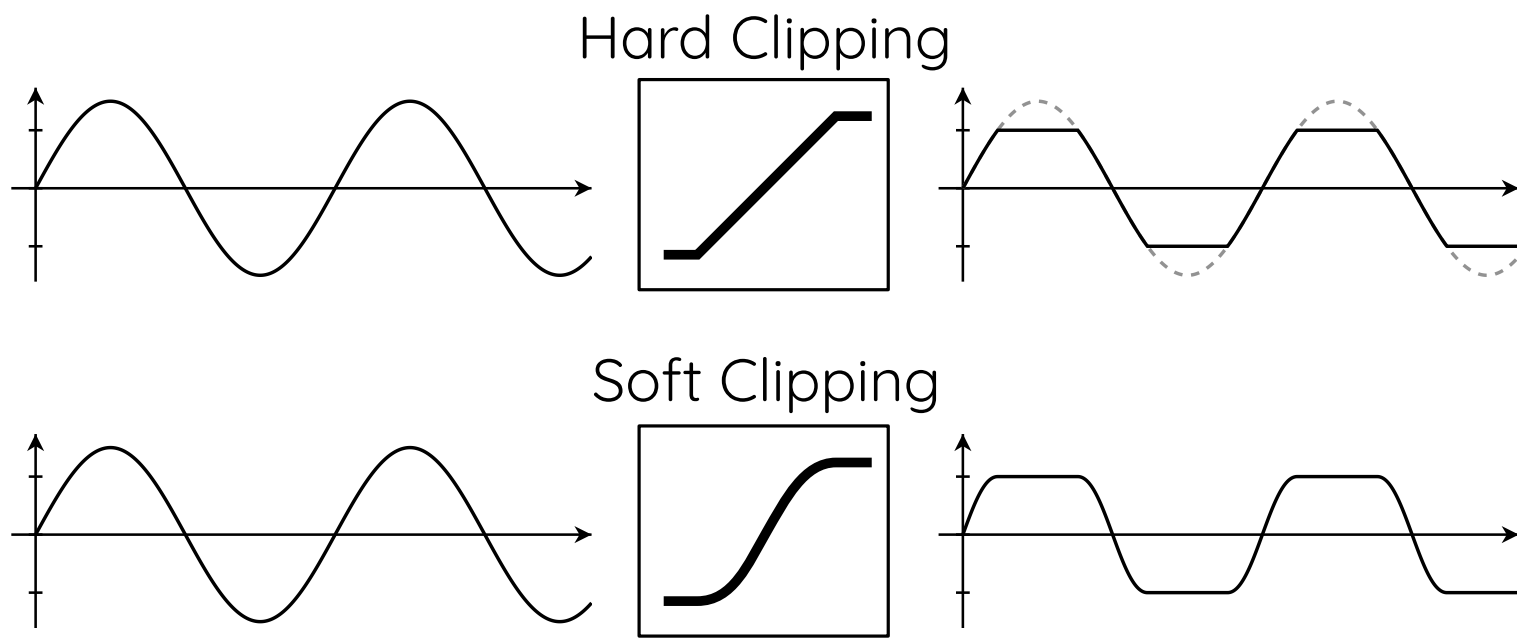




Effekt zur ästhetischen Verzerrung von Audio-Material in Echtzeit

Projekt von Raphael Wettinger
Betreuer: Prof. Dr. Joachim Charzinski

Verzerrung durch Waveshaping



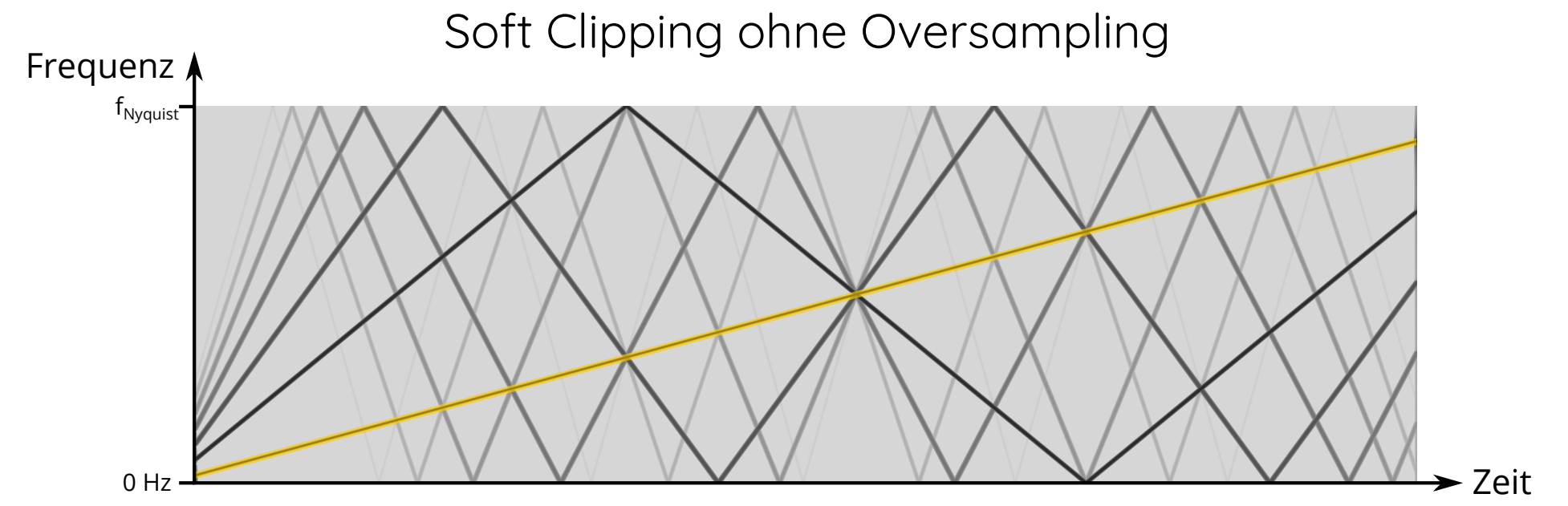
Entstehung von Alias-Effekten

Für eine Frequenz f_0 entstehen beim Clipping ganzzahlige vielfache Frequenzen



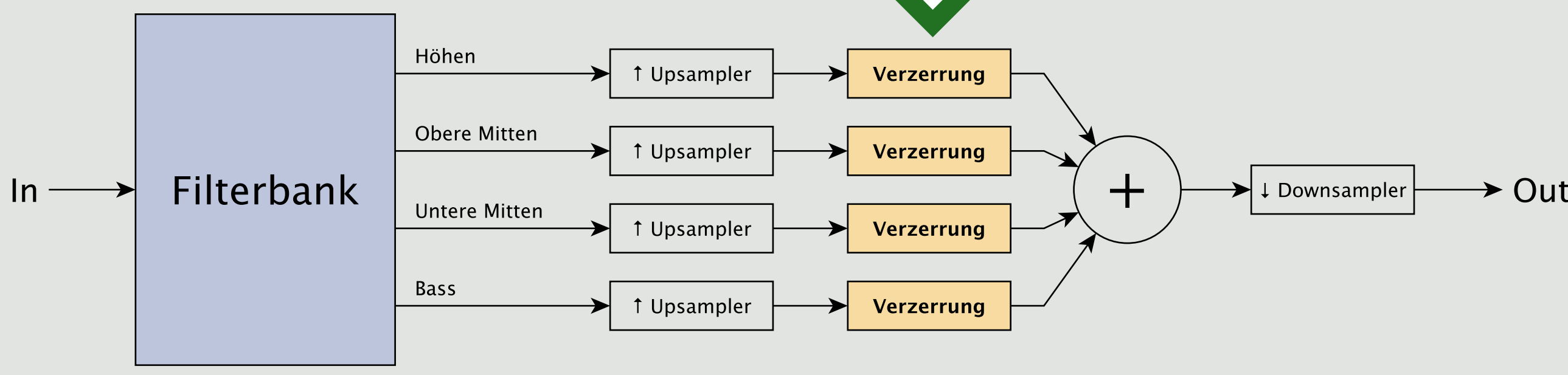
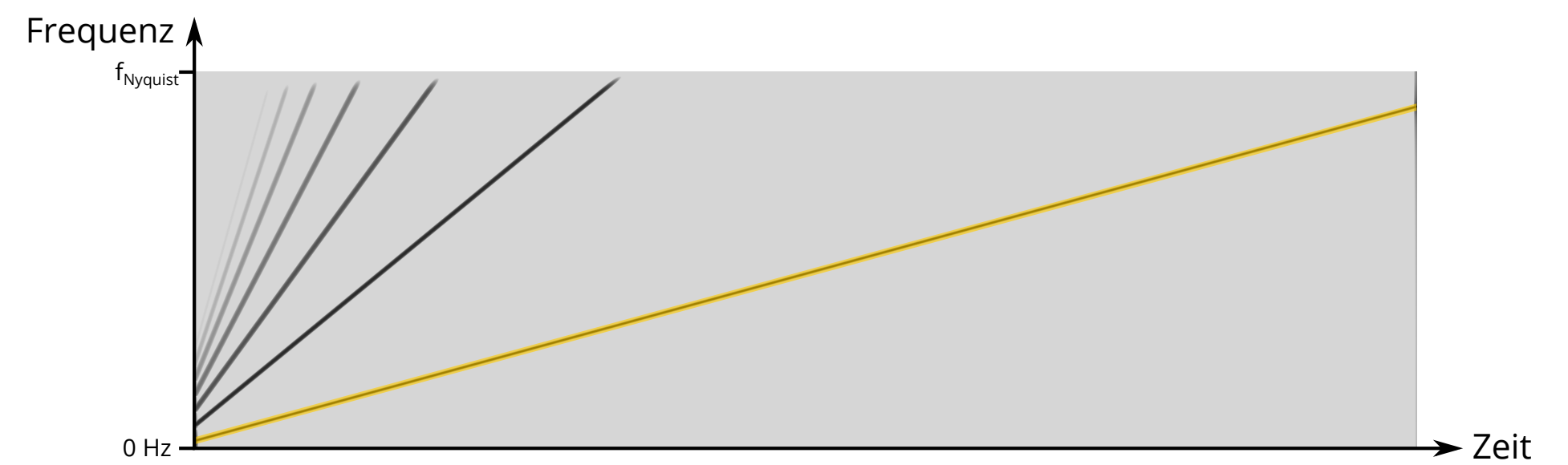
Die Nyquist-Frequenz ist die höchste darstellbare Frequenz in digitalen Audiosignalen. Es handelt sich dabei um die halbe Abtastfrequenz. Frequenzen oberhalb der Nyquist-Frequenz tauchen unter ihrer entsprechenden Alias-Frequenz wieder im Basisband (0 Hz bis $f_{Nyquist}$) auf. Da die Alias-Frequenzen üblicherweise nicht in einem harmonischen Verhältnis zum Ursprungssignal liegen, werden diese als störend empfunden.

Unterdrückung von Alias-Effekten durch Oversampling



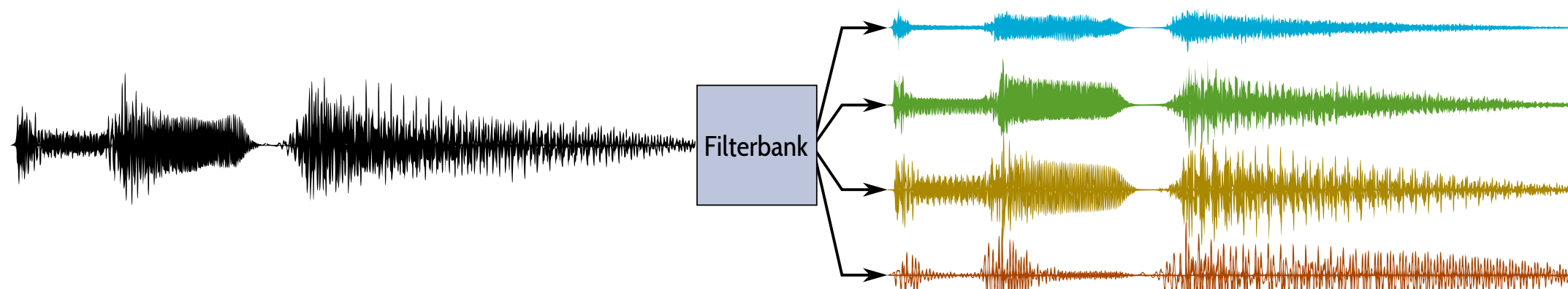
Soft Clipping mit 8-fachem Oversampling

Beim Oversampling wird die Abtastrate des Audiosignals vor dem eigentlichen Clipping erhöht (Upsampling). Nach dem Clipping wird die Abtastrate wieder auf die ursprüngliche Abtastrate reduziert (Downsampling). Durch die erhöhte Abtastrate liegt auch die Nyquist-Frequenz höher. Somit entstehen Alias-Effekte nur noch durch sehr hohe Oberschwingungen, die aber nur sehr wenig Energie besitzen.



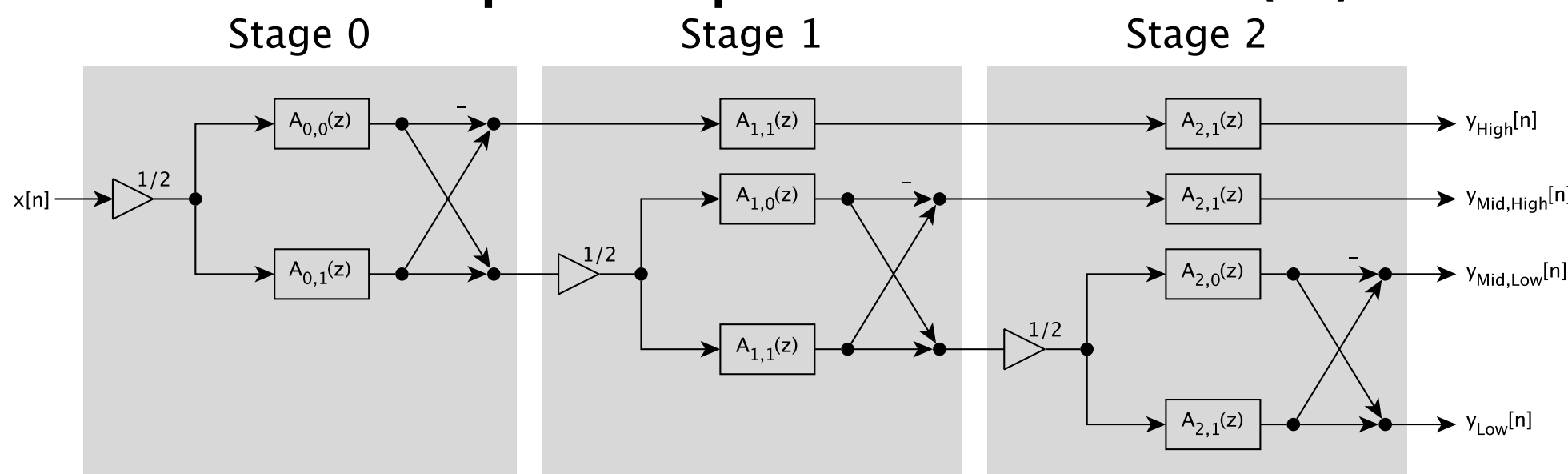
Mit einer Filterbank wird zunächst das Eingangssignal in verschiedene Frequenzbänder aufgetrennt. Anschließend können die einzelnen Frequenzbereiche unabhängig voneinander bearbeitet und verzerrt (Distortion) werden. Somit können z.B. die hohen Frequenzen des Signals sehr stark verzerrt werden, während der Bassbereich nur leicht angezerrt wird.

Filterbank zur Auftrennung des Signals



Die wesentliche Komponente eines Multiband-Effekts ist die Filterbank. Mit ihr wird ein Signal in mehrere Signale aufgetrennt, die jeweils unterschiedliche Frequenzbereiche (Bänder) abdecken. Dabei sollte die Filterbank so konstruiert werden, dass die Summe der getrennten Signale möglichst das Ursprungssignal ergibt. In Echtzeit (Rekursive IIR-Filter) ist dies nur mit einer Phasen-Verzerrung möglich. Man spricht hier deshalb von einer Allpass-Komplementären Filterbank. D.h. die Summe der Filterbank-Ausgänge summieren sauber zu einem flachen Frequenzgang auf, die Phasen sind jedoch verzerrt. Phasenverzerrungen sind i.d.R. nicht vom menschlichen Gehör wahrnehmbar.

Struktur der Allpass-Komplementären Filterbank (IIR)



R. Cassidy, J.O. Smith III, "A Tunable, Nonsampled, Non-Uniform Filter Bank for Multi-Band Audition and Level Modification of Audio Signals", 2004

Allpass-Komplementäres Crossover (Frequenzweiche)

Gesucht ist der komplementäre Hochpass zu einem gegebenen Tiefpass-Filter (IIR). Dieser kann einfach konstruiert werden, wenn der Tiefpass-Filter als Summe zweier Allpass-Filter vorliegt:

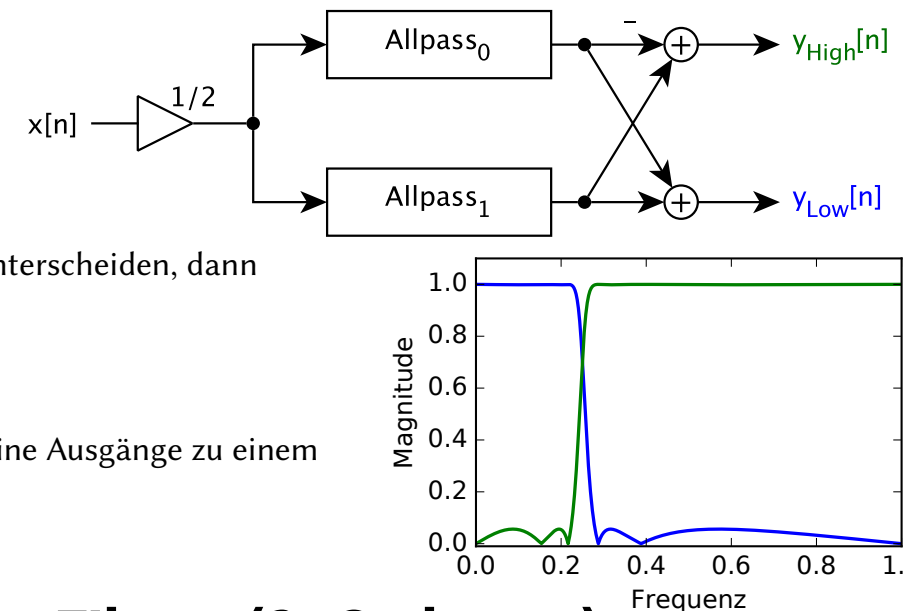
$$H_{Tiefpass}(z) = \frac{A_0(z) + A_1(z)}{2}$$

Wenn sich die beiden Allpässe A_0 und A_1 in ihrer Ordnung um einen Grad unterscheiden, dann ergibt sich der komplementäre Hochpass durch die Differenz:

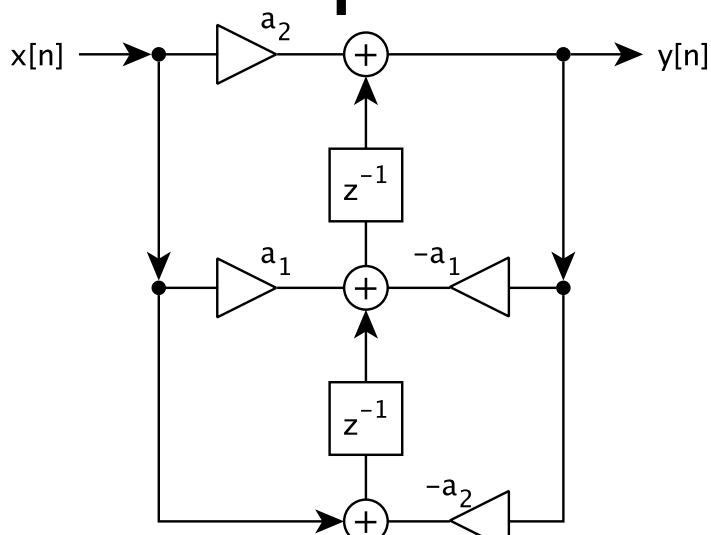
$$H_{Hochpass}(z) = \frac{A_0(z) - A_1(z)}{2}$$

Das Crossover (Frequenzweiche) ist somit Allpass-Komplementär, da sich seine Ausgänge zu einem Allpass summieren:

$$H_{Tiefpass}(z) + H_{Hochpass}(z) = A_0(z)$$



Implementierung eines Allpass-Filters (2. Ordnung)



Differenzengleichung:

$$\begin{aligned} y_n &= q_{n-1} + a_2 x_n \\ q_n &= p_{n-1} + a_1 x_n - a_1 y_n \\ p_n &= x_n - a_2 y_n \end{aligned}$$

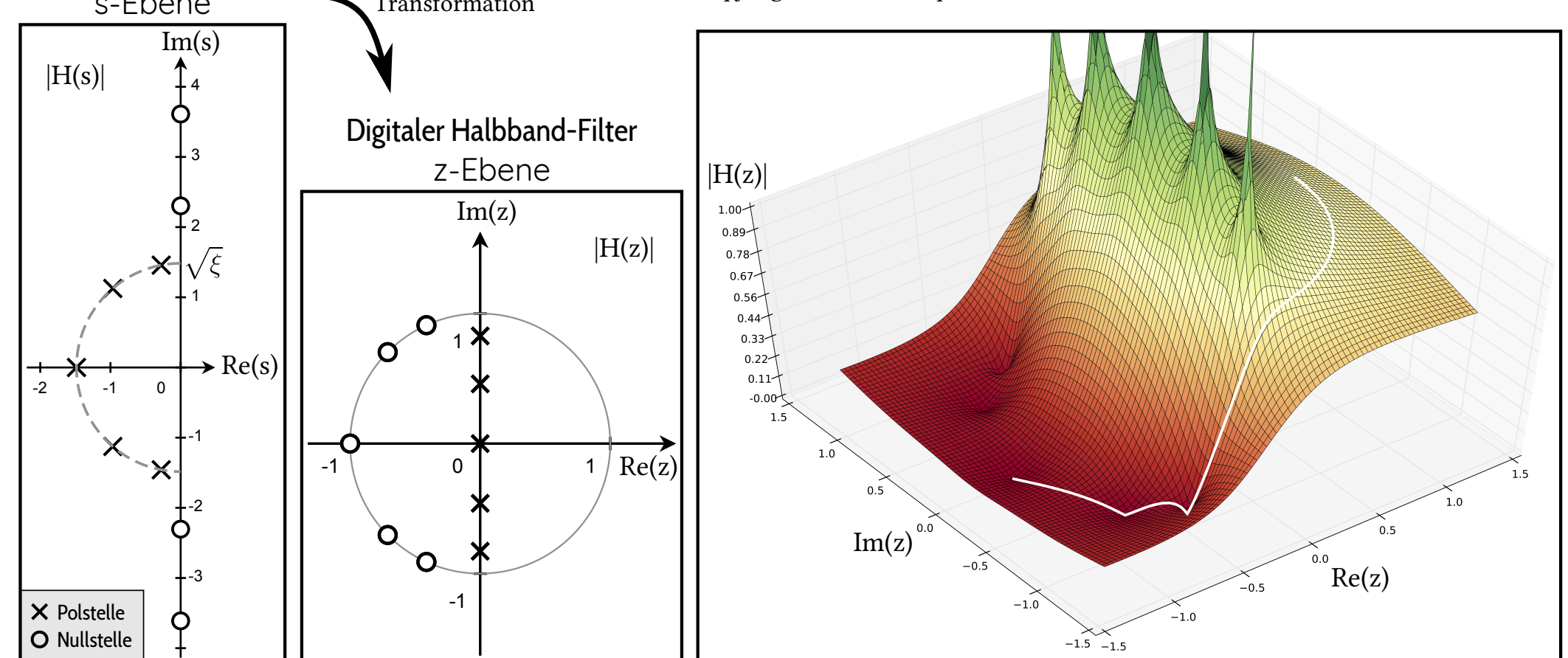
z-Transformierte Übertragungsfunktion:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{a_2 + a_1 z^{-1} + z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}$$

Entwurf eines Tiefpass-Filters als Allpass-Summe

Miroslav D. Lutovac, "Filter Design for Signal Processing Using MATLAB and Mathematica", 2000, Prentice Hall

Beispiel zeigt einen EMQF-Filter (Elliptic Minimal Q-Factor) 5. Ordnung mit einer Dämpfung von 40 dB im Sperrband.



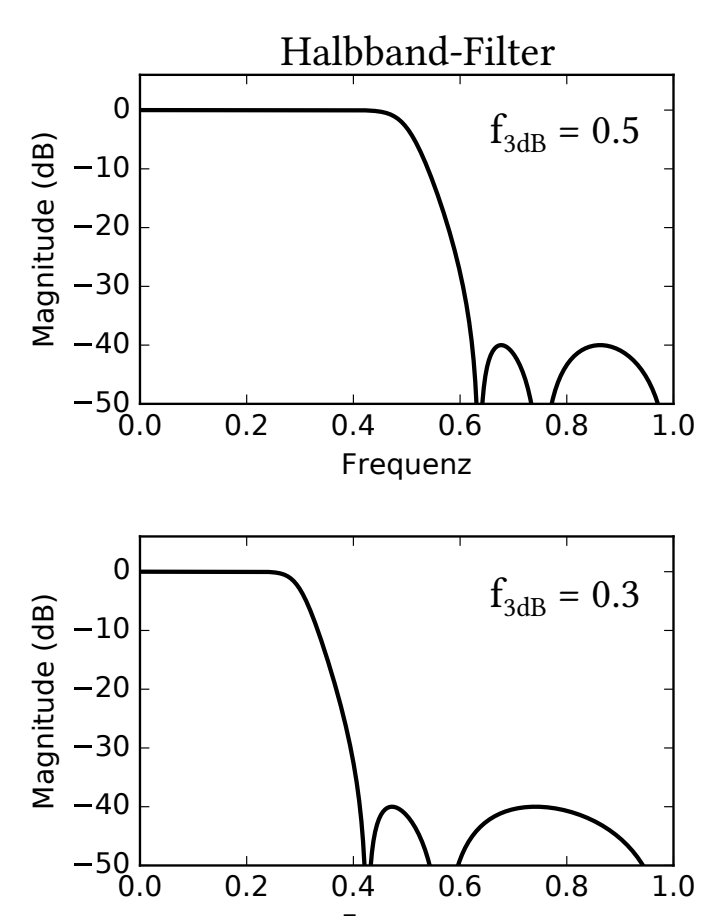
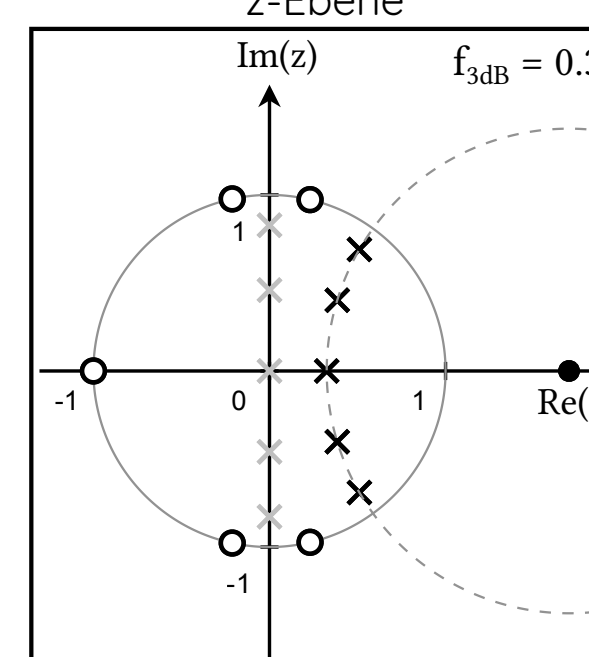
Mit folgenden Formeln kann ein gegebener digitaler Halbband-Filter (Typ: EMQF) als Allpass-Summe realisiert werden. Zudem kann die Grenzfrequenz f_{3dB} beliebig bestimmt werden. Dazu werden die Filterpole des digitalen Halbband-Filters benötigt, welche beim EMQF-Typ auf der Imaginär-Achse liegen. $\beta_1^{HB} = 0$, ansonsten ist β_1^{HB} der quadrierte Betrag des i'ten komplex konjugierten Pol-Paares.

$$H_{LP}(z) = \frac{1}{2} [A_0(z) + A_1(z)]$$

$$H_{LP}(z) = \frac{1}{2} \left[\prod_{i=2,4,\dots}^{(N-1)/2} \frac{\beta_i + \alpha(1 + \beta_i)z^{-1} + z^{-2}}{1 + \alpha(1 + \beta_i)z^{-1} + \beta_i z^{-2}} + \frac{\alpha_1 + z^{-1}}{1 + \alpha_1 z^{-1}} \prod_{i=3,5,\dots}^{(N-1)/2} \frac{\beta_i + \alpha(1 + \beta_i)z^{-1} + z^{-2}}{1 + \alpha(1 + \beta_i)z^{-1} + \beta_i z^{-2}} \right]$$

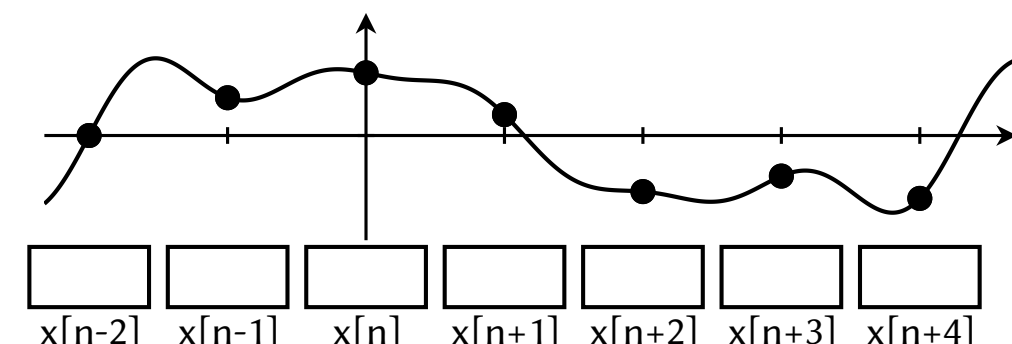
Dabei ergeben sich die Koeffizienten aus:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{\tan(\frac{\pi}{2} f_{3dB}) - 1}{\tan(\frac{\pi}{2} f_{3dB}) + 1} & \alpha &= -\cos(\pi f_{3dB}) \\ \beta_i &= \frac{\beta_i^{HB} + \alpha_1^2}{\beta_i^{HB} \alpha_1^2 + 1}, & \beta_i^{HB} &< \beta_{i+1}^{HB} \end{aligned}$$



Audioprogrammierung Grundlagen

Digitales Audio



- Folge von Abtastwerten
- Abtastrate (z.B. 44100 Hz)

Host

