail: schade@tu-ilmenau.de

Einleitung

Die Gestaltung der Übertragungseigenschaften von Mikrofonen erfolgt in der Regel durch analoge Signalbeeinflussung entweder auf der akustischen oder auf der elektrischen Seite. Durch die Anwendung von Algorithmen aus der digitalen Signalverarbeitung kann jedoch eine weiterführende Optimierung des Übertragungsverhaltens erreicht werden. Dazu muss das analoge Mikrofonsignal mit seinem großen Dynamikbereich zunächst in ein digitales Signal umgesetzt werden. Im digitalen Bereich lassen sich dann vor allem durch bestimmte Anwendungen der FIR-Filterung das Frequenz- und Zeitverhalten sowie die Richteigenschaften des Mikrofons beeinflussen und dieses sich dadurch an unterschiedliche Schallfelder anpassen.

Analog – Digital - Umsetzung

Vorhandene AD-Umsetzer sind mit Dynamikbereichen von bis zu ca. 120 dB nicht in der Lage, den Dynamikbereich von Mikrofonen von bis zu ca. 140 dB komplett umzusetzen. Als Ausweg wird häufig die sogenannte Mehrbereichs-AD-Umsetzung angewendet, bei der der umzusetzende Dynamikbereich durch analoge Vorverstärkung auf mehrere AD-Umsetzer aufgeteilt wird. Nachteilig sind dabei die Übersteuerung von AD-Umsetzern bei großen Signalamplituden, die abrupte Änderung der Signalaufösung beim Umschalten und der aussteuerungsabhängige Abstand des Signals vom Quantisierungsrauschen. Das hier vorgestellte Verfahren basiert zunächst auf einer nichtlinearen Quantisierungskennlinie, die der Funktion des natürlichen Logarithmus entstammt. Das komprimierte Signal x_C lässt sich auf der Grundlage der μ -law Kennlinie in Abhängigkeit vom Mikrofonsignal x in einer allgemeinen Form durch Gleichung (1) beschreiben.

$$x_C = c \cdot \ln(b + a \cdot x) \quad [V] \quad (1)$$

Dabei dient c zur Anpassung an die maximale Eingangsspannung des AD-Umsetzers, b zur Einstellung einer Ausgangsspannung von 0 V bei einer Eingangsspannung von 0 V, und a in Kombination mit c zur Anpassung des Dynamikbereiches des Mikrofonsignals an den des AD-Umsetzers. Da bei dieser Komprimierung dem Signal Oberwellen hinzugefügt werden, die der Anti-Aliasingfilter des folgenden AD-Umsetzers nicht entfernen darf, muss die AD-Umsetzung mit einer entsprechend höheren Abtastrate erfolgen. Die nach der AD-Umsetzung folgende Expansion wird mit der Umkehrfunktion von Gleichung (1) durchgeführt. Abbildung 1 zeigt, dass die nichtlineare Quantisierung bei kleinen Signalamplituden eine höhere und

bei großen Signalamplituden eine geringere Auflösung hat als eine vergleichbare lineare Quantisierung.

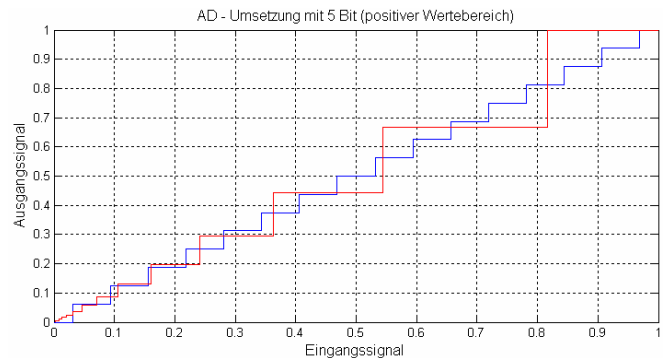


Abbildung 1: Auflösung bei linearer Quantisierung (blau) und nichtlinearer Quantisierung (rot)

Das Verfahren wird nun um einen zweiten Kanal, bei dem die AD-Umsetzung mit einer linearen Quantisierung durchgeführt wird, erweitert. Bei der Signalamplitude, bei der die Auflösung im nichtlinearen Kanal größer wird als im linearen Kanal, wird auf diesen übergeblendet. Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt aus diesem kombinierten Signal sowie den dazugehörigen Quantisierungsfehler. Es ist zu erkennen, dass dieser bei großen Signalamplituden im Bereich der linearen Quantisierung unabhängig von der Signalaussteuerung konstant bleibt, bei kleiner werdenden Signalamplituden im Bereich der nichtlinearen Quantisierung jedoch ebenfalls kleiner wird.

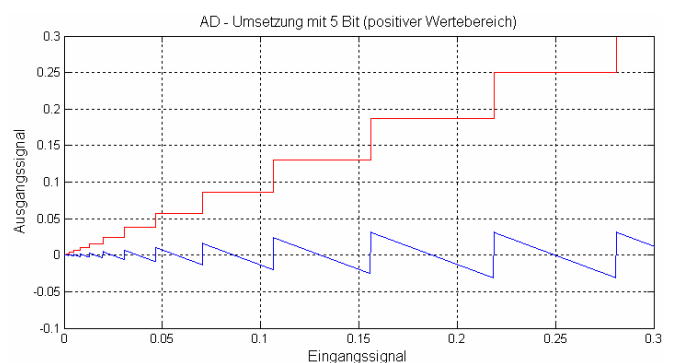


Abbildung 2: Auflösung des aus nichtlinearer und linearer Quantisierung kombinierten Signals (rot) und Quantisierungsfehler (blau)

Wird in Gleichung (1) für das Mikrofonsignal x das linear quantisierte Signal x_L eingesetzt, lässt sich diese durch eine entsprechende Transformationsgleichung in eine lineare Geradengleichung überführen. Mit dieser lassen sich aus mehreren Wertepaaren mit zunächst vorgegebenem c die Parameter a und b mit der Methode der kleinsten

Fehlerquadrate bestimmen, um damit wiederum den Parameter c anschließend nachzuführen. Damit können aus den digitalen komprimierten und linearen Signalen die Parameter a , b und c der Komprimierung rekursiv ermittelt und anschließend zur Nachführung der Expandierung verwendet werden.

Filterung

Vor allem der Druckstau und die Abschattungen durch die geometrischen Abmessungen führen bei Frequenzen oberhalb von ca. 1 kHz zu Abweichungen vom angestrebten Übertragungsverhalten in Abhängigkeit vom Schalleinfallswinkel und vom einwirkenden Schallfeld. Die durch ein Filter erforderlichen Korrekturen beschränken sich somit vor allem auf diesen Frequenzbereich, wodurch die Anwendung von FIR-Filtern ohne eine unzulässig große Latenz möglich ist. Als Vorgabe für die Filtererstellung dient der angestrebte Zielamplitudenfrequenzgang und in vielen Fällen ein Phasenfrequenzgang bei 0° , um ein bestmögliches Impulsverhalten zu erzielen. Die zunächst ohne Filter gemessene komplexe Mikrofonübertragungsfunktion muss für die Erzeugung der FIR-Koeffizienten bei Bedarf zunächst geglättet werden. Danach wird sie derart modifiziert, dass ihr Verlauf unterhalb einer unteren Grenzfrequenz, die von der Anzahl der FIR-Koeffizienten und der Abtastfrequenz abhängt, an den der Zielübertragungsfunktion angepasst ist. An der oberen Bandgrenze ist ein fallender Verlauf der zu erzeugenden Filterübertragungsfunktion von Vorteil, weshalb auch dort die gemessene Mikrofonübertragungsfunktion in Abhängigkeit von der Zielübertragungsfunktion eventuell zu modifizieren ist. Die Erzeugung der FIR-Koeffizienten erfolgt dann durch Division der Zielübertragungsfunktion durch die vorbehandelte gemessene Mikrofonübertragungsfunktion, eine anschließende inverse DFT und die Ausfensterung der FIR-Koeffizienten im Zeitbereich.

Modifikation von Richtcharakteristiken

Mit einem Mikrofon, das aus zwei in geringem Abstand gegeneinander angeordneten Kapseln mit Nierenrichtcharakteristik besteht, können bei Zusammenschaltung der Kapseln durch eine Modifikation von Pegel und Polarität einer der beiden Kapseln verschiedene Richtcharakteristiken erzeugt werden. Wird nun die Beeinflussung der einen Kapsel nicht nur durch Pegel- und Polaritätseinstellung, sondern durch ein FIR-Filter mit der Übertragungsfunktion $H_D(f)$ vorgenommen, ergibt sich in Abhängigkeit von den Übertragungsfaktoren der vorderen Kapsel $B_F(f)$ und der hinteren Kapsel $B_R(f)$ ein Richtungsfaktor des Mikrofons nach Gleichung (2).

$$\Gamma(\vartheta, f) = \frac{B_F(\vartheta, f) + B_R(\vartheta, f) \cdot H_D(f)}{B_F(0^\circ, f) + B_R(0^\circ, f) \cdot H_D(f)} \quad (2)$$

Einzelne Richtcharakteristiken lassen sich nun durch ihre Richtungsfaktoren bei einem Schalleinfallswinkel von 90° definieren. Mit den gemessenen Übertragungsfaktoren der beiden Kapseln bei 0° und bei 90° lässt sich dann durch Umstellen von Gleichung (2) die Übertragungsfunktion

$H_D(f)$ des FIR-Filters bestimmen. Neben einer frequenzkonstanten kann so auch eine frequenzabhängige Richtcharakteristik und damit Bündelung erzeugt werden, um die Räumlichkeit einer Aufnahme bei unterschiedlichen Frequenzen zu beeinflussen. Im nächsten Schritt wird ein weiteres FIR-Filter mit der Übertragungsfunktion $H_M(f)$ zur Einstellung des gewünschten Zielamplitudenfrequenzgangs des Mikrofons bei bestmöglichem Impulsverhalten erstellt. Die FIR-Koeffizienten für die vordere Kapsel entstehen dann durch die inverse DFT von $H_M(f)$ und die anschließende Ausfensterung. Die FIR-Koeffizienten für die hintere Kapsel entstehen durch die inverse DFT des Produktes von $H_M(f)$ und $H_D(f)$ und die anschließende Ausfensterung.

Realisierung

Die beschriebenen Verfahren wurden auf einem Analog Devices ADSP-21364 in Verbindung mit dem AD-Umsetzer Cirrus CS-5368 programmiert und umgesetzt. Die FIR-Filter arbeiten mit 255 Koeffizienten bei einer Abtastrate von 48 kHz. Die Signalausgabe erfolgte über AES42. Abbildung 3 zeigt eine mit FIR-Filterung erstellte frequenzkonstante Nierenrichtcharakteristik mit einem Richtungsmaß von -6 dB bei einem Schalleinfallswinkel von 90° .

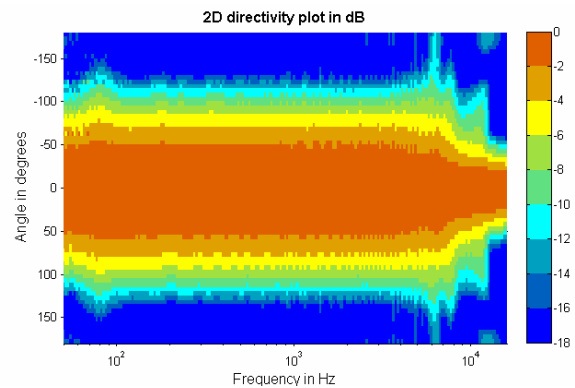


Abbildung 3: Nierenrichtcharakteristik mit FIR-Filterung

Abbildung 4 zeigt den Amplituden- und Phasenfrequenzgang des Mikrofons im Freifeld bei einem Schalleinfallswinkel von 0° , wobei das Ziel eines möglichst konstanten Amplitudenfrequenzgangs und eines bestmöglichsten Impulsverhaltens erreicht wurde.

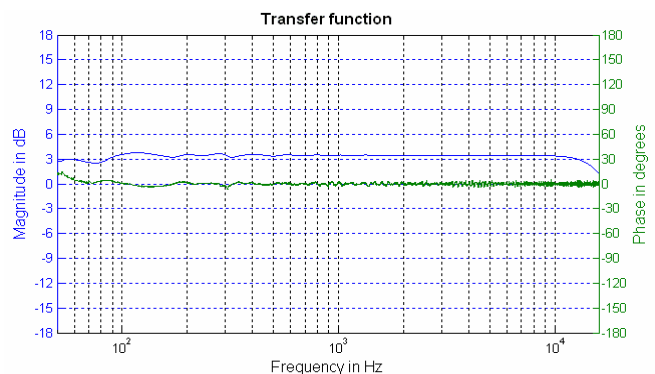


Abbildung 4: Amplitudenfrequenzgang (blau) und Phasenfrequenzgang (grün) mit FIR-Filterung