

Klangunterschiede der Engine´s verschiedener Digital Audio Workstations

Bachelorarbeit

im Studiengang
Audiovisuelle Medien

vorgelegt von

Marco Maluschke

Matr.-Nr.: 24067

am 13.10.2014

an der Hochschule der Medien Stuttgart

Erstprüfer/in: Prof. Oliver Curdt

Zweitprüfer/in: Prof. Jens-Helge Hergesell

Kurzfassung

Die Engine einer professionellen Musiksoftware sollte im besten Fall keinen Einfluss auf den Klang eines Musikstückes nehmen. Dieses Thema ist bei den Endbenutzern oft ein Streitpunkt. Die Antwort auf die Frage: „Besitzt eine DAW Engine einen Eigenklang?“ soll in dieser Arbeit daher geklärt werden. Nach einer technischen Einführung in die Thematik erfolgen Hörtests und verschiedene Messungen. Es werden drei Musikstücke sehr unterschiedlicher Stilrichtungen verglichen. Außerdem wird ein Belastungstest mit einem der Musikstücke durchgeführt um herauszufinden, ob sich Summierungsfehler erzwingen lassen. Im Vergleich werden ProTools, Logic sowie Reaper als ausgewählte Vertreter des aktuellen DAW Angebotes herangezogen. Die Hörtest werden mit Probanden durchgeführt und von ihnen kommentiert. Die Messergebnisse sowie das Gehörte sind eindeutig. Die Engines aktueller DAW's arbeiten allesamt sehr sauber und fehlerfrei. Auch beim Belastungstest konnten keine Fehler im Summierungsprozess erzwungen werden.

Abstract

The Engine of a professional musicsoftware should not effect the sound of a musical work. This topic is highly discussed by the users of DAW's. The question "Does a DAW's soundengine have an own soundcharacter?" will be answered here. After a short technical basics part there will be aural examinations as well as some measurements to figure that out. 3 musical works that come from totally different musicstyles are compared later. There will also be a load test with one of these pieces to figure out if its possible to force the engine to make mistakes while summing. The DAW's ProTools, Logic and Reaper will be tested. The aural examinations were all done and commented by professionals. The measurements as well as the aural examinations bring it out clearly. To-days DAW's engine's are working absolute precisely. Even the load test could not bring out any mistakes of it.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abstract	2
Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis.....	5
Abkürzungsverzeichnis.....	6
1 Einleitung	7
2 Technische Grundlagen	8
2.1 Harddisk Recording.....	8
2.2 Heutige DAW's	10
2.3 Schwingungen und Schall	11
2.4 Analog-Digitalwandlung.....	13
2.4.1 Das Analogsignal.....	13
2.4.2 Das Digitalsignal	14
2.4.3 Das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem	14
2.5 Die Digitalisierung	16
2.5.1 Abtastung.....	16
2.5.2 Jitter	16
2.5.3 Quantisierung	18
2.5.4 Dithering	19
2.5.5 Noise Shaping	20
2.6 Codierung.....	21
2.7 Delta-Sigma Wandler	23
3 Signalverarbeitung.....	27
3.1 Audio Engine	27
3.2 Zahlensysteme	28
3.2.1 Dezimalsystem	28
3.2.2 Dualsystem	28
3.2.3 Hexadezimalsystem.....	30
3.2.4 Festkommaformat.....	30
3.2.5 2er-Komplement Zahlen	31
3.3 Arithmetik im dualen System.....	32
3.3.1 Addition.....	32

3.3.2	Subtraktion.....	32
3.3.3	Multiplikation und Division	35
4	Tests	37
4.1	Messinstrumente: FFT/Spektograph/Spektogramm.....	37
4.1.1	Code Meter	38
4.1.2	Level Meter	39
4.2	Testvorbereitung	39
4.2.1	Fader Werte.....	39
4.2.2	Pan Law.....	40
4.2.3	Offline- vs. Realtime- Bounce	41
4.2.4	Vorbereitung der Testprojekte	41
4.2.5	Belastungstest	42
4.3	Hörversuche	42
4.3.1	Musikstücke	42
4.3.2	Die Testkandidaten.....	43
4.3.3	Testsystem	43
4.3.4	Eigene Höreindrücke	43
5	Interviews.....	47
5.1	Testperson 1	47
5.2	Testperson 2	47
5.3	Testperson 3	48
6	Fazit	50
7	Anhang A	52
	Anhang A: Beispiele für die Gliederung von Abschlussarbeiten	61
A.1	Literaturarbeiten	61
A.2	Systementwicklungen.....	61
	Literatur- und Quellenverzeichnis.....	62
	Bildverzeichnis.....	64
	Eidesstattliche Versicherung.....	66
	Auszug aus dem Strafgesetzbuch (StGB)	66

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fairlight CMI Series IIX	9
Abbildung 2: Einheitskreis mit 90 Grad verschobenem Sinus	12
Abbildung 3: Addition zweier Schwingungen	12
Abbildung 4: Kontinuierliche und diskrete Signale im Vergleich	14
Abbildung 5: Abtastung mit und ohne Einhaltung des Abtasttheorems	15
Abbildung 6: Abtastpuls mit Jitter	17
Abbildung 7: Umsetzung einer analogen Schwingung in Digitalinformationen	22
Abbildung 8: Komponenten der Delta-Sigma Wandlung	24
Abbildung 9: Blockschaltbild eines Delta-Sigma Modulators 1.Ordnung	25
Abbildung 10: Delta-Sigma Modulator 2.Ordnung	26
Abbildung 11: Spektograph: Spektrale Darstellung des Audiosignals	38
Abbildung 12: Spektrogramm	38
Abbildung 13: MH Code Meter bei laufendem 24 Bit Ditherrauschen	39
Abbildung 14: Level Meter	39
Abbildung 15: Test der Genauigkeit der Faderwerte	40
Abbildung 16: Restsignal nach Phasendrehung	44
Abbildung 17: Messung des Restsignals mit Code Meter	45
Abbildung 18: durchschnittliches Fehlersignal Version zwei	45
Abbildung 19: Editbereich Logic	52
Abbildung 20: Mixbereich Logic	52
Abbildung 21: Editbereich ProTools	53
Abbildung 22: Mixbereich ProTools	53
Abbildung 23: Editbereich Reaper	54
Abbildung 24: Mixbereich Reaper	54
Abbildung 25: Blockschaltbild eines digitalen Delta Sigma Modulators erster Ordnung	55
Abbildung 26: SNR gegen Überabtastung	55
Abbildung 27: Wahrheitstabellen boolesche Logik	56
Abbildung 28: Messung mit 1kHz Sinus	56
Abbildung 29: Mixerumgebung mit Signalgenerator	57
Abbildung 30: Rückgabe nach durchschleifen des Sinus	58
Abbildung 31: Beispiel Fehlersignal Frontliner 3 Reaper vs ProTools	58
Abbildung 32: Beispiel Bitaktivität Frontliner 3 Reaper vs ProTools	59
Abbildung 33: Beispiel Fehlersignal Frontliner 3 Reaper vs ProTools	59
Abbildung 34: Beispiel Fehlersignal Frontliner 3 Reaper vs Logic	59
Abbildung 35: Beispiel Fehlersignal Frontliner 2 Reaper vs Logic	60
Abbildung 36: Beispiel Bitaktivität Frontliner 2 Reaper vs Logic	60

Abkürzungsverzeichnis

ca.	circa
CMI	Computer Musical Instrument
DAW	Digital Audio Workstation
EQ	Equalizer
MIDI	Musical Instruments Digital Interface
usw.	und so weiter
SNR	signal to noise ratio
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

Es gibt auf dem Markt eine riesige Auswahl an Digitalen Audio Workstations. Obwohl jeder Anwender die Entscheidung zu einer bestimmten DAW an seinen eigenen Punkten fest macht, gibt es gewisse Eigenschaften, welche solch eine Software mit sich bringen muss, um professionelle Ergebnisse erzielen zu können. An vorderster Stelle steht hierbei der Klang. Immer wieder kann auf fachspezifischen Webseiten und in Foren gelesen werden, dass eine bestimmte DAW besser klingt, als eine andere. Kommentare wie „*Pro Tools hat die am besten klingende Engine von allen DAW's*“ sind im Netz immer wieder zu lesen und entfachen starke Diskussionen bei Tonschaffenden.

Aufgrund des technologischen Fortschritts werden heutzutage DAW's angeboten, die sich klanglich hervorragend verhalten. Aber was bedeutet dies im Bezug auf eine DAW überhaupt? Wenn man von solch einem Programm klanglich etwas erwartet, dann doch nur, dass es überhaupt nicht klingt. Ein eigener Klangcharakter einer solchen Software ist im Normalfall nicht erwünscht, denn was für die eine Musikrichtung passen könnte, ist für die andere eventuell unvorteilhaft. Der Klangcharakter eines Musikstückes sollte vom Toningenieur durch Mikrofone, Preamps, EQ's, Kompressoren usw. gestaltet werden und nicht durch die DAW Engine vorbestimmt sein. Diese Arbeit soll klären, ob aktuelle DAW's einen eigenen Klangcharakter besitzen und wenn ja, wo die Unterschiede liegen.

2 Technische Grundlagen

In den nachfolgenden Kapiteln sollen zunächst allgemeine tontechnische Grundlagen erläutert werden. Darüber hinaus wird die digitale Audiotechnik beschrieben.

2.1 Harddisk Recording

Die Digitale Audio Workstation, kurz DAW genannt, bezeichnet im ursprünglichen Sinne Harddisk Recorder welche in der Lage waren Audiomaterial aufzunehmen und mit einer Palette an Tools zu bearbeiten. Die DAW war eine Kombination aus Hardware und einer fest integrierten Software. Die ersten Geräte dieser Gattung kamen im Jahre 1979 von der australischen Firma Fairlight. Das 1982 vorgestellte Fairlight CMI Series II (Computer Musical Instrument) beinhaltete den ersten wirklich ernst zu nehmenden Sequenzer der Welt. Im Grunde war es ein Synthesizer, welcher in der Lage war, Audiomaterial zu sampeln und in einem Sequenzer zu arrangieren. Das CMI Series II hatte nur wenige MB an Speicherkapazität, eine 8Bit Auflösung sowie eine Samplingrate von 32kHz und bot nur rudimentäre Bearbeitungsmöglichkeiten. Der damalige Preis betrug circa 30.000 Englische Pfund.¹

Trotz dieser (aus heutiger Sicht) minimalistischen Ausstattung läutete Fairlight mit Page R, dem Pattern-basierten Sequenzer Modus des CMI, eine neue Ära der Musikproduktion ein. Die Quantisierung, sowie das Abspielen von Bars und Patterns im Loop wurde eingeführt. Heutige Sequenzer arbeiten alle nach einem ähnlichen Prinzip.

¹ Vgl. vintage Synth explorer 2014.



Abbildung 1: Fairlight CMI Series IIx

1989 folgte mit dem Fairlight MFX das erste rein digitale Harddisk Recording System. Nach und nach wurden HD-Recorder durch Audioeditoren wie zum Beispiel den Sound Designer von Digidesign, um Funktionen erweitert welche das Bearbeiten des Audiomaterials erleichterten. Es war nun möglich, aufgrund des Direktzugriffs auf die Dateien auf der Harddisk, das Audiomaterial nicht-linear und nicht-destruktiv zu bearbeiten. Diese Systeme sind in der Regel Stand-alone-Systeme und selbst heute noch beliebt und weit verbreitet.²

Mit dem Fortschritt der Computertechnik wurden für den Anwender unzählige Möglichkeiten zum arrangieren und editieren von Audiomaterial möglich gemacht. Host-basierte Systeme sind heutzutage in jedem Tonstudio zu finden. Die Vorteile liegen auf der Hand. Verschiedenste Software kombiniert mit einem leistungsfähigen Computer und hochwertiger Audiohardware machen extrem flexibles und schnelles arbeiten zu einem geringen Preis-Leistungsverhältnis möglich, wobei die Kombinationsmöglichkeiten hierbei fast unbegrenzt scheinen.

² vintage Synth explorer 2014.

2.2 Heutige DAW's

Die Leistungsfähigkeit aktueller Host-basierter Recording Systeme ist nur noch durch das Budget des Anwenders begrenzt. 24 Spuren simultane Aufnahme mit 24Bit Wortbreite und 48kHz Samplingrate sind ohne Probleme und mit einem geringem finanziellen Aufwand realisierbar. Die Bordmittel einer aktuellen Sequenzersoftware machen es möglich komplette Produktionen in absolut professioneller Qualität zu realisieren. Alle Bereiche eines Tonstudios wie Harddisk Recording, Arrangement, Editierung, Mischung und die Bearbeitung des Materials mit Effekten, werden hierbei in der Software vereint. Der Preisbereich solcher Software variiert jedoch stark. Von frei erhältlichen Programmen bis hin zur Luxusvariante mit Preisen von knapp 3.000€ werden angeboten.

Diese softwarebasierten Lösungen sind extrem modular, da Plugins verschiedener Dritthersteller ohne Probleme eingebunden werden können um benötigte Funktionen oder Effekte „nachzurüsten“. Derzeit gängige Formate sind Steinbergs VST, Apples Audio Unit's sowie Avids RTAS und AAX Plugins. Das Arbeiten mit aktuellen Sequenzersoftware's wird dem Anwender immer einfacher gemacht. Komplexe Algorithmen und Bearbeitungen stehen nach wenigen Mausklicks zur Verfügung. Stets kann dabei nicht-linear und nicht-destruktiv gearbeitet werden. Aber nicht nur aufgenommenes Audiomaterial kann bearbeitet werden. Ganze Arrangements können erstellt, gemischt und bearbeitet werden ohne eine einzige Audiodatei zu beherbergen. Mit geeigneten MIDI-fähigen (Musical Instruments Digital Interface) Eingabegeräten können virtuelle Instrumente angesteuert werden. Selbst in Notenschrift zu arbeiten, ist mittlerweile mit den mitgelieferten Noteneditoren ohne Probleme möglich.

Solange auf digitaler Ebene gearbeitet wird, bringt der Einsatz von Effekten und Editierfunktionen keine Verschlechterung der Audioqualität mit sich. Dies ist im Bereich der elektronischen Musik oder beispielsweise beim Sounddesign, also in Bereichen bei denen sehr viele Effekte benötigt werden, als großer Vorteil zu sehen. Auch ein großer Vorteil ist die hohe visuelle Komponente, die die Arbeit am Computer mit sich bringt. Sämtliche Funktionen sowie und Bearbeitungsschritte können graphisch dargestellt werden. Der Workflow, zum Beispiel am Schnittplatz wird dadurch erheblich beschleunigt. Tiefgreifende Analysefunktionen runden diese Visualisierung des Audiomaterials ab. Die bekanntesten und am weitesten verbreiteten DAW's sind Steinberg Cubase, Avid Pro Tools, Apple Logic, Ableton Live, Cakewalk Sonar, Image-Line Fruity Loops und Propellerhead Reason. Eine Tabelle der wichtigsten Features dieser DAW's befindet sich im Anhang.

2.3 Schwingungen und Schall

Um den Signalweg von der Schallquelle bis hin zur DAW zu beschreiben soll im folgenden Abschnitt ein kurzer Ausflug in die Physik die Entstehung von Schall klären. Auch im Hinblick auf die im praktischen Teil folgende Signalanalyse, ist dies elementares Grundwissen.

Um Schall zu erzeugen, müssen gasförmige, flüssige oder feste Körper zu Schwingungen angeregt werden. Diese Schwingungen breiten sich im jeweiligen Medium meist als Longitudinalwelle (Ausbreitungsrichtung= Richtung der Teilchenbewegung) mit Frequenzunabhängiger und konstanter Geschwindigkeit (Schallgeschwindigkeit c zB. in Luft bei $20^\circ \approx 343\text{m/s}$) aus. Dies ist zugleich die Voraussetzung für die Wahrnehmung von Schwingungen als Schallereignis d.h. breitet sich die Schwingung nicht in Form einer Welle aus wird sie auch nicht als Schall wahrgenommen. Eine Schallwelle im speziellen ist eine durch Schwingungen (lokal) hervorgerufene Schwankung des Drucks im Medium (im Raum). Die Ausbreitung dieser Wellen ist im Nahbereich stets die einer Kugelwelle und kann bei großen Entfernungen zur Schallquelle als ebene Welle angesehen werden. Eine einfache Schwingung wie die eines konstanten Sinustons, kann grundlegend durch drei Kenngrößen beschrieben werden. Die Amplitude (A) beschreibt die Höhe der Auslenkung der Schwingung. Die Periodendauer (T) gibt an nach welcher Zeit sich die Schwingung wiederholt und ist darüber hinaus die Grundlage zur Berechnung der Frequenz (f) (Kehrwert von T). Die Phase oder auch Phasenlage (φ) gibt an mit welchem Versatz die Schwingung zum Zeitpunkt $t=0$ startet.

Der Frequenzbereich in dem Schwingungen vom menschlichen Gehör wahrgenommen werden können, liegt in etwa bei 20Hz bis 20kHz. Dies entspricht Wellenlängen ($\lambda = c/f$) von circa 17m bis 17mm. Die Wahrnehmbarkeitsschwelle liegt bei Druckschwankungen von ungefähr $20\mu\text{Pa}$ (entspricht 0dB) und die obere Grenze bei circa 200Pa (140 dB) was die Schmerzschwelle des menschlichen Gehörs darstellt. Im weiteren Verlauf dieses Dokuments werden Pegelgrößen stets mit der logarithmischen Einheit Dezibel (dB) angegeben.

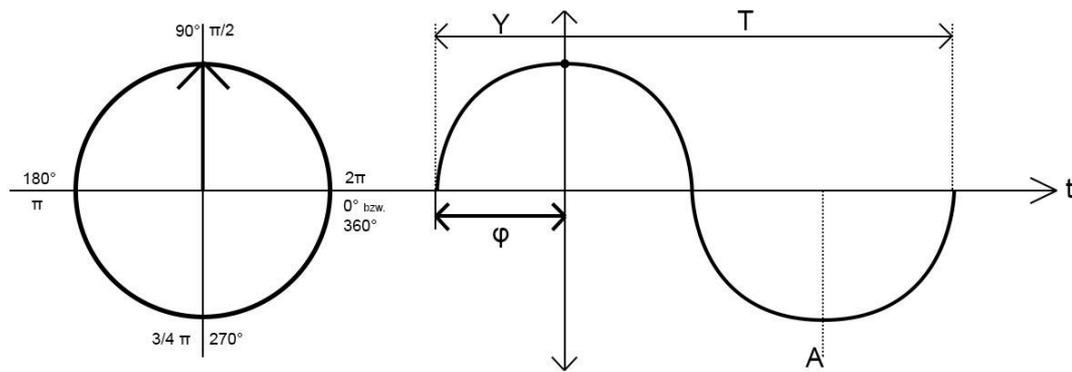


Abbildung 2: Einheitskreis mit 90 Grad verschobenem Sinus

Ein reiner Ton -Schallereignis welches aus einer einzelnen periodischen Schwingung entsteht- wie der eben dargestellte, kommt bei mechanischen Instrumenten in der Regel nicht vor. Eine Violine zum Beispiel, produziert stets einen Klang bzw. eine komplexe Schwingung (bestehend aus mind. zwei Tönen). Klänge sind das Ergebnis eines Grundtones, gemischt mit mehreren harmonisch überlagernden Obertönen.

„Sie sind also spezielle komplexe Schwingung bei der die Obertöne ganzzahlige vielfache des Grundtons sind und somit in einem harmonischen Verhältnis zueinander stehen.“³

Außerdem werden Klänge durch eine für jedes Instrument spezielle Einschwingphase, die Dauer des Klangs, die Lautstärke sowie deren Klanghöhe (bestimmt durch den Grundton) definiert. Die graphische Darstellung solcher komplexer Schwingungen lässt sich durch simple Addition der Amplitudenwerte der einzelnen Sinusschwingungen realisieren.

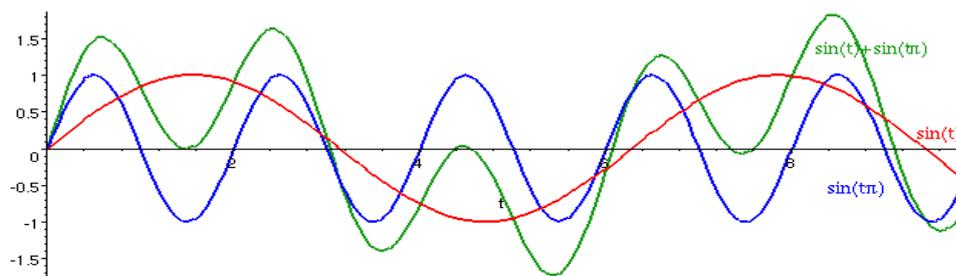


Abbildung 3: Addition zweier Schwingungen

³ Dickreiter 1997, S. 17.

Wie in Abbildung 3 zu sehen addieren sich überlagernde Schwingungen. Wird eine simple Sinusschwingung mit einer identischen um 180° verschobenen Schwingung überlagert, so löschen sich beide Schwingungen zu 0 aus. Der erste und sehr einfach zu realisierende Test zur Feststellung wie ähnlich die Audioengines der verschiedenen DAW's arbeiten wird dieser „null test“ sein. Arbeiten die Engine's der Test-DAW's alle ähnlich gut bzw. fehlerfrei, müssten sich die Signale komplett auslöschen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass leichte Abweichungen aufgrund von unterschiedlichen Faderwerten oder zum Beispiel Panoramaeinstellungen entstehen werden.

2.4 Analog-Digitalwandlung

Im folgenden Kapitel wird das Aufbereiten von einem analogen Signal für die Weiterverarbeitung auf digitaler Ebene beschrieben.

2.4.1 Das Analogsignal

Analoge Signale treten im Bereich der Audiotechnik in unterschiedlichen Formen auf. Der von einem Instrument abgegebene Schall, die vom Mikrofon ausgegebene Spannung, das magnetische Feld einer Bandmaschine aber auch die Wiedergabe von Audiomaterial auf Lautsprechern sind nur einige Beispiele welche verschiedene Analogsignale beinhalten. Im Wesentlichen hat jedes dieser Signale genau zwei Eigenschaften. Es ist zeit- sowie wertkontinuierlich. Dies bedeutet, dass *„das Signal zu jedem gegebenem Zeitpunkt definiert ist und dabei nicht nur bestimmte (diskrete) Werte sondern jeden beliebigen Wert annehmen kann.“*⁴

Ein Analogsignal lässt sich also nur mit Hilfe unendlicher Zahlen beschreiben.

⁴ Dittmar 1990, S.5.

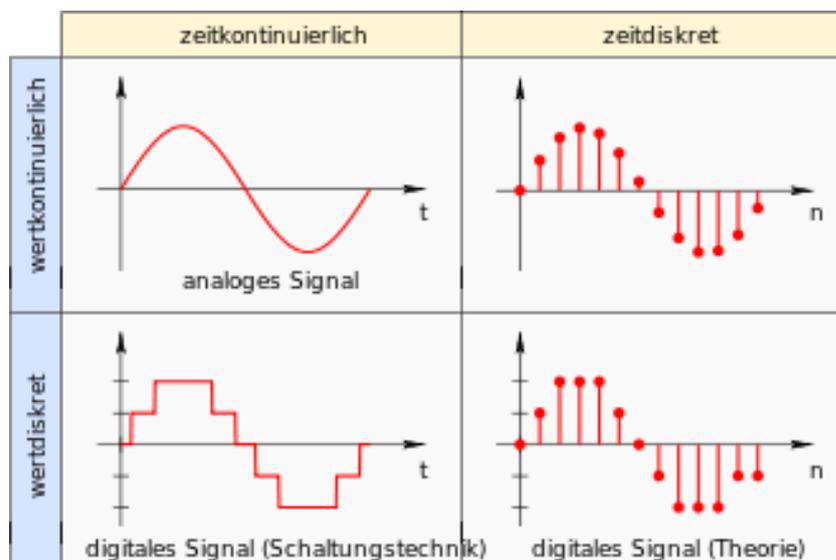


Abbildung 4: Kontinuierliche und diskrete Signale im Vergleich

2.4.2 Das Digitalsignal

Auch Digitalsignale kommen in der Audiotechnik in unterschiedlichsten Formen vor. Abtastsignale, digitale Audiodateien oder zum Beispiel Steuersignale. Ein Digitalsignal im Sinne der Audiotechnik besteht aus sehr vielen endlichen Zahlen bzw. Zahlenpaaren. Diese Zahlen beschreiben im Grunde stets einen Zeitpunkt und einen diesem Zeitpunkt zugeordneten sowie gerasterten Betrag. Die zeitliche sowie betragsbezogene Rasterung bezeichnet man als zeit- und wertdiskret. Die Überführung eines wert- sowie zeitkontinuierlichen Signals in ein wert- sowie zeitdiskretes Signal bezeichnet man als A/D Wandlung oder Digitalisierung.

2.4.3 Das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem

Um eine fehlerfreie Wiedergabe von digitalisiertem Audiomaterial zu gewährleisten, muss das Abtasttheorem von Nyquist und Shannon stets eingehalten werden. Es [...] *besagt, dass ein bandbegrenzte Signal eindeutig rekonstruiert werden kann, wenn es in gleichen Abständen und mehr als zweimal pro Periode abgetastet wird.*⁵

Der menschliche Hörbereich liegt in etwa bei 20Hz – 20kHz. Das bedeutet, dass die Abtastrate bei voller Ausnutzung dieses Bereichs über 40kHz liegen muss, andernfalls würden störende Frequenzen im rekonstruierten Signal auftreten.

⁵ Friesecke 2007, S.498.

Diese Störfrequenzen stehen in keinem sinnvollen Kontext mit dem zu rekonstruierendem Signal und heißen Alias-Frequenzen (F_{Alias}). Der Zusammenhang der Alias-Frequenz gegenüber der ursprünglichen Frequenz lässt sich wie folgt beschreiben:

$$F_{\text{Alias}} = f - M \cdot f_S$$

Um die Einhaltung des Abtasttheorems zu erzwingen, werden Frequenzen welche oberhalb $F_S/2$ liegen durch einen Tiefpassfilter begrenzt. Ein hochfrequenten pfeifen mit 37,5kHz würde bei einer Abtastrate von 48kHz zum Beispiel eine Alias-Frequenz von -10,5kHz ergeben. Eine negative Frequenz, ist dass selbe wie eine positive, jedoch ist deren Phase um 180° verschoben.

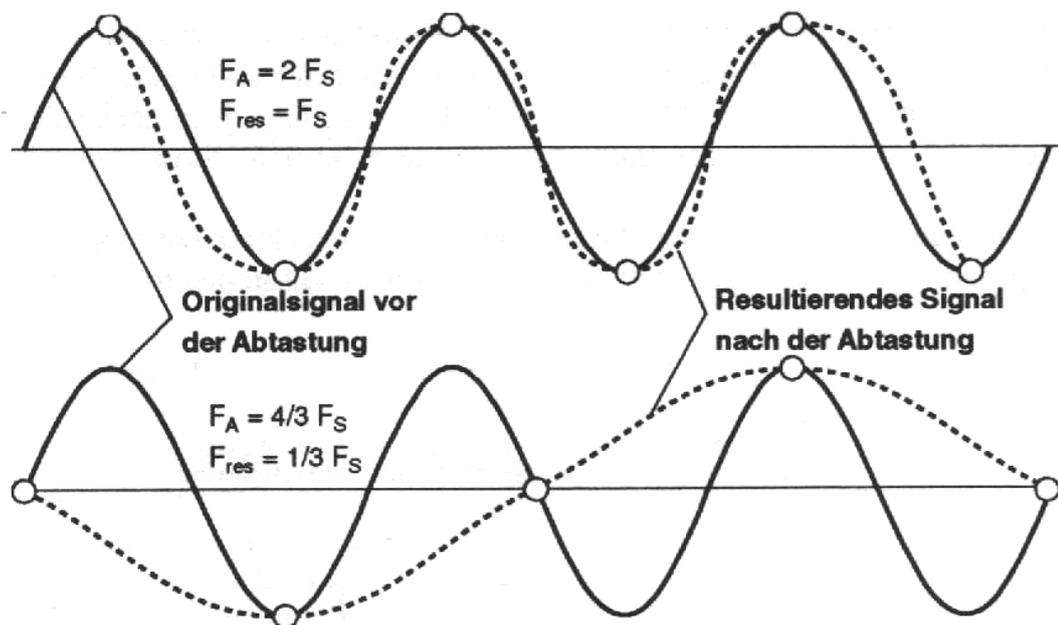


Abbildung 5: Abtastung mit und ohne Einhaltung des Abtasttheorems

Damit die, das Signal begrenzenden Filter, aufgrund ihrer eigenen Güte nicht in den hörbaren Bereich fallen, liegt die heutzutage mindestens verwendete Abtastrate bei 44,1kHz. Das geläufigste Medium hierfür ist die Audio-CD welche mit 16Bit Wortbreite und einer Samplingrate von 44,1kHz arbeitet. Ein Alias-Filter kann dann beispielsweise bei 20,5kHz beginnen und bei 22kHz komplett sperren ohne im hörbaren Bereich zu liegen aber ebenso die Nyquist-Frequenz kleiner $f_S/2$ zu halten.

Da solch ein effektiver Alias-Filter jedoch finanziell sowie technisch recht aufwendig zu realisieren ist und noch weitere Nachteile mit sich bringt, findet übli-

cherweise eine Überabtastung (Oversampling) des Signals statt. Dabei wird aufgrund der Erhöhung der Abtastfrequenz dem Alias-Filter mehr Platz zur Verfügung gestellt, um die benötigte Dämpfung des Signals zu erreichen.

„Je höher das Oversampling ist, desto niedriger ist der Aufwand für das Anti-Aliasing-Filter. Heutiger Standard ist 128-faches Oversampling mit einem passiven analogen Anti-Aliasing-Filter 1.Ordnung.“⁶

2.5 Die Digitalisierung

Im nachfolgenden Kapitel werden die Vorgänge sowie Nebeneffekte die bei der Umsetzung analoger Signale in Digitalsignale vorkommen, erklärt.

2.5.1 Abtastung

Um ein analoges Signal in ein digitales zu wandeln, müssen die folgenden Operationen vorgenommen werden. Nach der Filterung des Signals durch ein Anti-Aliasing-Filter muss das Analogsignal mit einem Abtastsignal multipliziert werden. Dies geschieht mittels eines Abtasters.

„Dabei handelt es sich im Prinzip um einen elektronischen Schalter, der von einer Steuerspannung zum Schließen oder Öffnen veranlaßt wird.[...] Ordnet man den beiden Spannungszuständen die Werte 0 (geöffneter Schalter) und 1 (geschlossener Schalter) zu, stellt sich am Ausgang immer der augenblickliche Signalwert ein, wenn die Schaltspannung den Wert 1 annimmt, ansonsten besitzt das Ausgangssignal den Wert 0.“⁷

2.5.2 Jitter

Ein Problem bei der Digitalisierung von Audiomaterial sind minimale Schwankungen im Abtast- bzw- Übertragungstakt. Diese Taktschwankungen werden als Jitter (zu Dt. zittern, flattern) bezeichnet.

„Das Auftreten von Jitter erzeugt eine Phasenmodulation im zeitdiskreten Bereich, die sich nach der Signalrekonstruktion als verschlechtertes Signal-/Störspannungsverhältnis (Signal-to-Noise-Ratio, SNR) bemerkbar macht.“⁸

⁶ Friesecke 2007, S.504.

⁷ Dittmar 1990, S.11.

⁸ Dickreiter, Dittel, Hoeg, Wöhr 2014, S.666.

Man muss hierbei jedoch zwei Arten des Jitters unterscheiden. Zum einen kann durch Kabel (z.B. falsche bzw. schlechte Impedanzwerte) das Rechtecksignal des Taktes beeinflusst werden. Sinkt die Flankensteilheit so weit ab, dass empfängerseitig nicht mehr zwischen high und low unterschieden werden kann, wird das Audiosignal merklich verschlechtert. Es handelt sich hierbei um Interfacejitter. „*Samplingjitter ist die Ungenauigkeit des digitalen Taktes selbst.*“⁹

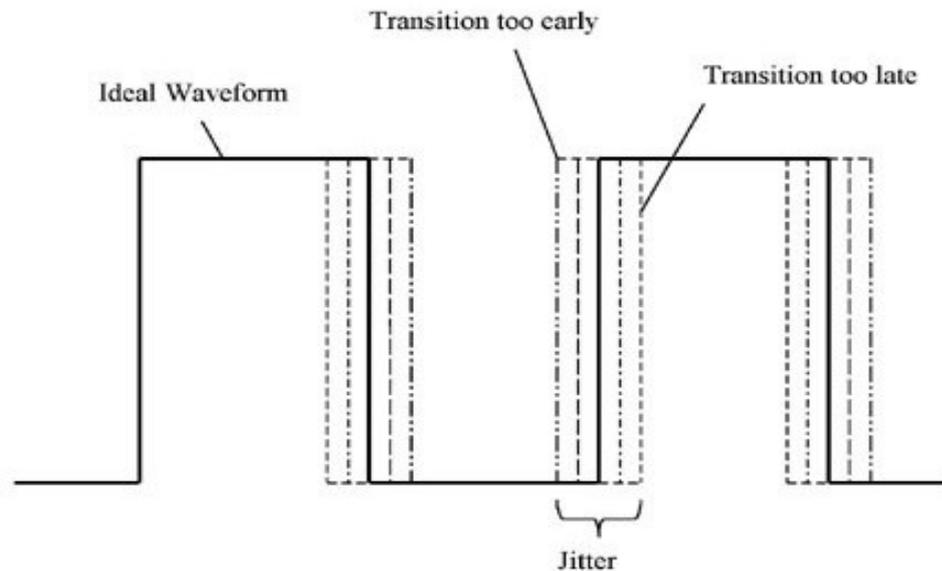


Abbildung 6: Abtastpuls mit Jitter

*„Dem Nutzsignal werden hierbei Seitenbänder hinzugefügt, also zusätzliche Frequenzen, die im Eingangssignal nicht vorhanden waren und die (schlimmer noch) nicht in einem harmonischen Verhältnis zu ihm stehen. Diese Seitenbänder stehen links und rechts (im Frequenzspektrum) vom Nutzsignal, jeweils im Abstand der Frequenz des Jitters. Der Jitter kann selbst als eine Art Schwingung (um den "Norm-Takt" herum) betrachtet werden, und die Frequenz dieser Schwingung wird dem Ursprungssignal aufmoduliert - es bilden sich Differenz- und Summentöne, ähnlich wie bei den Intermodulationsverzerrungen.“*¹⁰

Das Resultat einer Jitterarmen Wiedergabe ist eine verbesserte Räumlichkeit, bessere Ortung der Instrumente, klarerer Sound oder z.B. eine schönere Tiefenstaffelung. Heimianwender sollten in Bezug auf Jitter als Sync die interne Clock des ADC/DAC verwenden, um beste Wandlungsergebnisse zu erzielen.

⁹ Dickreiter, Dittel, Hoeg, Wöhr 2014, S.1280.

¹⁰ fairaudio 2014.

Solange auf digitaler Ebene gearbeitet wird kann Jitter jedoch vernachlässigt werden. Auch ist Jitter auf keinem Medium vorhanden, da es ein reines Übertragungsproblem ist. In den weiteren Betrachtungen zu den Eigenschaften der eigentlichen DAW Engine's, können Jitterprobleme somit außen vor gelassen werden.

2.5.3 Quantisierung

Im nächsten Schritt muss das zeitdiskrete aber immer noch wertkontinuierliche Signal quantisiert werden. Das Wort „quantisieren“ stammt aus der Quantenphysik, in welcher sich Elektronen um einen Atomkern -auf festen Laufbahnenbewegen können, aber niemals dazwischen. Die Spannungswerte welche von der Sample-and-Hold Schaltung geliefert werden, werden nun also an endliche Zahlenwerte (auch Repräsentant) angenähert. Die Bit-Tiefe (Wortbreite) der Audioaufnahme legt fest, wie viele dieser Zahlenwerte bzw. Stufen für die Quantisierung zur Verfügung stehen. Dabei kann die Quantisierungskennlinie linear oder nichtlinear verlaufen. Bei nichtlinearer Quantisierung werden größere Amplitudenwerte gröber aufgelöst, als kleine Amplitudenwerte. Somit wird erreicht, dass das Quantisierungsrauschen bei gleicher Wortbreite geringer ausfällt. Eine Aufnahme im 16Bit Format besitzt $2^{16} = 65536$ Stufen, was bei einer Abtastrate von 44,1kHz dem CD-Standard entspricht. Im professionellen Bereich sind Samplingfrequenzen von mindestens 48kHz üblich, sowie eine Bittiefe von 24Bit, also $2^{24} = 16777216$ Quantisierungsstufen. Dies entspricht der 256-fachen Genauigkeit einer mit 16Bit Wortbreite quantisierten Aufzeichnung. Am Ende der Quantisierung steht nun also ein zeit- sowie wertdiskretes Signal welches nur noch von Zahlen repräsentiert wird.

Da die Samples jedoch nur Annäherungen an die Originalwerte sind, entstehen zwangsläufig Fehler. Diese Fehler nennt man Quantisierungsfehler welche bei der Wiedergabe des Audiomaterials ein Quantisierungsrauschen verursachen. Der Betrag eines einzelnen Quantisierungsfehlers ist auf die Hälfte des Betrages einer Quantisierungsstufe begrenzt. Bei einem Studiopegel von 1,55V entspricht dies einem maximalen Fehler von $0,461936 \cdot 10^{-7}$ V (24Bit / 0,00000298023224%) gegenüber $0,1953125 \cdot 10^{-2}$ V (16Bit Aufzeichnung / 0,00076293945313%).

Der Klangcharakter dieses Quantisierungsfehlers ähnelt ungefähr dem von weißem Rauschen.

2.5.4 Dithering

Da die digitalen Verzerrungen welche beim Quantisieren entstehen, vom Menschen sehr schnell als Härte, Kälte oder Schärfe wahrgenommen werden, müssen die digitalen Audiodateien mit einem Dithering Algorithmus bearbeitet werden. Besonders auffällig werden diese Fehler bei tiefen Frequenzen oder niedriger Aussteuerung des Signals.

Die Quantisierungsfehler werden dann immer weniger stochastisch, korrelieren immer stärker mit dem Eingangssignal und verzerren das Eingangssignal deutlich. Durch das hinzufügen von weißem Rauschen kann dem jedoch entgegen gewirkt werden. Dieser Prozess nennt sich Dithering. Der Rauschanteil des Dithers im Signal entspricht ungefähr dem Anteil eines Quantisierungsfehlers. Die durch die Quantisierung festgesetzten Werte werden durch das Hinzufügen dieses Rauschens stets ein wenig verändert. Im Mittel liegen die geditherten Werte jedoch näher am Original.

„Durch das addierte Rauschen passieren zwei Dinge: Das abzutastende Signal erscheint durch das Rauschen größer, da das Rauschen mal in positiver, mal in negativer Richtung eine Spannung zum Nutzsignal addiert. Auf diese Weise kann der Wandler das Gesamtsignal eher erfassen. Durch das berechnete, statische Rauschen wird es dem Ohr möglich, sich an das Rauschen zu gewöhnen und dieses zu maskieren. Dadurch erscheint das Gesamttrauschen des Systems geringer, als ohne Dither. Technisch gesehen ist jedoch mehr Rauschen vorhanden. Beides zusammen wirkt sich psychoakustisch gesehen positiv auf das Nutzsignal aus. Nunmehr können Signale abgetastet werden, die eigentlich bereits unter der Erfassungsschwelle eines A/D-Wandlers liegen und die Verzerrungen, die bei der Quantisierung entstehen, werden durch das Ditherrauschen verdeckt.“¹¹

Die Quantisierungskennlinie wird also linearisiert. Trotz der etwas größeren Rauschleistung bewirkt das Dithering, dass die Auflösung des Signals deutlich verbessert wird.

Die Auswirkungen eines guten Dithering Algorithmus können im Bereich der professionellen Musikbearbeitung somit ganz klar zum Beispiel bei Hallfahnen oder der Räumlichkeit wahrgenommen werden. Dithering sollte zwar stets der letzte Schritt einer Audibearbeitung sein, jedoch müssten Signale, wenn technisch korrekt gearbeitet werden soll, auch intern der DAW, einem Dithering un-

¹¹ Friesecke 2007, S.546.

terzogen werden. Bearbeitungsschritte wie zum Beispiel EQ`ing oder Kompression sind keine einfachen Multiplikations- oder Additionsvorgänge von Binärzahlen. Plugins rechnen intern oft sehr präzise mit weit mehr als den üblich verwendeten 24Bit Wortlängen. Dies hat jedoch zur Folge, dass beim Rückrechnen, die Samples beschnitten bzw. gerundet werden müssen. Dies zieht wiederum weitere Quantisierungsfehler mit sich. Theoretisch müssten professionelle Plugin`s vor der Ausgabe des digitalen Audiomaterials eine Möglichkeit anbieten, ein Dithering durchzuführen, um diese Rundungs- und Quantisierungsfehler zu vermindern.

Dithering sollte also stets durchgeführt werden, wenn man zu einer kleineren Wortlänge wechselt, also zum Beispiel von 24 auf 16Bit. Im Summierungsprozess sollte Dithering keine Rolle spielen, da heutige DAW`s intern meist mit mindestens 32Bit floating point rechnen.

2.5.5 Noise Shaping

Eine weitere Möglichkeit um die Signalqualität psychoakustisch zu verbessern, ist das sogenannte Noise Shaping. Ähnlich dem Dithering wird hier dem Signal vor der Quantisierung Rauschen zugefügt. Allerdings handelt es sich hierbei nicht um weißes Rauschen, sondern um speziell geformtes Rauschen (shaped noise). Auch wenn eigentlich der Signal-Rauschabstand (SNR, Signal-Noise-Ratio) sinkt, bringt Noise Shaping eindeutige Vorteile:

„Das hinzugefügte Rauschen ist kaum oder gar nicht hörbar, da es in einen Frequenzbereich geschoben wurde, der nicht wahrgenommen wird. Hierzu gibt es beispielsweise auch Noise-Shaping Frequenzgänge, die sehr stark an Kurven gleicher Lautstärke angelehnt sind. Der Quantisierungsvorgang erfolgt besser, da durch das zusätzliche Rauschsignal auch bei leisen Nutzsignalen immer ausreichend Bit für die Quantisierung verwendet werden können.“¹²

Die Rauschenergie ist meist weit weniger als die, die dem Signal durch Dithering zugeführt wird. Durch die „Formung“ des Rauschens kann also erreicht werden, dass in für das Gehör empfindlichen Bereichen das Rauschen unhörbar ist. Wiederum in Bereichen lauter wird in denen es schlecht vom Gehör wahrgenommen werden kann. Bei Audiomaterial welches mit Abtastraten wie zum Beispiel 96kHz ausgegeben wird kann dies also auch eine komplette Verschiebung des Rauschens in den für den Menschen unhörbaren Bereich bedeuten.

¹² Friesecke 2007, S.547.

2.6 Codierung

Um die Digitalisierung des analogen Signals abzuschließen, muss im nächsten Schritt eine Codierung vorgenommen werden. Jedoch muss, wenn von Codierung gesprochen wird, zwischen Quellcode und Kanalcode unterschieden werden.

„Alle für den Vorgang der Umwandlung charakteristischen Angaben, wie die Anzahl der Bits je Abtastmuster, die Art der Quantisierung und den verwendeten Konversionscode bezeichnet man auch als „Quellencode“. Darüberhinaus sind in digitalen Systemen noch andere Codierungen üblich. Häufig sind Quellcodierte Signale nicht zur direkten Weiterverarbeitung geeignet und müssen weitere Umwandlungsprozesse durchlaufen.“ „Die Spezifik des Übertragungs- und Aufzeichnungsmediums erfordert in vielen Fällen noch weitere Anpassungen an den jeweiligen „Übertragungskanal“, die man als „Kanalcodierung“ bezeichnet.“¹³

Außerdem werden noch weitere Fehlercodierungen sowie Hilfskodierungen vorgenommen um eine möglichst effiziente und fehlerfreie Übertragung der Information zu gewährleisten.

¹³ Webers 2003, S.160.

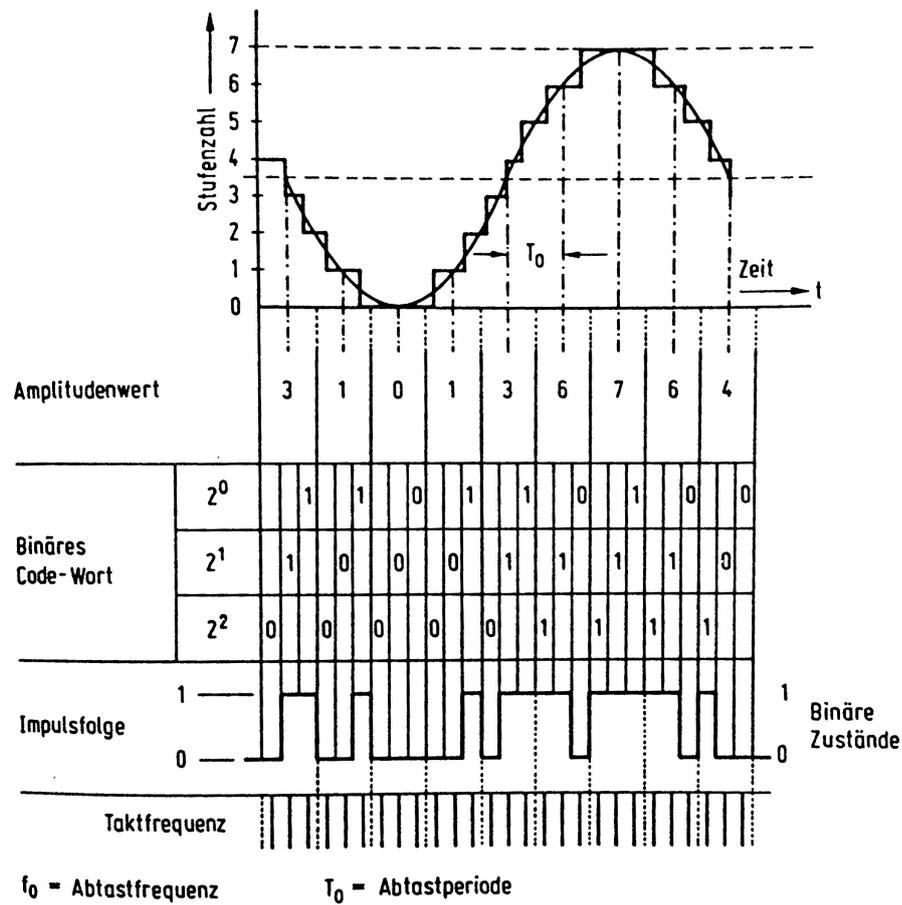


Abbildung 7: Umsetzung einer analogen Schwingung in Digitalinformationen

2.6.1.1 Quellcodierung

Die Pulscodemodulation ist ein sehr einfaches Modulationsverfahren, welches in der Audiotechnik häufig Anwendung findet. Es bildet die Grundlage vieler anderer Modulationsverfahren wie zum Beispiel der Differential Pulscode Modulation, der Delta- sowie der Delta-Sigma Modulation. Alle genannten Modulationsarten sind Quellcodeverfahren.

Um einen PCM-Signal zu erzeugen müssen nach Abtastung und Quantisierung den Samples je nach entsprechendem Repräsentant, Codewörter zugeordnet werden.

Da bei den meisten Anwendungen eine Binäre Codierung angewandt wird, entsteht somit ein ganz normaler binärer Bitstream bestehend aus 1 und 0. Die Länge der Codewörter ist somit ganz klar von der Anzahl der Quantisierungsstufen abhängig. Vorteilhaft bei der PCM ist deren Störungstoleranz da beim Empfänger lediglich zwischen high und low (1 und 0) unterschieden werden muss. Ein Nachteil ist die hohe Datenrate (z.B. $24\text{bit} * 2 \text{ Kanäle} * 48\text{kHz} = 2,3\text{Mb/s}$). Die DPCM ist diesbezüglich ein wenig im Vorteil da hier die Eigen-

schaften des Signals besser genutzt werden. Da davon auszugehen ist das i.d.R. keine großen Werteänderung der Amplitude zwischen zwei Samples stattfinden, wird nur die Differenz der aufeinander folgenden Datenworte übertragen. Durch die resultierende Verringerung der Wortbreite wird natürlich die zu übertragene bzw. zu speichernde Datenmenge reduziert ohne jeglichen Verlust an Informationsgehalt.

2.6.1.2 Kanalcodierung

„Die Kanalcodierung hat die Aufgabe, digitale Signale so aufzubereiten, dass diese einen Nachrichtenkanal ohne Beeinträchtigung passieren können.“¹⁴

Um diese fehlerfreie Übertragung der Informationen zu gewährleisten müssen die Daten mit Redundanzen versehen werden. Darunter fallen Fehlerkorrektur sowie Prüfdaten. Dabei gibt es nach der Fehlererkennung verschiedene Wege mit diesen um zu gehen und zu korrigieren.

„Steht auf dem Signalführungsweg ein Rückkanal zur Verfügung, kann bei erkannten Fehlern eine Wiederholung der Übertragung veranlasst werden; man spricht von Rückwärtskorrektur. Bei nicht vorhandenem Rückkanal lässt sich durch Codespreizung (interleaving) erreichen, dass Bündelfehler (burst errors) in Einzelbitfehler umgewandelt und mit Hilfe von Paritätsbits (parity bits) korrigiert werden können. Verfahren dieser Art werden als Vorwärtskorrektur bezeichnet.“¹⁵

Alle weiteren Hilfcodierungen werden genutzt um Systemspezifische Eigenschaften und Ähnliches zu übertragen und stehen mit dem Signal bzw. der Übertragung des Signals nur in indirektem Zusammenhang. Darunter fallen i.d.R. auch „Adress- und Zeit-Code-Informationen“.¹⁶

2.7 Delta-Sigma Wandler

Da in heutigen Audiogeräten fast ausschließlich Delta-Sigma Wandler eingesetzt werden soll dessen Funktionsweise kurz erläutert werden.

In heutigen Audiogeräten kommen fast ausschließlich Delta-Sigma Wandler zum Einsatz. Dies hat mehrere Gründe. Delta-Sigma Wandler sind vom Aufbau her recht einfach zu realisieren wodurch deren Fertigungskosten gering gehalten werden können. Des Weiteren weisen sie eine hervorragende Linearität auf.

¹⁴ Dickreiter, Dittel, Hoeg, Wöhr 2014, S.686.

¹⁵ Dickreiter, Dittel, Hoeg, Wöhr 2014, S.686.

¹⁶ Webers 2003, S.161.

Ausschlaggebend hierfür ist die generelle Funktionsweise dieser Wandlertypen, das 1-Bit Prinzip, welches sich von allen anderen Wandlerprinzipien grundlegend unterscheidet. Delta-Sigma Wandler bestehen immer mindestens aus 2 Komponenten. Dem $\Delta\Sigma$ -Modulator sowie einem nachgeschalteten Tiefpassfilter. Bei einer A/D Wandlung ist der Modulator als analoges Element aufgebaut und der Tiefpassfilter wird digital realisiert. Bei der Wandlung von digital zu analog ist dies genau umgekehrt. Außerdem ist es möglich, dass ein weiterer Tiefpassfilter in analoger oder digitaler Ausfertigung dem Modulator vorgeschaltet wird.

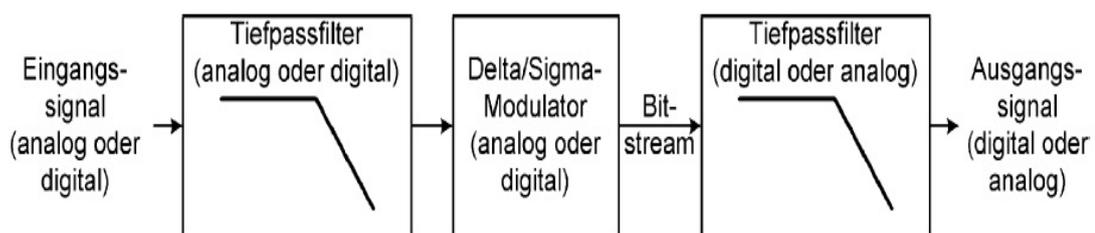


Abbildung 8: Komponenten der Delta-Sigma Wandlung

Der $\Delta\Sigma$ -Modulator ist das entscheidende Element in dieser Schaltung. Hier wird der Bitstream erzeugt. Er ist einfach gesagt eine Aneinanderreihung von Einsen und Nullen deren Mittelwert eine Annäherung an den abgetasteten Originalwert ergeben.

„Überwiegen im 1Bit-Signal die Einsen gegenüber den Nullen, so stellt dies einen positiven Analogpegel dar. Überwiegen die Nullen, handelt es sich um negative Analogpegel. Das Verhältnis von „1“ und „0“ bestimmt nun den exakten Betrag. Voraussetzung dafür ist allerdings eine erheblich schnellere Folge der Wechsel zwischen „1“ und „0“ als dies bei normaler Abtastrate der Fall wäre. Deshalb benötigen Delta / Sigma – Wandler eine sehr hohe Überabtastung (Oversampling) um die hohe Taktrate für den Bitstream zu erreichen.“¹⁷

Im Detail wird der Bitstream wie folgt erzeugt. Vom anliegenden Eingangssignal wird im Differenzverstärker der zuletzt bekannte Ausgabewert (entweder -1 oder +1) subtrahiert. Im Integrator wird diese Differenz zur zuletzt bekannten Differenz addiert. Im nächsten Schritt wird mit Hilfe des Komparators (in der Abb.5

¹⁷ Weinzierl 2008, S.894f.

engl. Quantizer) verglichen, ob der Integratorausgang positiv oder negativ ist und dementsprechend eine +1 oder -1 zugeordnet. Dieser Wert wird nun einem 1Bit Digital-Analog Wandler zugeführt welcher mit der Oversamplingfrequenz getaktet ist und solange gehalten bis der nächste Taktzyklus beginnt. Anschließend wird ein Mittelwert gebildet welcher sich dem Originalwert weitestgehend angenähert haben müsste. Er entspricht jedoch nie genau dem Originalwert da die bei Wandlung entstehenden ebenfalls Fehler entstehen welche das Signal überlagern.

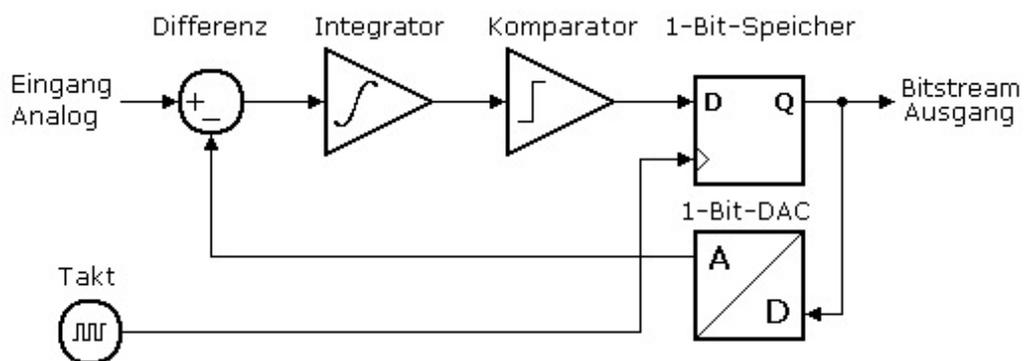


Abbildung 9: Blockschaltbild eines Delta-Sigma Modulators 1.Ordnung

Die fehlende Auflösung im Amplitudenbereich wird hier ganz klar durch die Geschwindigkeit dieses Wandlers ersetzt. Diese hohe Geschwindigkeit wird erreicht, da der Wandler nur noch in der Lage sein muss zwischen 1 und 0 zu unterscheiden und eben nicht wie bei allen anderen Wandlerprinzipien zigtausende unterschiedliche Spannungswerte bewerten muss. Die Schaltfrequenz solch einer Operation liegt, bei einer Samplingfrequenz von 48kHz, bei ungefähr 6,2MHz (bei 128-fachem Oversampling). Durch die hohe Oversampling Rate (dt. Überabtastrate) werden die Störspannungen in den oberen Frequenzbereich des Bitstreams verlagert wobei der untere Frequenzbereich die gewünschten Informationen enthält. Um den Anteil störender Signale (in der Regel Rauschen, kann jedoch auch tonal werden) weiterhin zu vermindern ist es vorteilhaft Modulatoren höherer Ordnung zu verwenden. Ein $\Delta\Sigma$ -Modulator 2.Ordnung hat nach dem Integrator einen weiteren Differenzverstärker sowie einen zweiten Integrator in Reihe geschaltet. Modulatoren deren Ordnungszahl über 2 hinaus geht sind nicht mehr so einfach zu realisieren da durch das Einbinden mehrerer Integratoren eine Phasendrehung entsteht.

Ein weiterer Vorteil ist, dass der Dynamikumfang durch die Verwendung von $\Delta\Sigma$ -Modulatoren höherer Ordnung signifikant gesteigert werden kann.

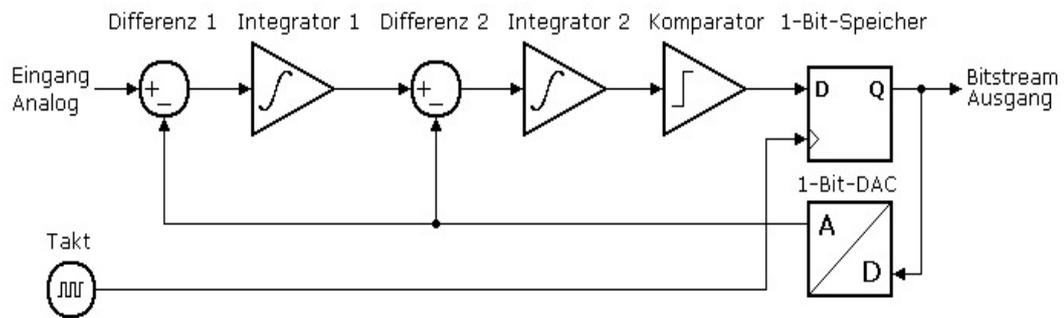


Abbildung 10: Delta-Sigma Modulator 2.Ordnung

Die für die Testaufnahmen verwendete Audiokarte Metric Halo ULN2d expanded arbeitet in beide Richtungen mit Dual-Bit Delta-Sigma Wandlern. Diese sind eine spezielle Form der Delta-Sigma Wandler welche durch die Verwendung von Multibit-Modulatoren (Parallelwandlern mit 2 bis 5 Bit) anstatt eines Komparators einen Multi-Bitstream erzeugen. „Ihr Vorteil liegt darin, dass sie einen erweiterten Dynamikumfang und eine höhere Auflösung besitzen und gleichzeitig deren Anfälligkeit auf Taktjitter reduziert wird.“¹⁸ Nachteilig ist, dass die Verwendung von Parallelwandlern die ursprünglich vermiedenen Linearitätsprobleme teilweise zurück kehren lässt. Die möglichen Samplingraten betragen 1kHz-108kHz mit 128-fachem Oversampling.

¹⁸ Weinzierl 2008, S.902.

3 Signalverarbeitung

Die fortgeschrittene Computertechnik erlaubt es heutzutage jedem, Audiodaten zu übertragen bzw. zu empfangen, zu speichern oder weiter zu verarbeiten. Was früher nur mit aufwendigen und kostspieligen Anlagschaltungen realisiert werden konnte, können leistungsstarke Personal Computer mit Leichtigkeit bewerkstelligen. Von einfachen Bearbeitungsschritten wie dem Mischen bis hin zur Bearbeitung des Signals mit komplexen Effektverkettungen sind die Grenzen meist nur durch die eigene Phantasie gesetzt.

Die Grundlagen all dieser Bearbeitungsschritte sind auf digitaler Ebene jedoch simple mathematische Rechenoperationen. Einige dieser Rechenoperationen werden im Folgenden kurz erläutert um ein Grundverständnis für die in einer Workstation vorherrschenden Prozesse zu bekommen. Es seien als einfache Beispiele die Lautstärkenänderung eines Signals welche einer einfachen Multiplikation entspricht oder das Zusammenmischen mehrerer Signale das mittels Addition realisiert wird, genannt. Ob diese Rechenoperationen vom Rechner selbst oder von einem dediziertem DSP vorgenommen werden spielt dabei keine Rolle, da sich somit nur der Ort und die Geschwindigkeit (aufgrund der Prozessorarchitektur) der Berechnungen ändern. Jedoch ist es möglich, dass auch hier Ungenauigkeiten auftreten die zu einer Verschlechterung der Audioqualität führen können.

„Die Anwendung von definierten Rechenoperationen zur digitalen Signalverarbeitung sollte in der Theorie zu beliebig genauen Ergebnissen führen. In der Praxis ist jedoch die Rechengenauigkeit durch die im Signalprozessor verwendete Wortbreite begrenzt. Aus dieser Datenwortkürzung (truncation) oder Rundung (decimation) resultieren Fehler, die den Charakter eines Quantisierungsfehlers haben. Zur Minderung der störenden Wirkung des Rechenfehlers können daher prinzipiell die selben Maßnahmen wie bei der Reduktion von Quantisierungsfehlern durch Signalwandler ergriffen werden.“

3.1 Audio Engine

Die Audio-Engine an sich, ist der Kern jeder Digital Audio Workstation. Sie übernimmt alle grundlegenden Operationen wie zum Beispiel die Summierung, das Anheben oder Absenken der Pegel der Kanäle aber auch die Verwaltung

der Speicherrecourcen. Dies ist wichtig damit eine fehlerfreie Wiedergabe der gepufferten Audiodateien gewährleistet werden kann. Auch werden durch die Engine alle Anderen für die Berechnung bzw. Verarbeitung des Audiomaterials benötigten Hardwarekomponenten angesteuert. Im Zuge dieser Arbeit wird jedoch nur auf die Teile der Engine eingegangen welche zur Signalverarbeitung des Audiomaterials von Nöten sind.

3.2 Zahlensysteme

Um zu verstehen wie digitales Audiomaterial in einer DAW verarbeitet wird muss man sich zwangsläufig mit Zahlensystemen und ein wenig Arithmetik auseinandersetzen. Im folgenden Teil werden die wichtigsten Zahlensysteme vorgestellt. Anschließend werden die Grundrechenarten im Dualen System kurz erläutert, da alle von der Engine ausgeführten Operationen auf diesen simplen Berechnungen beruhen.

3.2.1 Dezimalsystem

Das Dezimalsystem sollte jedem geläufig sein. Es ist ein Zahlensystem welches auf der Basis 10 aufbaut. Jede Stelle kann 10 verschiedene Werte annehmen. Soll zum Beispiel die Zahl 5678 beschrieben werden so muss man nur die einzelnen Stellen mit entsprechender Wertigkeit zusammensetzen.

z.B. $5 \cdot 10^3 + 6 \cdot 10^2 + 7 \cdot 10^1 + 8 \cdot 10^0$ entspricht 5678 (5000+600+70+8)

3.2.2 Dualsystem

Die binäre Zahlendarstellung ist in der Digitaltechnik die am meisten gebräuchliche. Der Grund dafür ist die sehr einfache Realisierung der Darstellung und Weiterverarbeitung zweier Zustände wie zum Beispiel Spannung an oder Spannung aus, high oder low bzw. eins und null. Des Weiteren sind Systeme mit mehr als zwei Zuständen technisch anfälliger auf Störungen und komplizierter in Bezug auf die Störsicherheit.

Das duale Zahlensystem ist dem dezimalen sehr ähnlich, allerdings ist hier die Basis 2. Somit kann jede Stelle einer Binärzahl auch nur 2 verschiedene Werte annehmen, nämlich 0 und 1. Daher auch der Name Bit (Binary digit). Soll als Beispiel die Zahl 1101001 in eine einfacher zu lesende Form gebracht werden müssen wie beim dezimalen Zerlegen der Zahl die einzelnen Stellen mit ihrer Wertigkeit aufaddiert werden. So ergibt sich ausgeschrieben folgendes:

$$1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 \text{ entspricht } 105 \text{ (} 64+32+0+8+0+0+1 \text{)}$$

Mit Dualzahlen kann man auch genau wie mit Dezimalzahlen rechnen. Einige Rechenoperationen lassen sich sogar Blitzschnell ausführen. Soll zum Beispiel eine Zahl verdoppelt werden so muss nur die komplette Zahl um eine Stelle nach links verschoben werden. Die Stelle am MSB verschwindet und das LSB wird mit 0 aufgefüllt. Die Division durch 2 funktioniert genauso nur umgekehrt.

Man kann so zB. eine Dualzahl sehr einfach und schnell mit 256 multiplizieren indem man sie 8 Stellen nach links verschiebt. Wichtige Operationen im Zusammenhang mit digitaler Signalverarbeitung sind die Und- (AND), Oder- (OR), sowie die Nicht- (NOT) Operationen deren Wahrheitstabellen im Anhang zu finden sind. Im Bereich der Fehlererkennung trifft man auch häufig auf die Exklusiv-Oder-Operation (XOR). Sie ist der Oder-Operation sehr ähnlich zeigt jedoch Unterschiede an den Eingängen auf (Eingänge gleich = 0 / Eingänge unterschiedlich = 1) und kann so zum Beispiel hervorragend zur Prüfung von Paritätsbits und Prüfsummen verwendet werden.

Obacht ist jedoch bei der Wortbreite geboten. Sollen als Beispiel 2 Binärzahlen addiert werden deren Wortbreite 8Bit (Werte von 0-255) beträgt ist es Möglich, dass das Ergebnis eine größere Wortbreite (9Bit (512) da der mögliche Bereich des Ergebnisses 0-510 ist) benötigt.

Bei einer Wortbreite von N-Bit können mit dieser Zahl 2^N Werte dargestellt werden. Deshalb kann eine Audioaufnahme mit 16Bit höchstens 65536 verschiedene Quantisierungsstufen haben.

Dies ist dann von Bedeutung wenn zB. in der DAW Kanäle summiert werden.

„In einem digitalen Mischpult sollen 64 ($=2^6$) Kanäle mit jeweils 24-Bit Wortbreite addiert werden. Die Stereosumme muss hierzu eine Wortbreite von $6 \cdot 24 = 30$ -Bit haben. Verfügt sie nur über 24-Bit Wortbreite, so hätte das zur Folge, dass die 24-Bit Eingangswerte zunächst auf 18-Bit reduziert werden müssten, also um 36dB leiser gerechnet werden müssten, bevor sie zusammenaddiert werden könnten. Dieses „leiser Rechnen“ hätte jedoch einen Verlust im

*Signal-Rauschabstand zur Folge und sollte deswegen unterbleiben.*¹⁹

Aus diesem Zusammenhang wird nun also ersichtlich warum eine DAW intern mit mindestens 32Bit rechnen sollte. Da die meisten der aktuellen Workstations jedoch intern schon mit 64Bit Fließkommazahlen rechnen stellt dies in der Praxis kaum noch ein Problem dar. Probleme könnten hier nur bei einer sehr hohen Kanalzahl auftreten. Bei einer Wortbreite von 24 Bit wäre dies jedoch erst der Fall sollten 2^{40} Spuren überschritten werden und somit nicht von Relevanz. Auch bei interner Verarbeitung mit 32Bit sollte in der normalen Audioproduktion kaum die Grenze erreicht werden. Bei selbem Beispiel mit 24Bit müssten hier 256 Spuren bei der Summierung überschritten werden. Es ist jedoch schon bei dieser Spurenzahl davon auszugehen das eher die Hardwarekomponenten überfordert sind und den Anwender zum splitten des Projektes zwingen wenn er eine durchgehend gute Audioqualität fordert.

3.2.3 Hexadezimalsystem

Das Hexadezimalsystem ist ein Wertesystem mit Basis 16. Jedes Bit kann somit also 16 verschiedene Werte annehmen. Da das Dezimalsystem jedoch nur 10 verschiedene Zeichen beinhaltet, wurden für die fehlenden Werte die Buchstaben A bis F definiert. Der Zeichenvorrat lautet also 0,1,2, ... ,9,A,B,C,D,E,F. Wie bei den zwei anderen Zahlensystemen ergeben sich die Werte durch simples aufaddieren der einzelnen Stellen.

$$B00B15 = 11 \cdot 16^5 + 0 \cdot 16^4 + 0 \cdot 16^3 + 11 \cdot 16^2 + 1 \cdot 16^1 + 5 \cdot 16^0$$

entspricht 11537173 (11534336+2816+16+5)

3.2.4 Festkommaformat

Wird eine höhere Systemdynamik benötigt müssen die Zahlenwerte im Fließkommaformat (auch Gleitkomma, Floating Point oder kur Float) dargestellt werden. Digitales Audio wird heutzutage sehr oft auf diese Weise mit der einfachen 32Bit Genauigkeit oder der „double precision“ von 64Bit berechnet. Bei der Fließkommadarstellung handelt es sich um eine ganz normale Exponential-schreibweise. Der Große Vorteil liegt darin, dass die Verzerrungen welche aufgrund dieser Rechenoperationen entstehen verschwindend gering sind und die Systemdynamik sehr hoch.

¹⁹ Webers 2003, S.490.

Soll zum Beispiel die Zahl 1.234.567.890 als Fließkommazahl dargestellt werden so ist es möglich das die Mantisse als 1,23456789 geschrieben wird und dazu die Basis 10^x mit dem entsprechenden Exponenten (hier 9). Da das Komma je nachdem wie der Exponent gewählt ist verschoben werden kann nennt sich diese Form der Zahlendarstellung Fließkommaformat.

Im Bereich digitaler Audioformate ist der IEEE 754 Standard die Norm. Die Zahlen setzen sich hier wie folgt zusammen. Das erste Bit, das Most Significant Bit (MSB), steht ganz links und gibt der Zahl das Vorzeichen. Dabei ist die 0 positiv und eine 1 bedeutet ein negatives Vorzeichen. Danach folgen 8Bit welche den Exponenten ergeben. Der Exponent hat einen negativen Offset von 127. Soll also zum Beispiel die Zahl 2 als Exponent stehen muss die Zahl 129 gespeichert werden. Nun folgt ein verstecktes Bit dessen Wert immer 2^0 also 1 ist. Dadurch hat die in den nächsten 23 Bit folgende Mantisse immer mindestens den Wert 1.

3.2.5 2er-Komplement Zahlen

Um bei digitalen Audiodaten negative werte darstellen zu können wurden die 2er-Komplement Zahlen definiert. Da in der digitalen Welt jedoch keine Vorzeichen bekannt sind wird bei dieser Darstellung ein Vorzeichenbit benötigt. Steht im MSB eine 1 so ist der folgende Zahlenwert negativ. Bei einer Null handelt es sich entweder um den Wert 0 (ist positiv definiert) oder eine andere positive Zahl. Dabei ist das MSB nicht wie üblich mit 2^0 sondern mit $-1*2^0$ definiert.

Bei Zahlen mit n Bit liegen die Werte zwischen $-2^{n-1}, \dots, 0, \dots, 2^{n-1}-1$, dh. bei einer 16Bit Zahl verteilen sich die 65536 Quantisierungsstufen auf 32768 im negativen Bereich sowie die 0 und 32867 weitere Stufen im positiven Bereich. Der Wertebereich dieser Quantisierungsstufen ist von genau -1 bis fast +1 definiert. Um Übersteuerungen zu vermeiden ist es klar, dass der Wert -1 nicht benutzt werden kann. Ein Sinus als Beispiel mit der Amplitude von -1 hätte aufgrund dessen, dass 0 als positiv definiert ist und die größtmögliche positive Quantisierungsstufe mit $2^{n-1}-1$, schon eine Übersteuerung zur Folge. Es wird also 1 Quantisierungsstufe in der Dynamik verschenkt, was wie weiter oben schon beschrieben jedoch sehr gering ausfällt.

Es gibt jedoch noch weitere Bedingungen zur Definition von 2er-Komplement Zahlen.

„0d muss auch 0b und 0h sein, damit der Nulldurchgang bei der Multiplikation (=lauter) und Division (=leiser) des Signals nicht verschoben wird. Die kleinste negative Zahl muss, wenn sie mit der kleinsten positiven Zahl addiert wird, 0 ergeben. Dies funktioniert nur, wenn die Wortbreite der Binärzahl definiert ist. Wäre die Wortbreite nicht auf 16Bit festgesetzt, so würde die Addition ein 17-Bit Ergebnis liefern, das ungleich Null wäre. Nur aufgrund der Tatsache, dass das 17te Bit mit 16-Bit Wortbreite nicht dargestellt werden kann, ergibt die Addition der beiden Zahlen tatsächlich Null.“²⁰

3.3 Arithmetik im dualen System

In jedem Bearbeitungsschritt welcher mit digitalen Audiodaten ausgeführt wird, finden arithmetische Berechnungen statt. Im folgenden Teil sollen die grundlegenden Rechenarten kurz erläutert werden. Es wird sich hier nur auf das Duale Zahlensystem bezogen.

3.3.1 Addition

Um zwei Werte im dualen Zahlensystem zu addieren verfährt man ähnlich der schriftlichen Addition des Dezimalsystems. Augend und Addend werden zu einer Summe addiert, ein Übertrag auf das nächste Bit erfolgt jedoch schon beim Überschreiten der 1 (Ergebnis der Spalte \geq Basis 2).

Beispiel:

$$\begin{array}{r}
 1000110 \quad (70_d) \\
 + 1011100 \quad (92_d) \\
 \hline
 \text{Übertrag} \quad 111 \\
 \text{Summe} \quad 10100010 \quad (162_d)
 \end{array}$$

3.3.2 Subtraktion

Auch die Subtraktion erfolgt ähnlich der im dezimalen Zahlensystem. Der Subtrahend wird vom Minuend abgezogen und ergeben die Differenz. Ist der Subtrahend größer als der Minuend wird ein wiederum Borger geschrieben.

²⁰ Webers 2003, S.492f.

Beispiel:

$$\begin{array}{r}
 1011100 \quad (92_d) \\
 - 1000110 \quad (70_d) \\
 \text{Borger} \quad 11 \\
 \text{Differenz} \quad 0010110 \quad (22_d)
 \end{array}$$

Beiden Rechenoperationen liegt die Wahrheitstabelle einer XOR-Operation zu Grunde wodurch sie sehr einfach realisiert werden können.

Es ist aus verschiedenen Gründen jedoch sinnvoller die Subtraktion auf eine Addition zurück zu führen.²¹ Um dies zu realisieren muss auf die Komplementdarstellung zurückgegriffen werden. Man geht wie folgt vor. Man bildet das 2er-Komplement des Subtrahenden durch invertieren aller Stellen und fügt eine 1 hinzu.

$$1000110 (70_d) \rightarrow 0111001 + 1 \rightarrow 0111010$$

Man addiert das Komplement zum Minuend hinzu.

$$\begin{array}{r}
 1011100 \quad (92_d) \\
 + 0111010 \quad (\text{Komplement von } 70_d) \\
 \text{Übertrag} \quad 1111 \\
 \text{Summe} \quad 10010110
 \end{array}$$

Das Weglassen des zusätzlichen Bits bei (N+1) welches nicht im betrachteten Zahlenbereich liegt, liefert das endgültige Ergebnis

$$0010110 \quad (22_d)$$

²¹ vgl. Weitowitz, Urbanski 2007, S.6.

Hier noch ein kurzes Beispiel für die Rechnung $70_d - 92_d$ da wie schon beschrieben mit der 2er-Komplement Darstellung durch eine Neucodierung der Dualzahlen auch negative Werte repräsentiert werden können.

$1011100 (92_d) \rightarrow 0100011 + 1 \rightarrow 0100100$ (2er-Komplement)

	1000110	(70 _d)
	+ 0100100	(K 92 _d)
Übertrag	1	
Summe	1101010	(entspricht -22 _d)

Ein Wertebereich einer 16Bit Zahl im 2er-Komplement erstreckt sich wie schon erwähnt von -32768 bis 32767. Der Wert Null ist positiv deklariert.

Die neu codierten Werte lauten zum Beispiel (hier mit 4Bit)

2er-Komplement	dezimal
----------------	---------

...

1100	-4
------	----

1101	-3
------	----

1110	-2
------	----

1111	-1
------	----

0000	+0
------	----

0001	+1
------	----

0010	+2
------	----

0011	+3
------	----

0100	+4
------	----

...

3.3.3 Multiplikation und Division

Die Multiplikation und Division von Dualzahlen ist zum Beispiel beim verändern der Lautstärke eines Digitalsignals von Nöten. Soll das Signal um 6dB lauter werden, dies entspricht dem doppelten des ursprünglichen Wertes, so müssen die entsprechenden Dualzahlen ganz einfach mit 2 multipliziert werden. Hierbei würde es sich um einen einfachen Bitshift nach links handeln während das LSB mit 0 aufgefüllt wird. Soll das Signal aber beispielsweise 1dB lauter oder leiser werden ergibt sich ein Multiplikator bzw. Dividend von 1,22018454.²²

Da solche Rechenoperationen sehr schnell sehr viele Bits benötigen können ist es relevant mit welcher Genauigkeit eine DAW intern rechnet. Der Faktor mit dem Das Signal verrechnet wird sollte mindestens die selbe Genauigkeit wie die Wortbreite des Audiosignals haben, andernfalls könnten bei den Berechnungen des Pegels Fehler im Bereich der hinteren Nachkommastellen auftreten.

Beispiele:

$$\begin{array}{r}
 1011100 \text{ (92}_d\text{)} * 1000110 \text{ (70}_d\text{)} \\
 1011100 \\
 + 0000000 \quad \text{(kann entfallen da 0)} \\
 + 1011100 \\
 + 1011100 \\
 + 0000000 \\
 = 1100100101000 \quad \text{(6440}_d\text{)}
 \end{array}$$

Aus zwei 7Bit Wörtern ist nun ein 13Bit Wort entstanden

Die Division verhält sich ähnlich der des Dezimalsystems. Anstatt einer Subtraktion wird jedoch das 2er-Komplement addiert. Divisionsreste werden einfach weg gelassen.

²² Vgl. Katz 2010, S. 68.

$$101001 : 11 = 01101$$

101

+101 Addition mit 2er Komplement

10100 erste 1 entfällt da Übertrag

+ 101

10010 erste 1 entfällt da Übertrag

101

+101

010 Divisionsrest entfällt

4 Tests

Um schließlich heraus zu finden ob sich die Engines der Audio Workstations unterscheiden wurden Hörtests sowie Tests mit gedrehter Phase der Signale durchgeführt. Als weitere Instrumente zur Bewertung der Signale bzw. der Unterschiede wurden Spektrogramme, Codemeter sowie Level Meter des renommierten Herstellers Metric Halo eingesetzt. Das verwendete Spectrafoo ist eine sehr modulare und höchst genaue Messsoftware.

4.1 Messinstrumente: FFT/Spektograph/Spektogramm

Eine Möglichkeit ein Audiosignal auf dessen Eigenschaften zu untersuchen ist die spektrale Darstellung. Das Signal muss in eine mathematische Funktion umgewandelt werden. Dies geschieht normalerweise mittels diskreter Fouriertransformation wodurch als Ergebnis ein Cosinus bzw. Sinusspektrum entsteht. Da die diskrete Fouriertransformation jedoch sehr rechenaufwändig ist wird fast ausschließlich die Fast Fouriertransformation (FFT) angewandt. Durch diese Berechnung ist es möglich die Darstellung von der Zeitebene in die Frequenzebene zu überführen. Als Ergebnis kann man also die Amplitude über den im Signal vorkommenden Frequenzen beobachten. Aufgrund der heutigen Rechnertechnik geschieht dies in Echtzeit. Eine Mittelung der Magnitude über den gesamten Zeitverlauf eines Audiosignals könnte zum Beispiel Aufschluss über die Frequenzverteilung eines Musikstückes geben. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Unterschiede welche beim Vergleich zwischen den gleichen Musikstücken, gebounct in unterschiedlichen DAW's, zu marginal sind um sie mit dieser Technik festzustellen. Trotzdem werden Auszüge zu den Spektren im Anhang angefügt und als zusätzliches Kontrollwerkzeug neben dem Gehör verwendet werden.

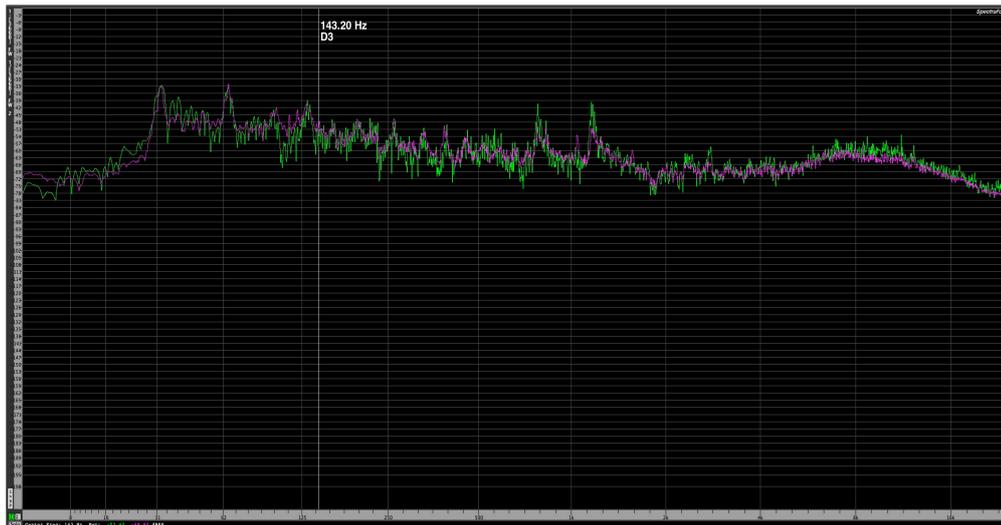


Abbildung 11: Spektograph: Spektrale Darstellung des Audiosignals

Das Spektrogramm ist dem Spektograph sehr ähnlich jedoch kann mit diesem Messgerät die der Verlauf des Signals in Amplitude sowie Frequenzgang in Bezug auf die Zeit beobachtet werden. Es funktioniert dem Spektograph gegenüber sozusagen 3 dimensional. Die Färbung gibt die Amplitude an (quasi Z-Achse), Die X-Achse die Zeit und die Y-Achse die Frequenz.

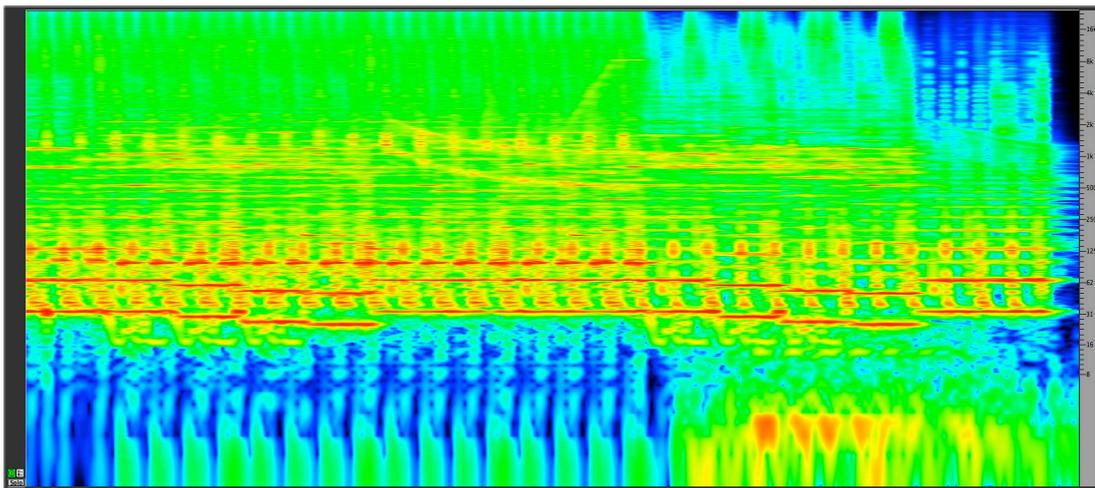


Abbildung 12: Spektrogramm

4.1.1 Code Meter

Das Code Meter ist ein Sample Code Metering Tool von Metric Halo welches einem die aller kleinsten Details des digitalen Signalstreams offenbaren kann. Aber auch andere Eigenschaften können damit getestet bzw. analysiert werden sowie zum Beispiel der DC-Offset, die Wortbreite des Signals oder andere niederpegelige Strukturen wie der Ditheringalgorithmus.



Abbildung 13: MH Code Meter bei laufendem 24 Bit Ditherrauschen

In der Abbildung kann man erkennen, dass die untere Led-Kette die Wortbreite des Signals anzeigt. Im Beispiel wurde ausschließlich ein 24Bit Dithering verwendet. Außerdem kann die Aktivität der Bits überprüft werden. Die obere Led-Kette zeigt angefangen vom MSB (unter Nr.1) bis hin zum LSB(Nr.24) an, welches Bit im Moment aktiv ist

4.1.2 Level Meter

Das Level Meter ist eine Spitzenwertanzeige welche sehr schnell auf das Signal reagieren können muss. Die Norm der Hinlaufzeit im digitalen Bereich beträgt 1 Sample. Die Rücklaufzeit beträgt 1,5Sekunden für 20dB. Es eignet sich somit also perfekt um den aktuellen Amplitudenwert des Signals abzulesen.

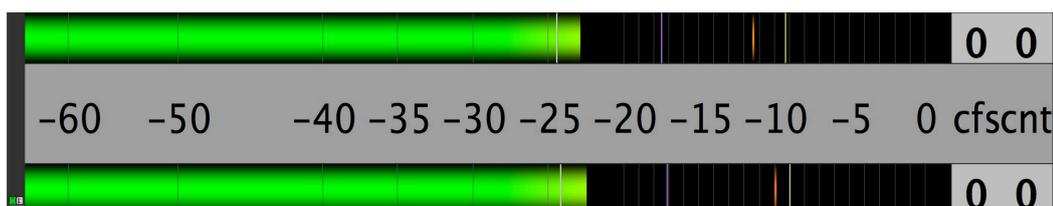


Abbildung 14: Level Meter

4.2 Testvorbereitung

4.2.1 Fader Werte

Um heraus zu finden ob die Angaben der Faderwerte auch wirklich übereinstimmen wurde ein kleines Testsetup erstellt. Ein Signalgenerator, erzeugt durch die Soundkarte um Abweichungen durch Plugins zu vermeiden, welcher einen Sinus mit 0dB bei 1kHz ausgab, wurde in jede DAW eingeschliffen, im jeweiligen Kanal um 6dB abgesenkt und wieder zurück geroutet. Das zurück gekommene Signal wurde in die Analysesoftware eingeschliffen und gemessen. Dabei ergaben sich für Reaper und Pro Tools jeweils ein Spitzenpegelwert von genau -6,00dB (manchmal leichte Schwankungen um 0,01dB, dem OSC zuzu-

schreiben). Logic hingegen gab einen Pegel von -5,92dB aus, unabhängig ob der Kanal-, Output-, oder Masterfader abgesenkt wurde. Das Senden der Signale über einen Bus und andere Möglichkeiten zur Gruppierung usw. hatte in keiner DAW Auswirkungen auf den Pegel gegenüber der Einzelspur. Der Pegelunterschied muss im Test berücksichtigt werden, kann jedoch aufgrund der Rasterung in Logic welche nur in 0,1dB Schritten vorgenommen werden kann, leider nicht ausgeglichen werden. Alle anderen getesteten Einstellungen zum Beispiel -1, -3, -12dBFS gaben jedoch korrekte Pegelwerte zurück.

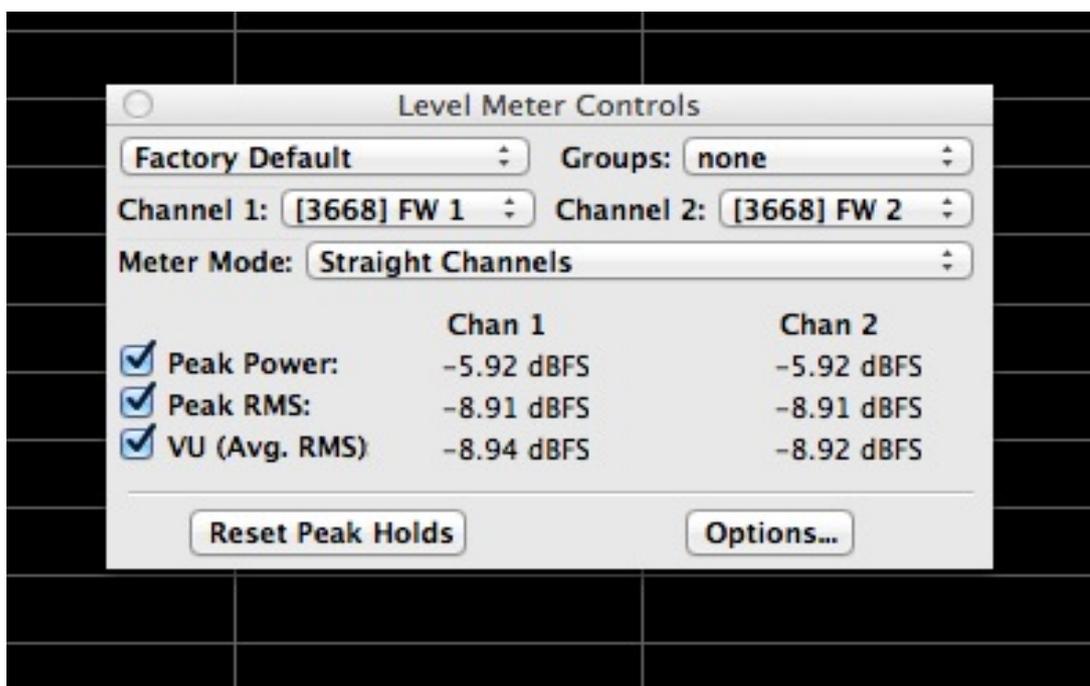


Abbildung 15: Test der Genauigkeit der Faderwerte

4.2.2 Pan Law

Worauf beim Vergleich der DAW's definitiv Acht gegeben werden muss ist das Pan-Law. In analogen Mischpulten wurde das Panning erreicht indem man die Kanäle einfach linear entweder lauter oder leiser hat werden lassen. Eine Positionierung des Signals auf der linken Seite bedeutete also ein Abschwächen des rechten und Anheben des linken Kanals. Das Signal wurde in der Mittenposition um 3dB abgesenkt und zu den Seiten hin logarithmisch angehoben damit kein Lautstärkenunterschied zwischen mittigem und gepantem Signal entsteht. Natürlich sind hier mittlerweile sehr viel verschiedene Möglichkeiten aufgrund der flexiblen Digitaltechnik in DAW's vorhanden. Es ist beim Austausch eines Projekts zwischen verschiedenen DAW's oder eben beim Vergleich darauf zu achten, identische Pan Modi zu benutzen da es sonst schnell zu unterschiedlichen Pegeln der einzelnen Spuren kommen kann. Alle drei DAW's werden für

die Projekte welche aus Monospuren bestehen (2 und 3) auf -3dB mit Gain-Kompensation (keine Absenkung des mittig gepantten Signals sondern eine Anhebung zu den Seiten hin / Die Lautstärke bleibt stets gleich) eingestellt, was der Pro Tools Einstellung entspricht (Kompensation konnte hier nicht ein-/abgestellt werden). Bei Stereospuren verhält sich ProTools jedoch anders, weshalb für Projekt 1 die Gain Kompensation bei Reaper und Logic abgestellt wird.

Da die Pan Potis der unterschiedlichen DAW's jedoch nicht gleich gerastert sind, wurden 4 mögliche Panwerte ausgesucht welche für die Mixes verwendet werden. Die Werte -1dBFS , -3dBFS und -6dBFS für den abgesenkten Kanal wurden wieder per Signalgenerator (Sinus bei 1kHz) und Messsoftware gemessen. Außerdem wurden Overheads sowie A/B Mikrofonspuren mit 100% Links- bzw. Rechtsanschlag eingestellt. Abweichungen der Werte aufgrund der Rasterung der Panpotis liegen im Bereich der zweiten Nachkommastelle. Hier könnten marginale unterschiede entstehen, jedoch ist dies nicht anders zu realisieren.

4.2.3 Offline- vs. Realtime- Bounce

Um heraus zu finden ob sich Unterschiede beim Bounce ergeben wenn dieser in Echtzeit oder Offline vorgenommen wird, wurden verschiedene Bounces erstellt und verglichen. Es hat sich gezeigt das egal ob Offline oder in Echtzeit gebounced wurde keinerlei unterschiede bestehen. Die Signale sind absolut identisch und löschen sich bis auf das letzte Bit aus. Im weiteren Verlauf der praktischen Arbeit wurden die Mixdowns stets im Offline Modus erstellt.

4.2.4 Vorbereitung der Testprojekte

Von jedem Musikstück wurden drei Versionen als Stereomix angefertigt. Die erste Version ist stets ein unveränderter Mix, d.h. das Audiomaterial wurde in die jeweilige DAW geladen, die Fader sowie Panpotis stehen stets auf null. Um Übersteuerungen zu vermeiden wurde der Masterfader um 6dB oder 12dB abgesenkt. Die Dateien haben die Namen A1 – A3.

Die zweite Version ist stets eine Version bei der ausschließlich die Fader zum mixen verwendet wurden. Somit soll beurteilt werden wie genau bzw. ähnlich die DAW's Multiplikationen der Signale mit dem sich ergebenden Faktor (aus der eingestellten Absenkung des Signalpegels) vornehmen. Es wurde penibel darauf geachtet das die Faderwerte genauestens reproduziert wurden. Die Dateien dieser Stücke sind mit B1 – B3 benannt.

Version drei der Musikstücke sind Roughmix ähnliche Versionen. Hier wurden Fader sowie Panpotis zum mixen verwendet. Diese Versionen tragen die Namen C1 – C3.

4.2.5 Belastungstest

Um zu prüfen wie sich die Engine´s verhalten wenn der Prozessor mehr und mehr ausgelastet wird wurde Projekt 1 in einem weiteren Versuch verändert. Die 62 Spuren wurden 3 mal dupliziert so, dass nun 186 Spuren Vorlagen. Hier lag in etwa die Grenze der Belastung des Testsystems. Alle Spuren wurden um 30 dB reduziert damit keine Übersteuerungen auftreten. Neben der gesteigerten Belastung des Prozessors müssten sich nun Summierungsfehler, wenn vorhanden, maximieren. Leider konnte hierbei nur Logic und Reaper getestet werden, da Pro Tools nicht die Möglichkeit bietet ein Projekt mit solch hoher Spurenzahl zu erstellen bzw. zu verwalten.

4.3 Hörversuche

Die Musikstücke wurden mehreren Probanden bereitgestellt, welche auf den Ihnen bekannten Produktionssystemen verglichen wurden. Die Dateien wurden mit A1/A2/A3, B1/B2/B3 sowie C1,C2,C3 benannt um Vorurteile zu vermeiden. Dabei war A stets Logic, B ProTools und C Reaper. Alle Bounces wurden ohne Dithering in 24Bit Wortbreite und mit einer Samplerate von 48kHz erstellt. Die Probanden sind alle im Tontechnischen Bereich tätig und geübte Hörer. Um eine bessere Einschätzung von dem Gehörten zu bekommen, erhielten die Probanden ebenso einen kurzen Fragebogen. Die Probanden wurden gebeten keine spektrale Analyse oder ähnliches durchzuführen sondern nur auf ihr Gehör zu vertrauen.

4.3.1 Musikstücke

Die Musikauswahl fiel auf drei sehr unterschiedliche Musikstücke. Stück eins ist ein elektronisches Werk. Generiert ausschließlich in der Maschine 2 Software von Native Instruments. Es beinhaltet 62 Spuren. Alle Sounds entspringen Maschine interner Instrumente bzw. sind Samples der internen Bibliothek. Die Dateien liegen im 32Bit float Format vor.

Stück zwei ist eine Aufnahme des Songs „Contraband“ der Band „Big Mean Sound Machine“, welche auf der Homepage der Firma Telefunken als Multitrack zum freien Download bereit steht. Hier beherrschen Blechbläser sowie Percussions den Sound. Auch Raumpuren sind vorhanden. Insgesamt sind 22 Spuren belegt.

Stück drei ist eine Klassische Aufnahme des EGO Kammerorchesters aus der Studioproduktion Ton WS13/14. Es handelt sich um ein Stück für Streicher welches im Konzertsaal der Staatlichen Hochschule für Musik und darstellende Kunst Stuttgart aufgenommen wurde. Neben der üblichen A/B Mikrofonierung sind verschiedene Stützmikrofone zum Einsatz gekommen und wurden zur Mischung verwendet.

4.3.2 Die Testkandidaten

Getestet wurden 3 unterschiedliche DAW's, unterschiedlicher Preiskategorien. Reaper 4 von Cockos liegt preislich bei 60US Dollar und ist somit der günstigste Testkandidat. Zum Zeitpunkt der Tests liegt es in Version 4.731 vor. Die interne Verarbeitung erfolgt mit 64Bit float. Es ist mit Abstand die Flexibelste Software im Test und wird aufgrund dieser vielen Einstellungsmöglichkeiten und dem Fakt, dass der Author diese DAW am besten kennt, als Referenz dienen.

Der zweite Testkandidat im Feld ist Apple Logic. Eine Software die bevorzugt von Musikern zum produzieren von Elektro und HipHop Beats verwendet wird. Mit rund 180€ liegt es preislich im Mittelfeld. Die Vorhandene Testversion ist 10.0.5 .

Die kostenintensivste DAW in der Testreihe ist Pro Tools, welches bei 699€ liegt. Es liegt zum Testzeitpunkt in Version 11.2.1 vor. Pro Tools wird allgemein als Industriestandard betitelt und oft wegen seiner hervorragenden Audioengine gelobt. Auch Logic und Pro Tools arbeiten intern mit einer 64Bit Technologie.

4.3.3 Testsystem

Getestet wird auf einem Macbook late 2011 mit Mac OSX 10.8.5, 8 Gigabyte Arbeitsspeicher und Intel Core I7 Prozessor. Als Wandler kommt ein Metric Halo ULN2 Interface zum Einsatz. Als Abhörmonitore dienen Neumann KH 120A in Verbindung mit einem Klein und Hummel O800 Subwoofer.

4.3.4 Eigene Höreindrücke

Bei den ersten Hörversuchen mit den Dateien welche keine Fader sowie Pan-Poti Änderungen beinhalten, hat sich ergeben, dass keinerlei Unterschiede im Sound ausgemacht werden konnten. Beim Vergleichshören in Reaper mit den verschiedenen Bounces wurden die Mixes so platziert, dass sie absolut Synchron laufen. Beim Auswerten der Stücke mittels Messsoftware konnten auch keinerlei Unterschiede im Frequenzgang oder Ähnlichem ausgemacht werden. Nach Phasendrehung des Pro Tools Bounce wurde das resultierende Signal mit dem Spektograf auf Unterschiede untersucht. Dabei ergaben sich vereinzelt

Spitzenwerte von circa -170dBFS. Im Durchschnitt ergaben die Auslöschungen eine Signalstärke von ungefähr -185dBFS (ca.-195dBFS bei 1kHz). Dies ist weit außerhalb der Grenzen der Dynamik normaler Medien, wie sie vom Endbenutzer verwendet werden. Auch hat kein Derzeit bekannter AD/DA Wandler einen solch hohen Dynamikumfang.

Auch wurde anschließend das Komplette Material nochmals mit Hochwertigen Kopfhörern durchgehört um evtl. klangliche Unterschiede in den Feinheiten wie Hallfahnen etc. zu finden, jedoch konnten auch so keine Unterschiede gehört werden.

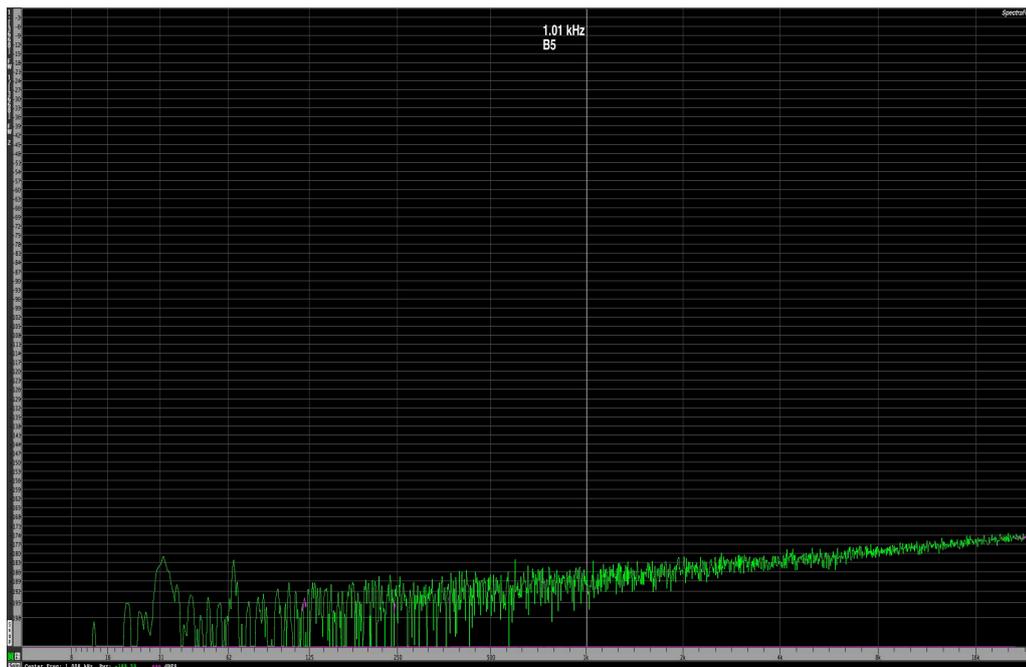


Abbildung 16: Restsignal nach Phasendrehung

Die Anzeige des Code Meter zeigte Aktivität im 24. Bit. Dies würde bedeuten, dass Die Unterschiede bei der einfachen Summierung zwischen Reaper und Pro Tools in einer Größenordnung der eines Quantisierungsfehlers liegen. In der normalen Produktionsumgebung beziehungsweise beim Abhören im Studio oder Zuhause ist dieser Unterschied absolut zu vernachlässigen und ist nicht hörbar.



Abbildung 17: Messung des Restsignals mit Code Meter

Der Vergleich der Reaper sowie Pro Tools Dateien mit der Datei welche in Logic Produziert wurde hat ähnliches ergeben. Im nicht hörbaren Bereich bei ungefähr 3Hz ergab sich ein Pegel von -130dB. Im Bereich des vom Menschen Hörbaren lag die durchschnittliche Signalstärke hier bei rund -175dBFS. Aufgrund dieser sehr geringen Werte des Fehlersignals ist davon auszugehen, dass die Summierung von allen Engine's absolut sauber vorgenommen wird.

Auch bei Version zwei der Stücke konnten im Hörtest keine Unterschiede ausgemacht werden. Das Fehlersignal liegt zwar hier im Durchschnitt höher als in Version eins, dies verwundert jedoch nicht beachtet man die Eingangs erwähnten Unterschiede beim einstellen der Faderwerte. Im Durchschnitt ergab sich in lauten Passagen eine Signalstärke von circa -140dBFS. Dieser Fehlerwert liegt immer noch an der Grenze der Gesamtdynamik eines 24Bit Systems und ist somit ebenso wie in Version eins nicht hörbar.

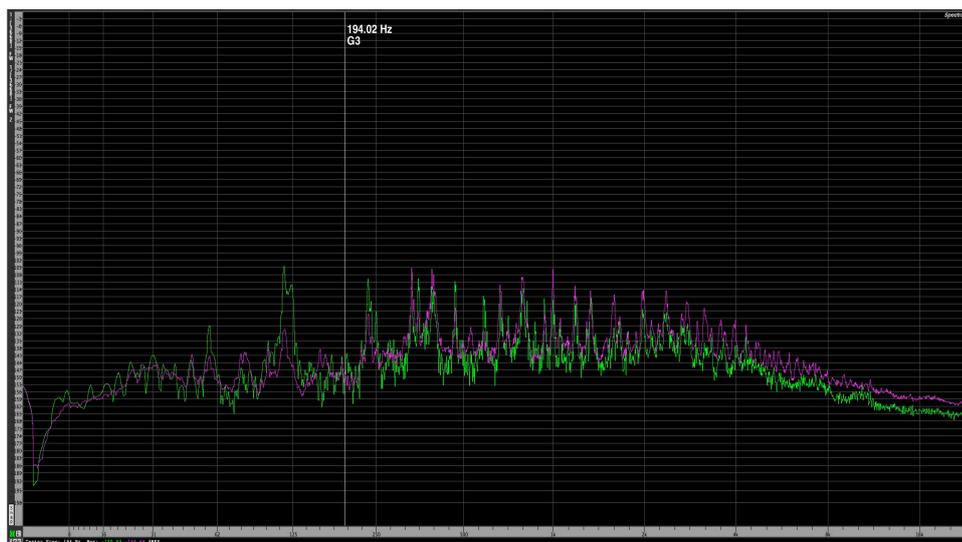


Abbildung 18: durchschnittliches Fehlersignal Version zwei

Selbst in der dritten Version kam es zum Beispiel bei Musikstück eins zu einer Fehlersignalstärke von -160 dBFS. Die Anzeige des Code Meter zeigte Aktivitäten im 23.Bit, was bedeutet das der resultierende Fehler hier wieder in der Größenordnung eines Ditherrauschens bzw. etwas darüber liegt. Im Hörtest

konnten vom Author keine Unterschiede festgestellt werden. Selbst kleinste Feinheiten wurden bis ins Detail absolut gleich abgebildet. Bei Musikstück zwei und drei lag das durchschnittliche Fehlersignal etwas höher jedoch stiegen die Werte auch hier nicht über -140dBFS. Der im Schnitt etwas angehobene Wert des Fehlers kommt hier aufgrund der unterschiedlichen Pan Modi zustande. In diesen Projekten sind Spuren welche komplett links bzw. rechts gepant sind enthalten zum Beispiel Overheads und A/B Spuren. Wie ein Hersteller sein Pan-Law der DAW einstellt ist nicht genormt und somit stets unterschiedlich. Natürlich entsteht somit ein etwas stärkeres Differenzsignal.

Beim Belastungstest wurde das Testsystem an seine Grenzen gebracht und dann ein Mixdown erstellt. Da die Spuren dupliziert wurden mussten sie stark im Pegel reduziert werden. Beim durchhören der Dateien wurde trotz dessen durch drehen der Phase und anheben der Lautstärke eine sehr große Auslöschung von circa 60dB beim Vergleich mit einem der „normalen“ Mixdowns erreicht werden. Im Vergleich der beiden Belastungsdateien untereinander kam es zu ähnlichen Werten wie bisher. Pegelspitzen fanden sich bei circa -110dBFS. Ein erstaunlicher Wert wenn man bedenkt das hier 186 Spuren gemischt wurden und somit der Summierungsfehler stark verstärkt sein muss. Klanglich konnten auch hier keine Unterschiede ausgemacht werden. Die Engines der Workstations arbeiten wirklich sehr sauber und gleich.

5 Interviews

Um weitere Meinungen zu sammeln, wurden die Files an verschiedene Testpersonen geschickt. Alle der Testpersonen wurden ausdrücklich gebeten nur einen Hörtest zu machen und keine weiteren Hilfsmittel wie zum Beispiel Messsoftware zu verwenden. Hier die Antworten der Testpersonen zu den Fragen bezüglich ihrer Hörvergleiche.

5.1 Testperson 1

1. Welche DAW besitzt/benutzt du selbst?

Nuendo 6, Cubase LE, Pro Tools 10, Pro Tools 11

Benutzt wird überwiegend Nuendo.

2. Aus welchem Grund benutzt du diese? Hat das klangliche Gründe?

Nuendo 6 wegen des Funktionsumfangs und aus Bedienungsgründen benutzt. Pro Tools nur vorhanden um Kompatibilität zu gewährleisten.

3. Wie ist deine eigene Meinung zu Frage des Klang's einer Engine?

Unterschiede sind nicht hörbar. Evtl. messbar.

4. Ist dir beim Hörversuch etwas aufgefallen (klanglich / Unterschiede etc.)? Wenn ja wo liegen die Unterschiede?

Bei keinem der Vergleiche konnte ein Klangunterschied festgestellt werden.

Danke

5.2 Testperson 2

1. Welche DAW besitzt/benutzt du selbst?

Ich nutze hauptsächlich Pro Tools 10, manchmal Logic 9

2. Aus welchem Grund benutzt du diese? Hat das klangliche Gründe?

Es ist der Industrie-Standard. Ob es klangliche Gründe hat, weiß ich nicht. Das habe ich noch nicht verglichen.

3. Wie ist deine eigene Meinung zu Frage des Klang´s einer Engine?

Ich denke, es gibt bestimmt Unterschiede, wenn auch keine großen und alle gängigen DAWs sind auf einem sehr hohen Level. Wir reden hier von den letzten 2% und es gibt vorher noch viele viel intensiver klangformende Dinge, die zum Gelingen eines Mixes beitragen, als die DAW.

4. Ist dir beim Hörversuch etwas aufgefallen (klanglich / Unterschiede etc.)? Wenn ja wo liegen die Unterschiede?

Wenn die Buchstaben immer für eine DAW stehen, dann fliegt für mich die B raus. Klingt mir irgendwie zu flach/dünn, zu wenig 3D. Bei A und C ist die Unterscheidung schwieriger, aber hatte bei dem Frontliner Belastungsvergleich zwischen A und C das Gefühl, A hat minimal mehr Bass, deswegen würde ich zu A tendieren.

Danke

5.3 Testperson 3**1. Welche DAW besitzt/benutzt du selbst?**

Logic 8 Pro

2. Aus welchem Grund benutzt du diese? Hat das klangliche Gründe?

Nein, die Gründe liegen beim Workflow und der Ausstattung.

3. Wie ist deine eigene Meinung zu Frage des Klang´s einer Engine?

Ich habe mir nie wirklich Gedanken gemacht ob die Engines unterschiedlich klingen können.

4. Ist dir beim Hörversuch etwas aufgefallen (klanglich / Unterschiede etc.)? Wenn ja wo liegen die Unterschiede?

Beim Hören sind mir keine Qualitativen unterscheide aufgefallen. Für mich klingen alle gleich.

Danke

6 Fazit

Die in den technischen Grundlagen beschriebenen Vorgänge welche innerhalb der DAW von der Engine, dem Herzstück der DAW, übernommen werden sind rein arithmetisch. Zu meist simple Additionsverfahren, Schiebeoperationen oder Ähnliches sind der Hauptbestandteil ihrer Arbeit. Die Berechnung von Faktoren zur Weiterverarbeitung des Signals ist wohl einer der kompliziertesten Vorgänge hierbei. Auftretende Rundungsfehler sowie Fehler welche auf Grund von Beschneidungen der Werte entstehen sind verschwindend gering und somit absolut zu vernachlässigen. Durch die fortschreitende Computertechnologie sind heutzutage Wortbreiten innerhalb der DAW so ausreichend, dass Werte nicht relevanten Bereichen beschnitten werden. Bei den getesteten DAW's war eine interne Verarbeitung der Signale bei 64Bit gegeben. Selbst bei sehr Großen Projekten sollten hier keine Summierungsfehler entstehen. Es ist davon auszugehen, dass mit fortschreiten der Softwareeffizienz in Zukunft größere Werte der Bittiefe zur internen Verarbeitung zur Verfügung stehen werden. Derzeit dürften hier jedoch eher der Prozessor und die Festplatten an ihre Belastungsgrenzen geraten.

Auch in den Hörtests konnten keine Unterschiede festgestellt werden. Ob Real-time- oder Offlinebounce, alle Systeme verhielten sich absolut identisch. Die Messergebnisse belegen dies zusätzlich. Die Signalstärke der resultierenden Fehler ist so gering ausgefallen das diese nicht zu erwähnen sind. Kein Medium und oder Wandler welche derzeit auf dem Markt erhältlich sind, sind im Stande eine derart hohe Dynamik zu liefern um diese Fehler abzubilden. Selbst das menschliche Gehör vermag dies nicht. Der Rauschanteil welcher durch Psychoakustische Effekte wie das Noiseshaping bzw. Dithering zum Signal hinzugefügt wird, liegt oberhalb des Fehlersignals aus den Unterschieden der Engine's. Eine professionelle Software zur Be- und Verarbeitung von Audiosignalen sollte wie Eingangs schon erwähnt jedoch genau dies bieten. Ein eigener Klangcharakter wäre hier einfach nicht angebracht und würde die Software im Anwenderkreis sehr einschränken. Der Klang eines Musikstücks sollte stets vom Toningenieur durch Mikrofone, Vorverstärker, Kompressoren, Equalizer, Hall und ähnlichen Effekten gestaltet werden.

Es bleibt also festzuhalten, dass sich Tonschaffende in der heutigen Zeit keine Gedanken über die Qualität der verwendeten Audiosoftware mehr machen sollten.

Gibt man einer Engine ein Digitales Signal welches eben aus Nullen und Einsen besteht zur Bearbeitung verrechnet diese die Werte. Nimmt man die selben Bearbeitungsschritte mit identischem Material in einer weiteren DAW vor, müssen zwangsläufig die selben Werte entstehen und somit ein absolut identisches Signal. Geschieht dies nicht, würde dies bedeuten, dass die Engine die Daten evtl. beschädigt oder in irgend einer Weise verändert hat, was der Grunddefinition von Verzerrung entspricht. Dies war bei den Testkandidaten jedoch keinesfalls gegeben.

Die zur Untersuchung heran gezogenen DAW's verhielten sich klanglich absolut vorbildlich, nämlich klanglos.

Selbst beim Belastungstest haben sich die Engine's keine Fehler erlaubt. Das Testsystem wurde bis an seine Belastungsgrenze getrieben, jedoch haben sich die klanglichen Eigenschaften des Mixdowns nicht verändert.

Ein versierter Umgang mit der bevorzugten DAW beeinflusst das Ergebnis in einem weitaus höheren Maße als dies eine Engine je könnte. Die Kaufentscheidung sollte einzig und allein der gewünschten Optik und dem bevorzugtem Workflow entsprechen. Auch kann bei der Kaufentscheidung natürlich der Preis eine große Rolle spielen, jedoch ist er kein Qualitätskriterium für das klangliche Verhalten der Engine. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich eine der kostengünstigen DAW's gegenüber dem Industriestandard in keinsten Weise nachteilig Verhält.

Den zeitlichen Aufwand eine Debatte über den Klang einer Engine zu führen, kann man sich in der heutigen schnelllebigen Zeit getrost sparen. Diese Zeit ist besser in das Erschaffen neuer Stücke und Klangwelten investiert.

7 Anhang A



Abbildung 19: Editbereich Logic

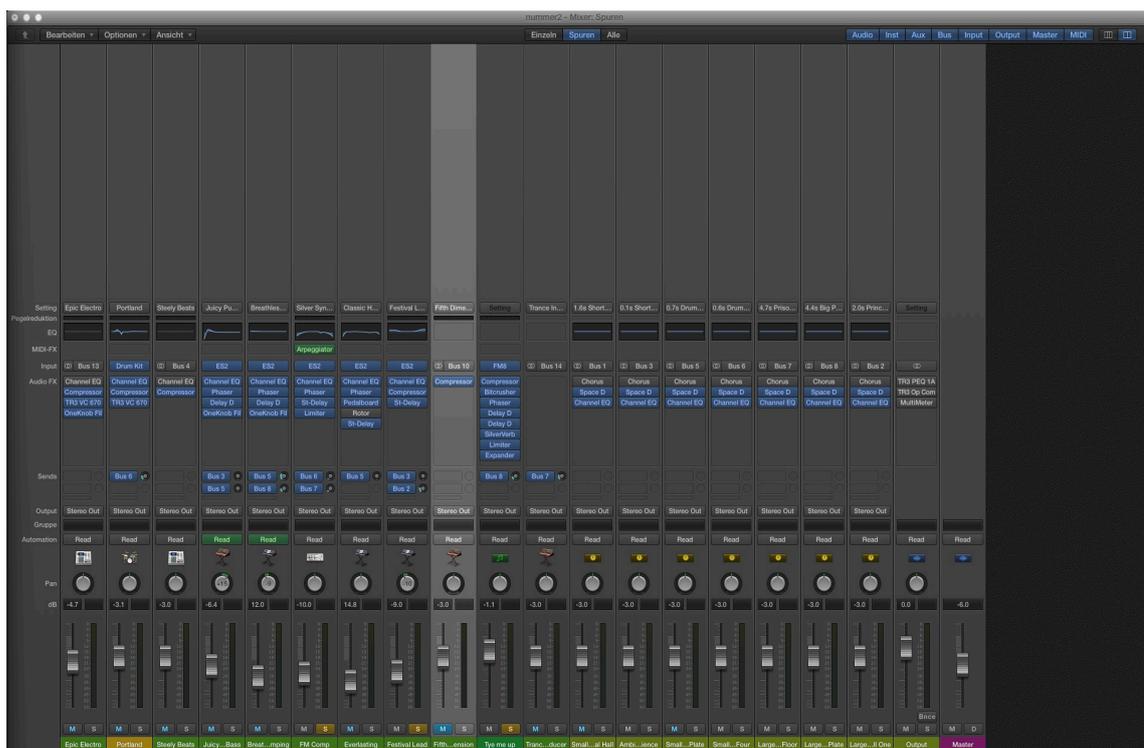


Abbildung 20: Mixbereich Logic

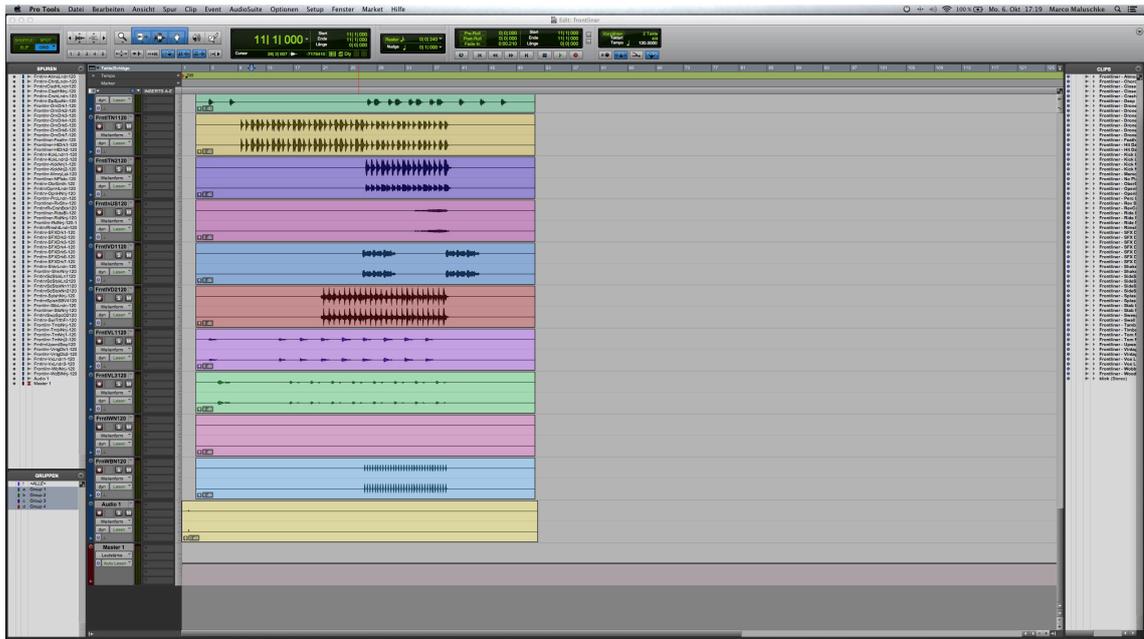


Abbildung 21: Editbereich ProTools



Abbildung 22: Mixbereich ProTools



Abbildung 23: Editbereich Reaper

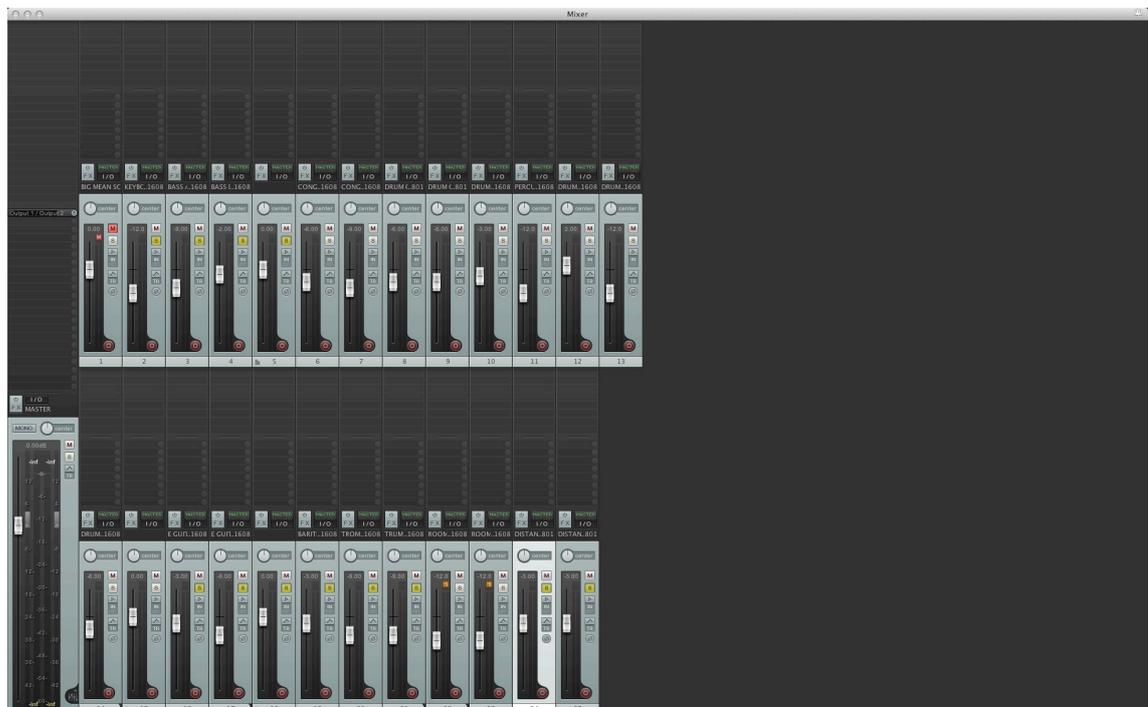


Abbildung 24: Mixbereich Reaper

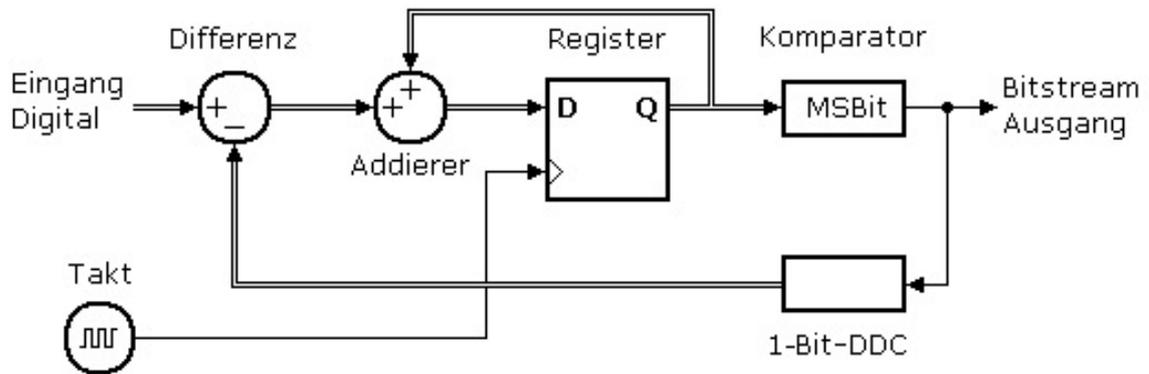


Abbildung 25: Blockschaltbild eines digitalen Delta Sigma Modulators erster Ordnung

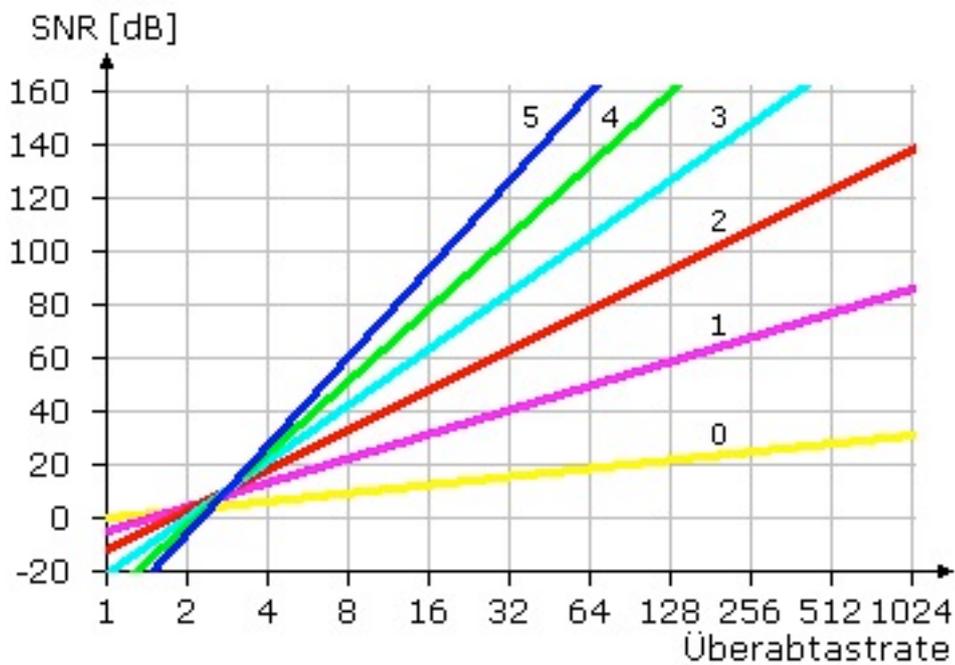


Abbildung 26: SNR gegen Überabtastung

NICHT

A	Y
1	0
0	1

UND

A	B	Y
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

NAND

A	B	Y
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	1

XNAND (Ungleichheit)

A	B	Y
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	0

Oder

A	B	Y
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

NOR

A	B	Y
1	1	0
1	0	0
0	1	0
0	0	1

XNOR (Gleichheit)

A	B	Y
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	1

Abbildung 27: Wahrheitstabellen boolesche Logik

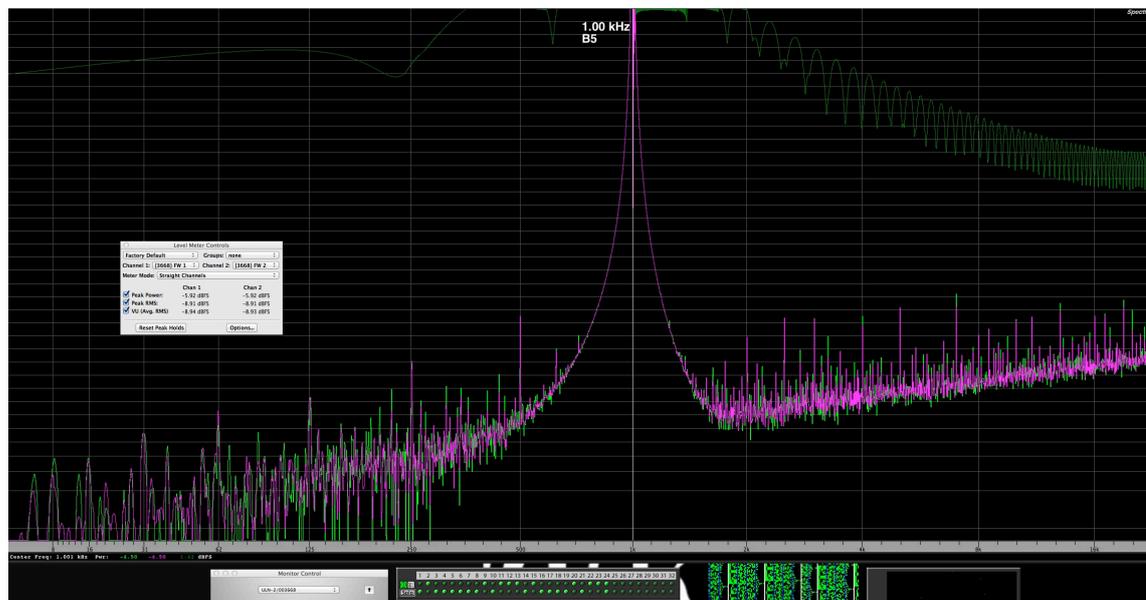


Abbildung 28: Messung mit 1kHz Sinus

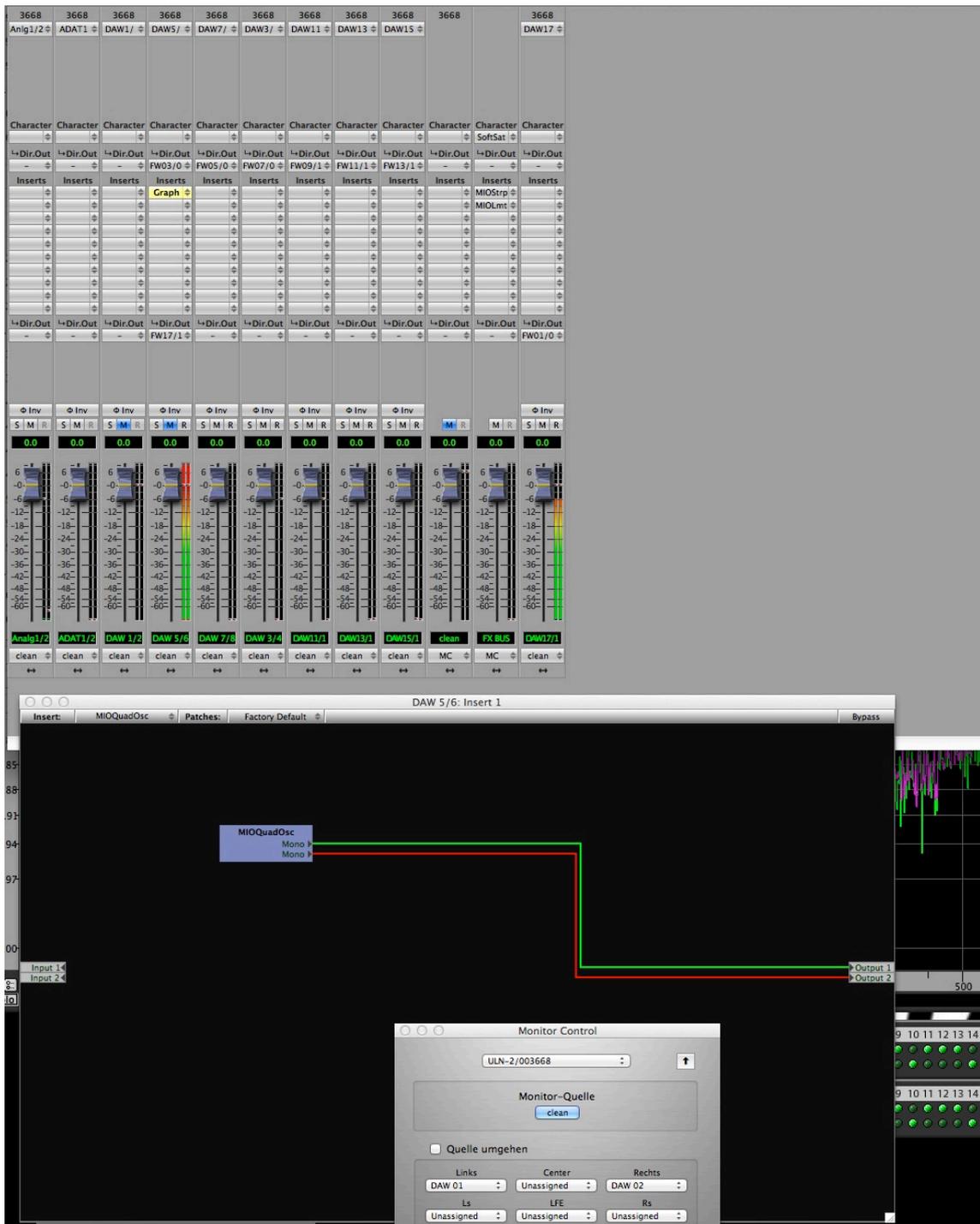


Abbildung 29: Mixerumgebung mit Signalgenerator

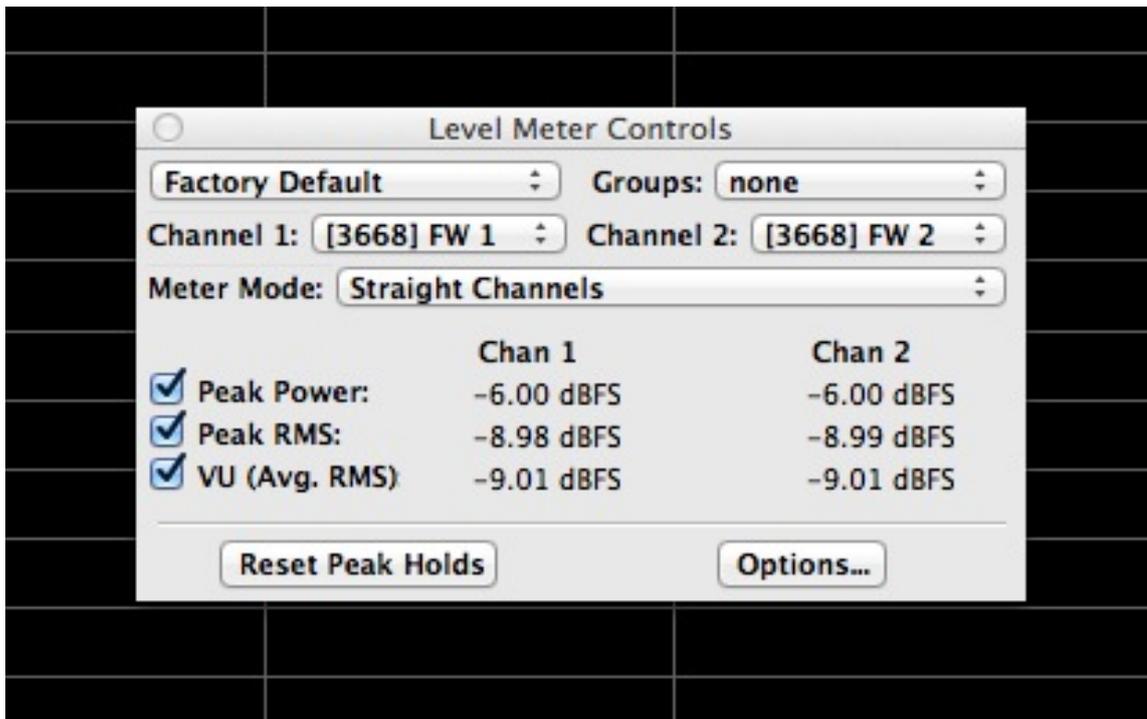


Abbildung 30: Rückgabe nach durchschleifen des Sinus

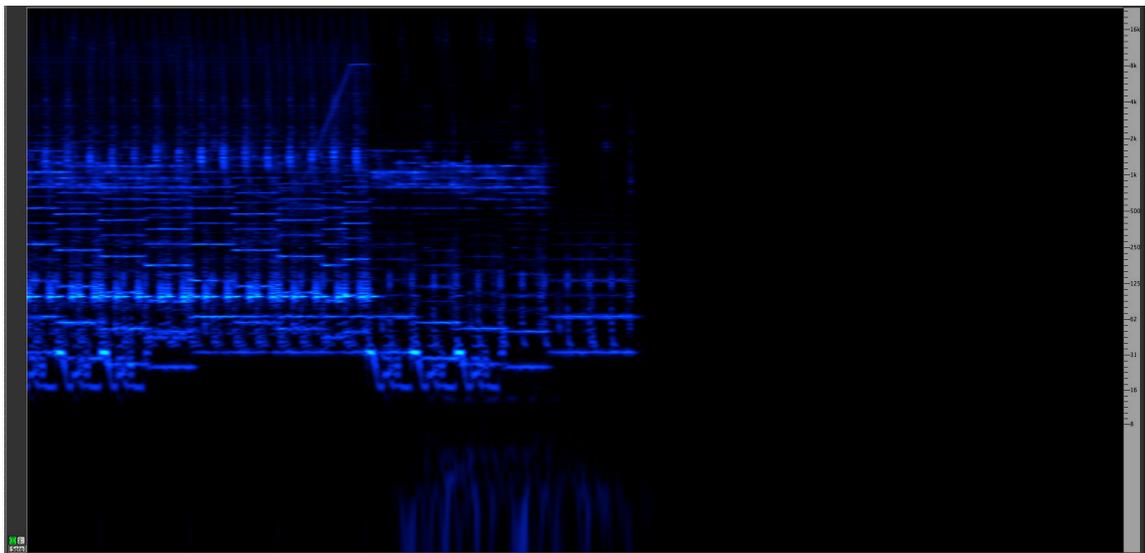


Abbildung 31: Beispiel Fehlersignal Frontliner 3 Reaper vs ProTools



Abbildung 32: Beispiel Bitaktivität Frontliner 3 Reaper vs ProTools

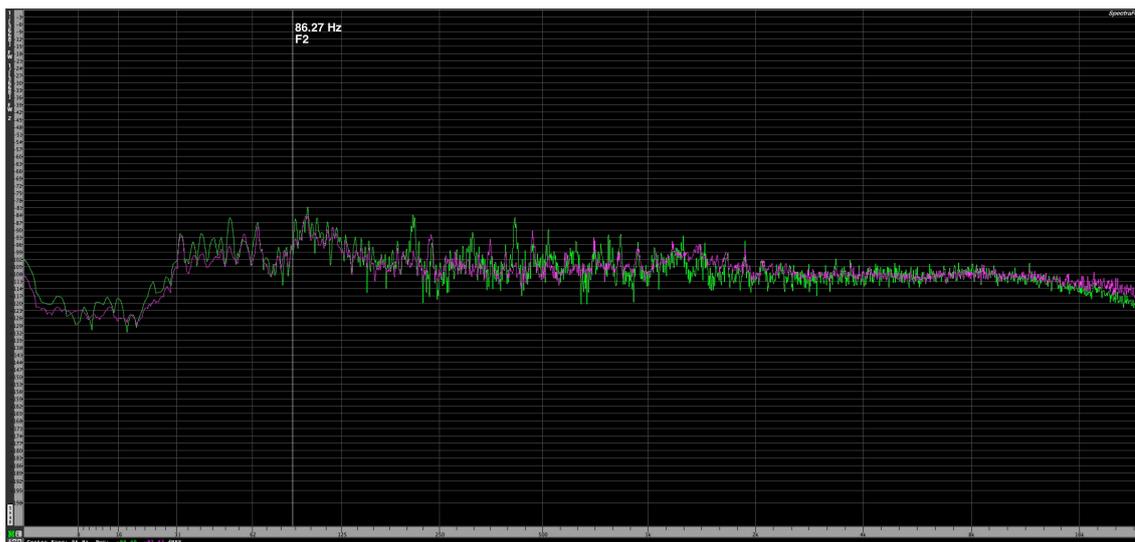


Abbildung 33: Beispiel Fehlersignal Frontliner 3 Reaper vs ProTools

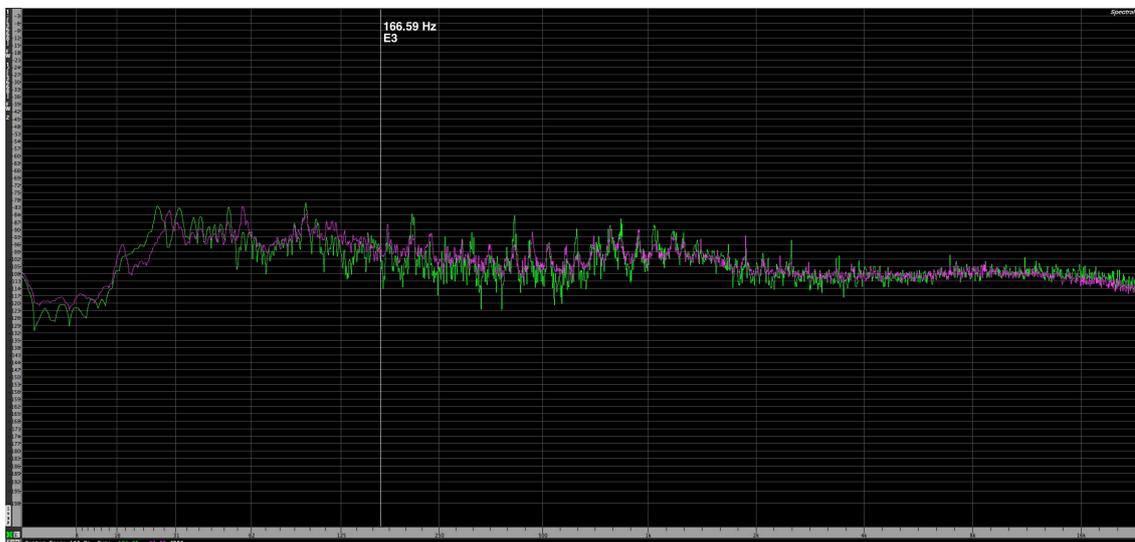


Abbildung 34: Beispiel Fehlersignal Frontliner 3 Reaper vs Logic

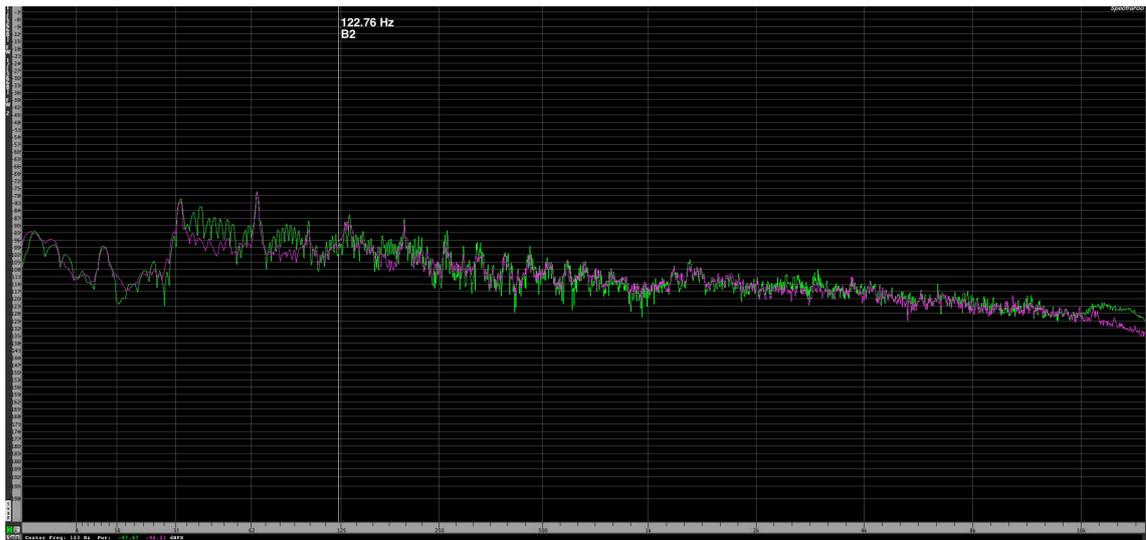


Abbildung 35: Beispiel Fehlersignal Frontliner 2 Reaper vs Logic



Abbildung 36: Beispiel Bitaktivität Frontliner 2 Reaper vs Logic



Version	Steinberg Cubase	Avid Pro Tools	Apple Logic Pro	PreSonus Studio One	Ableton Live	Cakewalk Sonar	Image-Line FL Studio	Propellerhead Reason	Cockos Reaper	Tracktion
	7	11	X	2	9	X3	11	7	4	14
Windows / Mac OS / Linux	• / • / -	• / • / -	- / • / -	• / • / -	• / • / -	• / - / -	• / Beta / -	• / • / -	• / • / -	• / • / •
Native für 64 Bit	•	•	•	•	•	•	Beta	•	•	•
Deutsche Version	•	-	•	•	•	•	-	•	-	•
Varianten	Cubase Elements Cubase Artist Cubase	Pro Tools Express Pro Tools (native)		Free Artist Producer Professional	Intro Standard Suite	Sonar Sonar Studio Sonar Producer	Fruity Edition Producer Edition Signature Bundle	Reason Essentials Reason		

BASICS

Max. physikalische I/O	24 32 256	44 320 32	unbegrenzt	unbegrenzt	44 256 256 256 256	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt
Audio Engine	32 Bit	32 Bit	32 Bit	32 32 32 64 Bit	32 Bit (64 Bit an einzelnen Mix-Punkten)	64 Bit	32 Bit	64 Bit	64 Bit	32 oder 64 Bit wählbar
Audio-Spuren	48 64 unbegrenzt	16 96 48 24 bei 48/96/192 kHz	255	unbegrenzt	16 unbegrenzt unbegrenzt	unbegrenzt	99	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt
MIDI-Spuren	64 128 unbegrenzt	512	255	unbegrenzt	16 unbegrenzt unbegrenzt	unbegrenzt	99	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt
Max. Bit-Tiefe	32 Bit	32 Bit	24 Bit	32 Bit	32 Bit	64 Bit	32 Bit	unbegrenzt	32 Bit	32 Bit
Max. Sample-Rate	192 kHz	96 192 kHz	192 kHz	192 kHz	192 kHz	384 kHz	48 kHz	unbegrenzt	192 kHz	192 kHz
Mixerkannäle	unbegrenzt	128	765	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt	103	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt
Busse	unbegrenzt	256	64	unbegrenzt	unbegrenzte Submix-Busse, 12 Returns	unbegrenzt	4 globale Send-Busse	unbegrenzt	unbegrenzt	8
Inserts pro Kanal	8	10	15 (bzw. 8 MIDI-Plugins)	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt	8	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt
Sends pro Kanal	8	10	8	unbegrenzt	2 12 12 pro Projekt	unbegrenzt	siehe Busse	4 8	unbegrenzt	unbegrenzt

DATEIFORMATE LESEN / SCHREIBEN

WAV	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
AIFF	•	•	•	•	•	•	• / -	•	•	•
FLAC	•	•	-	•	•	•	-	-	-	•
REX2	•	- / •	via REX Shared Library	• / -	- • •	•	• / -	•	• / -	• / -
MP3	via Addon via Addon •	•	•	Ab Producer	•	Via SoundCloud bzw. 30 Tage Demo	•	• / -	•	•
Ogg	•	-	-	•	-	-	•	-	•	•
AAC	-	-	•	-	• / -	-	-	-	-	• / -

PLUGIN-FORMATE

VST2.4 / VST3 / AU	• / • / -	-	- / - / •	Ab Producer • / • / •	• / • / •	• / • / -	• / • / -	-	• / - / •	• / - / •
Sonstige	-	AAX, TDM, RTAS, AudioSuite	-	-	-	-	DX, FL, Buzz	Rack Extensions	DX, JS	LAO SPA
ReWire	•	•	•	Ab Producer	•	•	•	•	•	•
Bit Bridge (32 ↔ 64 Bit)	•	-	-	-	-	•	•	-	•	-

LIEFERUMFANG

Instrumente	3 18	75 (inkl. Effekte)	18	11 4 8 4	3 4 10	12 19 23	15+	11	-	-
Effekte	44 47 66	•	67	9 26 26 31	19 31 34	27 51 57	40+	23	8 (plus editierbare Script-Effekte)	16
Samples	5,8 GB	8 GB	30 GB	- 2,5 16 19 GB	4 11 54 GB	- 1 2 GB	2 GB (+640 MB in Box-Versionen)	3 GB	-	-

ERWEITERTE FEATURES

Notensatzfunktionen	• (in Elements & Artist eingeschränkt)	•	•	-	-	•	-	-	-	-
Tonhöhenkorrektur à la Melodyne	•	-	•	- DEMO DEMO •	-	•	-	-	-	• (MA PLUGIN -REALTIME-)
Beat Slicing an Transienten	•	•	•	•	•	•	Ab Producer	•	•	-
Clip-Matrix	•	•	-	-	•	•	•	-	-	-

Literatur- und Quellenverzeichnis

Dittmar, Manfred (1990): Die Abtastung. SRT-Schriftenreihe Band 18. 2. Aufl. Nürnberg : Schule für Rundfunktechnik.

Dittmar, Manfred (1992): Prinzipien der Fehlererkennung und Fehlerkorrektur. SRT-Schriftenreihe Band 30. Nürnberg: Schule für Rundfunktechnik.

Dittmar, Manfred (1993): Überabtastung und das Prinzip der 1 Bit-Wandler. SRT-Schriftenreihe Band 25. Nürnberg: Schule für Rundfunktechnik.

Friesecke, Andreas (2007): Die Audio-Enzyklopädie. Ein Nachschlagewerk für Tontechniker. München : K.G. Sauer Verlag.

K. Urbanski, R. Weitowitz (2007): Digitaltechnik. 5.Aufl. Berlin: Springer-Verlag.

Katz, Bob; Carstensen, Cunther (Hrsg.) (2010): Mastering Audio. Über die Kunst und die Technik. München: Carstensen Verlag.

Raffaseder, Hannes (2010): Audiodesign. 2.Aufl. München: Carl Hanser Verlag.

Dickreiter, Michael (1997): Handbuch der Tonstudioteknik Band 1. 6.Aufl. München: K.G. Sauer Verlag.

Dickreiter, Michael (1997): Handbuch der Tonstudioteknik Band 2. 6.Aufl. München: K.G. Sauer Verlag.

Webers, Johannes (2003): Handbuch der Tonstudioteknik. 8.Aufl. Poing: Franzis´ Verlag.

Johnson, Keith (2003): Acoustics & Auditory Phonetics. 2.Aufl. Bodmin, Cornwall: MPG Books.

Papula, Lothar (2001): Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 1. 10.Aufl. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft.

Friesecke, Andreas (2003): Metering. Bergkirchen: PPVMEDIEN GmbH.

Henle, Hubert (2001): Das Tonstudio Handbuch. 5.Aufl. München: GC Carstensen Verlag.

Frohberg, Wolfgang; Kolloschie, Horst; Löffler, Helmut (2008): Taschenbuch der Nachrichtentechnik. München: Carl Hanser Verlag.

Warstat, Michael. Görne, Thomas (2002): Studiotechnik. 5.Aufl.

Aachen: Elektor Verlag GmbH.

Beuth, Klaus (2006): Digitaltechnik. 13.Aufl. Würzburg: Vogel Buchverlag.

Lipsmeier, Antonius (2007): Kommunikationstechnik. Troisdorf: Bildungsv-
erlag EINS.

Freyer, Ulrich (2009): Nachrichten-Übertragungstechnik. 6.Aufl.

München : Carl Hanser Verlag.

Werner, Martin (1998): Nachrichtentechnik.

Braunschweig/Wiesbaden : Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft

Weinzierl, Stefan (Hrsg.) (2008): Handbuch der Audiotechnik. Berlin: Springer.

Vintage Synth Explorer (2014): Fairlight CMI. Online:

http://www.vintagesynth.com/misc/fairlight_cmi.php (Datum des Abrufs:
09.09.2014).

Bildverzeichnis

Failedmuso (2014): Fairlight cmi 2. Online:

http://www.failedmuso.com/blog/wp-content/uploads/2012/04/KGrHqRHJFcE918F16oIBPj9qTNBw60_32.jpg Datum des Zugriffs: 08.06.14.

Delamar (2014): Musikprogramme. Online:

<http://www.delamar.de/musikprogramme/daw-software-vergleich/2/> Datum des Zugriffs: 08.06.14.

Wikipedia (2014): Kontinuierliche und diskrete Signale. Online:

http://de.wikipedia.org/wiki/Analogsignal#mediaviewer/Datei:Übersicht_kontinuierliche_und_diskrete_Signale.svg Datum des Zugriffs: 08.06.14.

Beuth Hochschule (2014): Abtastung. Online:

http://public.beuth-hochschule.de/benjaminkuhn/mta/_01/abtasttheorem.png

Datum des Zugriffs: 08.06.14.

Weinzierl, Stefan (Hrsg.) (2008): Handbuch der Audiotechnik. Delta Sigma Wandler. Berlin: Springer.

Beis (2014): Delta Sigma Modulator. Online:

http://www.beis.de/Elektronik/DeltaSigma/DeltaSigma_D.html

Datum des Zugriffs: 10.6.14.

Beis (2014): $\Delta\Sigma$ -Modulator 2.Ordnung. Online:

http://www.beis.de/Elektronik/DeltaSigma/DeltaSigma_D.html

Datum des Zugriffs: 10.6.14.

Uni Hannover (2014): Komplexe Schwingung. Online:

http://www.iazd.uni-hannover.de/~pigors/ingenieure/ing1/maple/images/MI_2_9b17.gif

Datum des Zugriffs: 11.6.14.

M.EET (2014): Jitter. Online:

<http://m.eet.com/media/1095356/zarlink1b.jpg>

Datum des Zugriffs: 29.08.14.

Webers, Johannes (2003): Handbuch der Tonstudioteknik. 8.Aufl. Umsetzung einer analogen Schwingung in eine digitale Information.

Poing: Franzis' Verlag.

Eidesstattliche Versicherung

Name:	Marco	Vorname:	Maluschke
Matrikel-Nr.:	24067	Studiengang:	Audiovisuelle Medien

Hiermit versichere ich, Marco Maluschke, an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel „Klangunterschiede der Engine´s verschiedener Digital Audio Workstation´s“ selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und prüfungsrechtlichen Folgen (§ 26 Abs. 2 Bachelor-SPO bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO der Hochschule der Medien Stuttgart) sowie die strafrechtlichen Folgen (siehe unten) einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Auszug aus dem Strafgesetzbuch (StGB)

§ 156 StGB Falsche Versicherung an Eides Statt

Wer von einer zur Abnahme einer Versicherung an Eides Statt zuständigen Behörde eine solche Versicherung falsch abgibt oder unter Berufung auf eine solche Versicherung falsch aussagt, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

Ort, Datum

Unterschrift