Kapitel 4: Analog und digital

Digitalisierung ist die Eingrenzung („Abbildung“) eines „von Natur aus“ unendlichen und kontinuierlichen („analogen“) Materials auf eine endliche und somit diskontinuierliche Menge. Das gebräuchlichste Beispiel ist der an sich kontinuierliche Tonhöhenvorrat der menschlichen Stimme und die „Abbildung“ dieses Kontinuums auf 12 Töne pro Oktav im temperierten Tonsystem. So kann die menschliche Stimme als „analog“, das temperierte Klavier als „digital“ bezeichnet werden. Tonsysteme, wie sie in Kapitel 8 behandelt werden, sind spezifische „Digitalisierungen“ von Musik. Diese Art der Digitalisierung ist in der Musikpraxis fest verankert, auch wenn es schöne Abweichungen gibt: die Blue Note, das Glissando eines Zigeunergeigers, die Stimmmodulationen einer arabischen Sängerin usw. Die in der Musikpraxis verankerte Digitalisierung ist erlernbar und hörbar - ganz im Gegensatz zur Digitalisierung von Musik, wie sie das digitale Zeitalter kennt.

Die Digitalisierung von Musik im digitalen Zeitalter ist im Grund ein Zwischenstadium, ein Problem der Musikspeicherung und Übertragung. Die Musik selbst ist nach wie vor analog, weil das menschliche Trommelfell ausschließlich analoge Schallwellen verarbeiten kann. Im strengen Sinne gibt es keine digitale Musik, sondern nur Musik, die einen digitalen Speicherungs- und Übertragungsprozess durchlaufen hat. Das folgende Schaubild zeigt den Prozess der Analog-Digitalwandlung, wie er für das digitale Zeitalter charakteristisch ist.

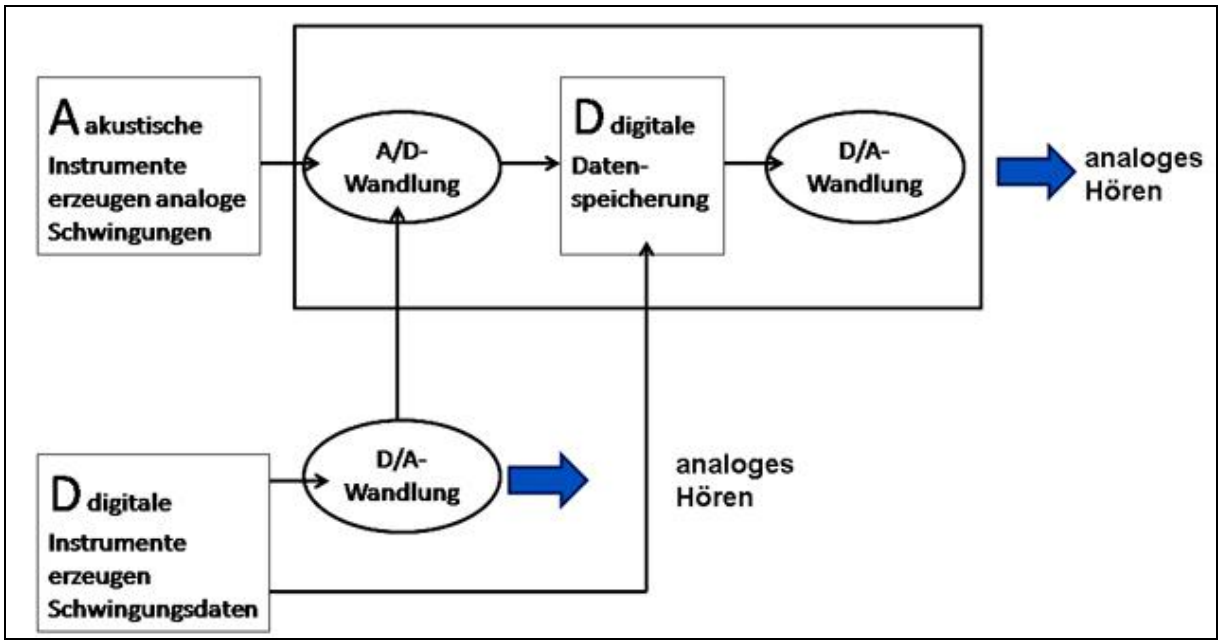


Abb. 4.1 Stationen der digitalen Musikspeicherung

A→A/D. „Akustische Instrumente“ erzeugen analoge Schwingungen, die mittels analoger Mikrofone einem Wandler (A/D-Wandler) zugeführt werden.

D. Nur „digitale elektronische Instrumente“ können Klänge rein digital erzeugen. Auch eine PC-Soundcard tut dies, allerdings hat sie (neben der rein digitalen FM-Synthese) in der Regel „gesampelte“ Analogklänge „an Bord“ (= digital gespeicherte Klänge analoger Instrumente).

D→D/A. Wenn man die Klänge eines digital-elektronischen Instruments hören oder aufnehmen will, so muss man den digital erzeugten Klang erst „analogisieren“. Eines der ersten digital-elektronischen Instrumente, der Synthesizer „Yamaha DX 7“, hatte wie alle seine Nachfolger einen analogen Ausgang, an den dann ein (analoger) Kopfhörer oder Lautsprecher angeschlossen wurde.

A/D→D. Der analog erzeugte oder rückverwandelte Klang muss „digitalisiert“ werden (A/D-Wandlung). Jetzt kann ein Computer ihn verarbeiten, er kann auf HDD, CD, DV oder DVD gespeichert werden. Er kann ein digitales Mischpult durchlaufen, ein Hallgerät usw.

D→D. Es gibt einen „Seitenzweig“ bei solchen digital-elektronischen Instrumenten, die einen „Digitalausgang“ haben (was zu Zeiten des “DX 7” noch nicht möglich war). Hier kann der Analogisierungsschritt D→A übersprungen und der digitale Klang sofort digital gespeichert werden.

D→D/A→A. Am Ende des ganzen Prozesses steht der Hörer mit seinem (analogen) Trommelfell. Um das in Schwingung zu versetzen, müssen (analoge) Schallwellen erzeugt werden. Dies machen Lautsprecher, egal ob sie analog oder digital arbeiten (D/A-Wandlung).

Beim *CD-Produktionsprozess* kann die Digitalisierung mehr oder weniger früh einsetzen. So heißen die Abkürzungen auf dem Cover einer CD:

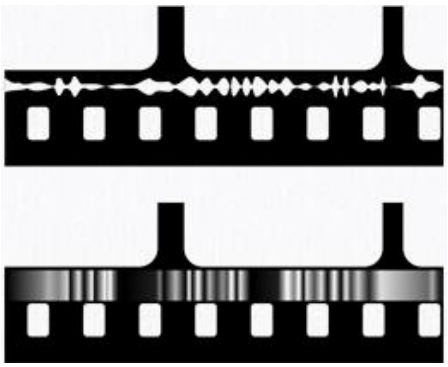
DDD = Digitale Aufnahme, digitale Abmischung, digitales Mastering (CD-Pressung). Dies ist bei Neuproduktionen meist der Fall.
ADD = Analoge Aufnahme, digitale Abmischung, digitales Mastering. Dies ist der Fall, wenn eine alte analoge Produktion neu abgemischt werden kann und dies digital geschieht.
AAD = Analoge Aufnahme, analoge Abmischung, digitales Mastering. Dies ist der Fall, wenn eine analog produzierte Schallplatte (LP) neu als CD herausgebracht und dabei das alte (analoge) Masterband verwendet wird.

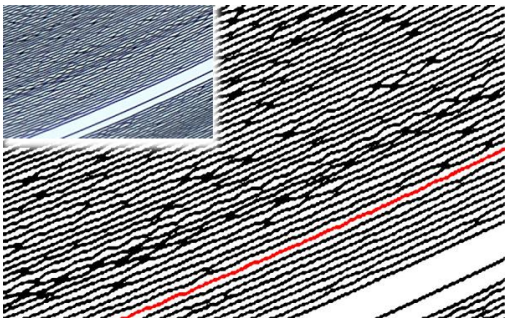
4.1 . Analoge Speicherung von Musik

Unter „analoger Speicherung“ von Musik versteht man jede Speicherung, bei der versucht wird, die originale Schwingung, die eine Schallwelle am Trommelfell erzeugt, so gut und getreu wie möglich fest zu halten. Stets muss dabei ein zeitliches Hintereinander in ein räumliches Nebeneinander verwandelt werden. Die analoge Speicherung ist historisch gesehen relativ jung, während die digitale Speicherung sehr alt ist: man denke an Drehorgeln, bei denen eine von Hand in Bewegung gesetzte „Lochkarte“ die Töne auslöste. Eines der bekanntesten digitalen Musikinstrumente ist hat Athanasius Kirchner 1650 in der „Musurgia Universalis“ abgebildet: eine Art „Stiiftwalze“ bedient Pfeifen einer (Wasser-)Orgel und tanzende Tiere.

Es gibt drei heute noch gebräuchliche analoge Speicherungsverfahren:

- die Speicherung mittels fotografischer Streifen, die „analog“ belichtet wurden (Lichttonverfahren im Kino, Abbildung 4.3 – Bemerkung: es gibt auch digitalen Lichtton, wo die fotografische Schwärzung beispielsweise mit dem PCM-Code [siehe unten] vonstatten ging),
- die Speicherung mittels Schallplatten, bei denen in einen Festkörper (z.B. Vinyl) Rillen so eingraviert wurden, dass sie kleinen Analogschwingungen gleichen. Die Abspielnadel schwingt, wenn sich diese Rille an ihr entlang bewegt, so, wie die Membran des Mikrofons es getan hat, als die Platte aufgenommen worden ist (Abbildung 4.2 auf der nächsten Seite),
- die Speicherung mittels eines in eine Gelatinemasse eingelegten magnetisierbaren Pulvers. Dies Verfahren benutzen die herkömmlichen Tonbandgeräte, die MC’s und die Musikspuren der VHS-Bänder (Abbildung 4.3).





Links oben: Lichttonverfahren (Amplituden- und Intensitätsverfahren).

Rechts oben: Fotografie einer Vinly-schallplatte (original und vergrößert).

Links unten: Die 3 Tonköpfe eines Tonbandgeräte. Löschkopf, Rekord-Kopf und Play-Kopf.

Abb. 4.3 Analoge Musikspeicherung

Die *Nachteile* der analogen Musikspeicherung sind, dass sich das Material abnutzt (d.h. ein „Rauschen“ entsteht) und dass die Aufzeichnung nie 1:1 passiert. Die realen Amplitudenschwankungen sind größer und schneller als das Medium „abbilden“ kann. Dies bedeutet Verlust der Dynamik und des Frequenzganges – auch ohne Rauschen und Beschädigung. Nach heutiger Erkenntnis und Erfahrung ist jedoch die analoge Datenspeicherung *sicherer* als die digitale. Digitalen Datenträgern wird eine Lebenszeit von 3 Jahren garantiert, Optimisten gehen davon aus, dass auch 30 Jahre Haltbarkeit möglich sind. Der Hersteller der robuster ZIP-Disketten hat als Einziger eine Garantie von 10 Jahren Haltbarkeit gegeben. Tonbänder, VHS-Cassetten oder MC’s haben die vergangenen Jahrzehnte bisher zu 95% gut überstanden. Und, geringe Fehler führen nicht zum Totalausfall der Wiedergabe! Ein hörbares Kratzgeräusch ist erträglicher als ein CD-Laufwerk, das eine angekratzte CD gar nicht mehr erkennt.

4.2. Digitalisierung akustischer Schwingungen

Durch die Digitalisierung wird Musik der Speicherung und Verarbeitung durch Computer zugänglich gemacht. Da Computer nur Zahlenfolgen speichern und verarbeiten können - dies allerdings sehr schnell und genau - muss die akustische Schwingung in eine dem Computer zugängliche Zahlenfolge verwandelt werden. Dies ist die A/D-Wandlung. Am Ende der digitalen Verarbeitung der Musik muss eine Rückverwandlung in ein analoges Signal stattfinden. Dies ist die D/A-Wandlung.

Die **A/D-Wandlung** erfolgt so, dass in schneller Abfolge der Wert der (analogen) Schwingungsamplitude bestimmt und dieser Wert als Zahl ausgegeben und/oder gespeichert wird. Es ist klar, dass die Digitalisierung dem analogen Original umso näher kommt, je häufiger ein Wert bestimmt und gespeichert wird. Diese Häufigkeit heißt **Sampling-Rate** (von „sample“ = Stichprobe) und wird als **(Abtast-) Frequenz** angegeben. Die handelsüblichen Audio-CD’s verwenden eine Sampling-Rate von 44 100 Werten pro Sekunde, also einer Abtastfrequenz von 44 100 Hz. Bei der Studioproduktion verwendet man höhere Abtastfrequenzen, z.B. 96 000 Hz oder 192 000 Hz. Videos verwenden überwiegend 48 000 Hz.

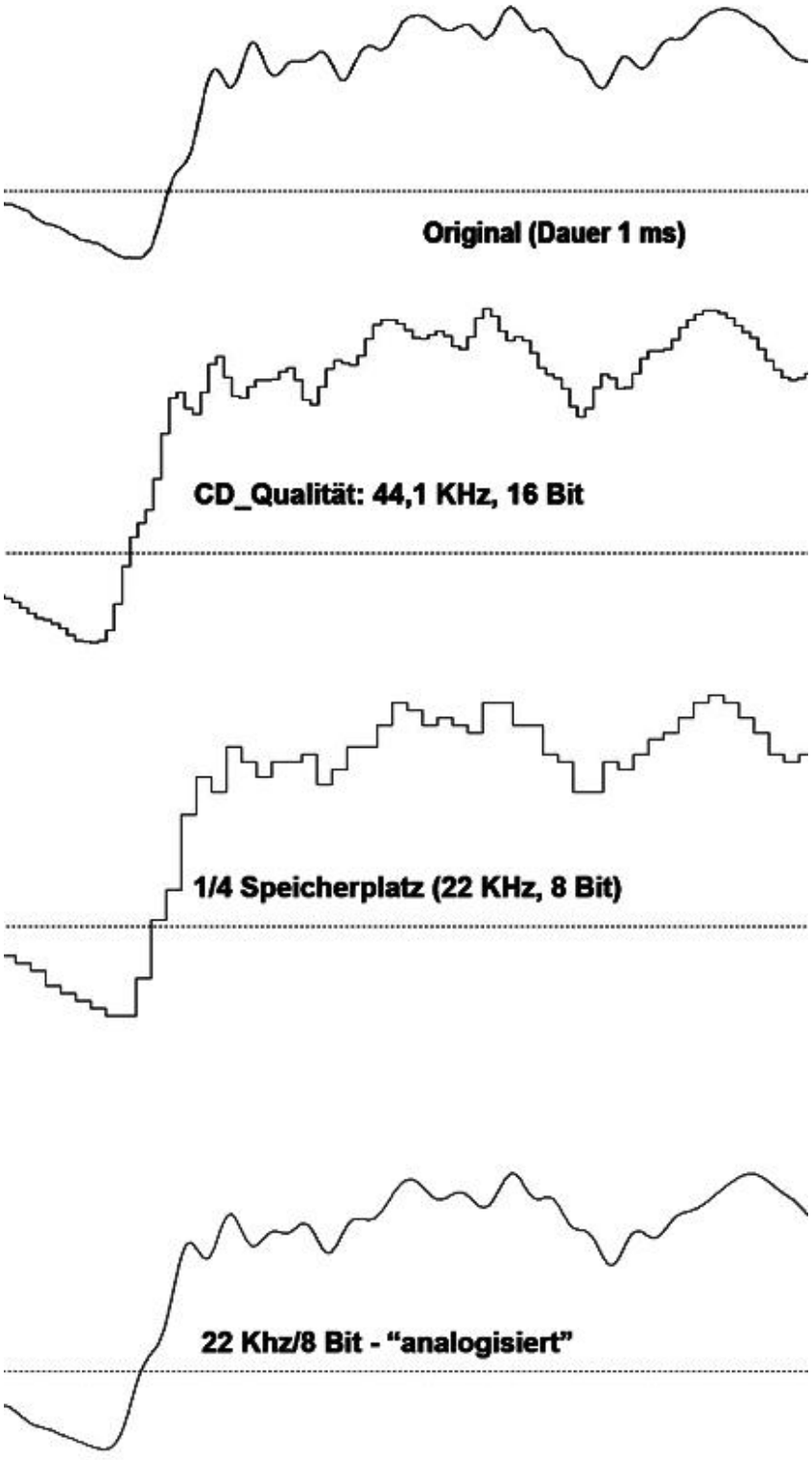


Abb. 4.4 Verschiedene Diditalisierungs-Standards

Die Abfolge von Amplitudenwerten ist dieselbe, ob eine „glatte" Kurve abgetastet wird oder Treppenkurven, wie sie die Abbildungen 4.4 zeigen. Der A/D-Wandler erzeugt mit dem „Sample & Hold"-Mechanismus eine Treppenfunktion der Spannung, der Computer speichere aber nur Zahlen. Ein Computer kann zwischen einer „glatten" Kurve und einer Treppenkurve nicht unterscheiden.

Die musikalische Bedeutung von Abtastfrequenz („Sampling-Rate") ist folgende:

Ist die *Abtastfrequenz* größer, so lassen sich feinere Frequenzunterschiede digital festhalten. Um beispielsweise überhaupt feststellen zu können, dass eine Schwingung der Frequenz ***f*** vorliegt, müssen mindestens 2 Werte pro Periode ermittelt werden. Das heißt, dass mit der Abtastfrequenz 2***f*** gerade noch die Existenz einer Schwingung der Frequenz ***f*** festgestellt werden kann - aber nicht mehr, wie diese Schwingung aussieht („**Nyquist-Theorem**").

Zu Abb. 4.4: Ein Ausschnitt aus einer Gesangspassage, gesungen mit 108 Hz. Der Ausschnitt ist 1 ms groß. Die beiden Digitalisierungen zeigen daher jeweils 44 bzw. 22 Sample-Werte (der Deutlichkeit halber als Treppenstufen gezeichnet). Wenn das mit nur 22 KHz abgetastete Signal einen D/A-Wandler durchläuft, werden die Stufen „verschmiert" und es entsteht ein sehr gutes Abbild der Original-schwingung. Alle scheinbar „analogen" Zeichnungen sind mit 192 KHz und 32 Bit abgenommen, im Grund aber auch digital – was man aber auf dem vorliegenden Papier nicht sehen kann! (PLAY! Eine Passage in unterschiedlichen Samplingraten aufgenommen.)

Mit der für CD-Qualität üblichen Abtastfrequenz von 44 100 Hz können Frequenzen bis zu 22 050 Hz festgestellt werden. Sind im Signal, das digital mit 44 100 Hz gespeichert werden soll, höhere Frequenzen enthalten, so reagiert der Abtastmechanismus so, dass er von dieser Frequenz nur gelegentlich eine Probe entnimmt. Die Gesamtmenge dieser Proben stellt eine im Ursprungssignal nicht vorhandene „Information" dar (sog. „**Aliasing**"). Bei Sinusschwingungen ist dies eine zusätzliche, niederfrequente Schwingung. Dieser Effekt, der wie ein „Phasing" klingt, wird bisweilen künstlich erzeugt, ist jedoch bei Hi-Fi-Aufnahmen unerwünscht. Dem A/D-Wandler muss ein Filter vorgeschaltet, der nur Frequenzen bis 22 050 Hz durchlässt. Da analoge Filter nie ganz „exakt" abschneiden, kann man durch Tricks (Oversampling, Resampling) diese heikle Arbeit auf digitale Filter verschieben.

Das „Abtasten" und „Probe entnehmen" wird auch als „**Sample & Hold**" bezeichnet und jenseits der originären Musikdigitalisierung bereits bei Analogsynthesizern verwendet. Ist die Abtastrate im Sekundenbereich und wird beispielsweise ein weißes Rauschen abgetastet, so erhält man eine Zufalls-Zahlenfolge. Solche Zufallsgeneratoren waren in Synthesizern der 70er Jahre eingebaut (Abbildung 4.5).

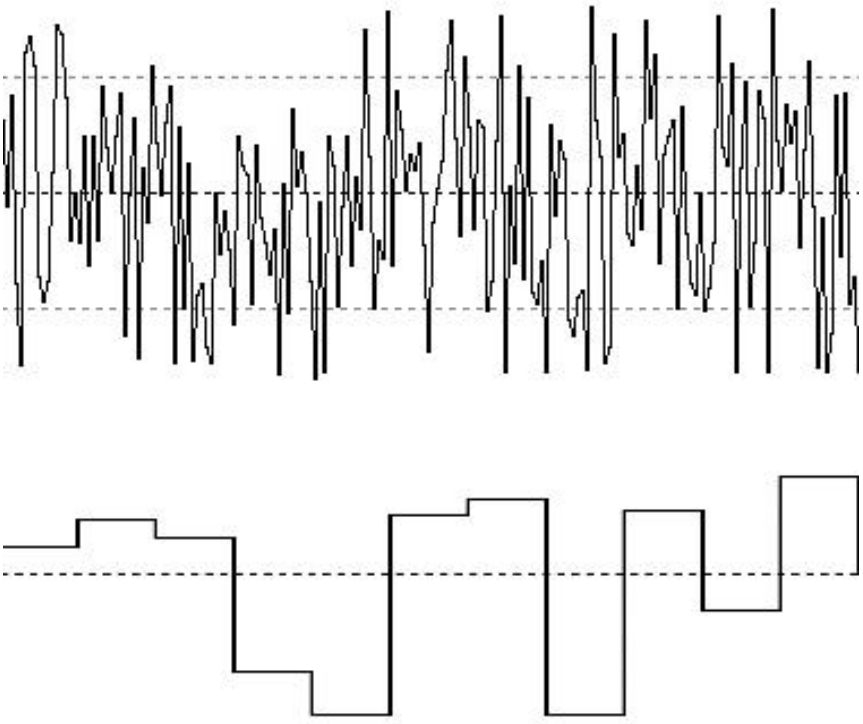


Abb. 4.5 Sample and Hold von Rauschen ergibt eine Zufallsfolge

Der durch Aliasing hervorgerufenen Phasingeffekt kommt sehr häufig vor, wenn man Audiodateien für die Übertragung im Internet auf eine sehr niedrige Sampling-Rate „herunter setzt" (vgl. unten Experiment 4.1). Neben diesem Effekt bewirkt eine geringe Abtastrate, dass weniger „Höhen" übertragen werden können: der Klang wird „dumpfer".

Neben der Abtastfrequenz (Sampling-Rate), spielt für die Qualität der digitalen Speicherung und Wiedergabe auch eine Rolle, wie genau („mit wie vielen Stellen hinter dem Komma") diese Werte bestimmt werden. Diese Genauigkeit heißt **„Auflösung"**. Der Computer „misst" die Wertegenauigkeit in Größe des Speicherplatzes, der für die Speicherung des jeweiligen Wertes notwendig ist. Bei 16 Speicherplätzen pro Wert können 2^{16} = 65 536 unterschiedliche Werte gespeichert werden. Man spricht in diesem Fall von 16 Bit Auflösung. (17 Bit wären doppelt so viel Werte wie 16 Bit.) Anschaulich ist einleuchtend, dass, je höher die Auflösung, umso größer der Dynamikbereich („**Rauschspannungsabstand**"), der übertragen werden kann. Der wichtige Fall von 16 Bit Auflösung (= „CD-Qualität") führt zu einem Dynamikbereich von 97,8 dB.

4.3. Logistik digitaler Speicherung

Speicherplatz. Trotz des Preiszerfalls im Bereich von Speicherplatz ist immer noch ein Problem, dass bei der Musikdigitalisierung enorme Menge von Daten anfallen. Eine Minute Musik in CD-Qualität benötigt ca. 10 MB Speicherplatz.

> *In CD-Qualität werden pro Sekunde 44 100 Werte gespeichert, wofür 16 Speicherplätze (bits) zur Verfügung stehen. Da 16 bit = 2 Byte sind, bedeutet das 44 100 x 2 = 88 200 Byte = 88,2 KB für 1 sec Mono-CD-Musik. 1 Minute Musik in Stereo-CD-Qualität (unkomprimiert) benötigt 2 X 60 mal 88,2 KB = 10.584 KB (entsprechend 10,3 MB).*

Es gibt zwei Möglichkeiten, in puncto Speicherplatz Kosten zu sparen: Entweder werden die Daten „komprimiert" oder es werden alternative Digitalisierungsverfahren entwickelt. Zum Letzten: Bei der „**Delta-Modulation"** werden nicht die gesampelten Zahlenwert in ihrer vollen Größe abgespeichert, sondern jeweils die Differenz zum vorhergehenden Wert. Als „*Differential Interpolation*"-Synthesis setzt Roland ein solches Verfahren in seinem Sampler S 760 ein und kann dann 1 Minute Musik in CD-Qualität mit 4,5 MB speichern. Eine noch radikalere Überlegung liegt der „**1 Bit-Technologie**" zugrunde, die die Samplingfrequenz so lange steigert, bis es genügt, bei jedem Sample nur noch festzustellen, ob es sich vom vorigen um 1 Bit nach oben, unten oder gar nicht unterscheidet. Diese Geräte, die für Studiozwecke auf dem Markt sind, erfordern eine vollkommen eigene Hardware und produzieren Daten, die kein handelsüblicher CD-Player „lesen" kann. Die Abtastfrequenz beträgt beispielsweise 2,822 MHz = 2 822 KHz, also das 64-fache der CD-Abtastfrequenz von 44,1 KHz. Zur Speicherung von 1 Sekunde Musik benötigt man dann 2 822 000 Bit = 352 750 Byte = 0,35275 MB, für 1 Minute Stereo also 2 X 60 X 0,35275 MB = 42,33 MB . Das ist mehr als CD-Qualitäts-Speicherplatz aber weniger als Studioqualitäts-Speicherplatz (96 KHz bei 24 Bit: 138 MB pro Minute).

Da heute wegen der Entwicklung preiswerter „Massenspeicher" (z.B. 4 GB auf einer Speicherkarte und auf der iPod-„Festplatte" oder 4,7 GB auf einer DVD) weniger der Speicherplatz „an sich", sondern eher der „Datenfluss", d.h. Daten pro Zeit, eine Rolle spielt, sind Datenkomprimierungsverfahren immer noch ein heißes Thema. Hier einige rechnerische Richtwerte für den Datenfluss im Internet:

Bezeichnung	*Übertragungsrate*	*Audioqualität*	*Datum*
V.29 Modem	9 600 Bit/sec	keine **mp3**-Qualität	vor 1997
V.90 56K-Modem	56 000 Bit/sec	schlechte **mp3**-Qualität	1997
ISDN (integrated service digital network)	2 mal 64 000 Bit/sec	gute **mp3**-Qualität	1999
DSL (digital subscriber line)	768 000 Bit/sec (download)	„halbe CD-Qualität"	1999

Umrechnung der üblichen Angaben „Abtastfrequenz/Auflösung" in „Übertragungsrate" am Beispiel der CD-Qualität: 44 100 Hz bei 16 Bit bedeutet 16 X 44 100 Bit/sec = 705 600 Bit/sec, bei Stereo doppelt so viel, also 1 411 200 Bit/sec. CD-Qualität bedeutet also doppelt so viel wie DSL zu leisten vermag. Im folgenden Experiment wird „überprüft", dass eine **mp3**-Kompression auf 128 000 Bit/sec (also um den Faktor 10) faktisch „CD-Qualität" beinhaltet. Und dies entspricht der Übertragungsrate bei ISDN, wenn beide Kanäle genutzt werden.

Experiment 4.1 mp3-Datenkompression

Dasselbe Musikstück wird in unterschiedlichen **mp3**-Kompressionsstufen abgespielt. „CD-Qualität“ wird bei 128 kbps („128 KB per second“) angegeben – was immer das heißt! Immerhin, erst bei 48 oder 32 kbps bemerkt man den bereits erwähnten „Phasingeffekt“. Abbildung 4.5 zeigt ein Schallsignal, das bei Übertragung durch ein Modem erkennbare Qualitätseinbußen erleidet:

„**mp3**“ ist das älteste, im Prinzip bereits 1982 entwickelte Musik-Daten-Kompressionsverfahren. „**mp3**“ ist die Abkürzung für „MPEG Layer 3“, wobei MPEG („moving picture expert group“) überwiegend Verfahren zur Videokompression sind. Die Audiokompression war ein Abfallprodukt.

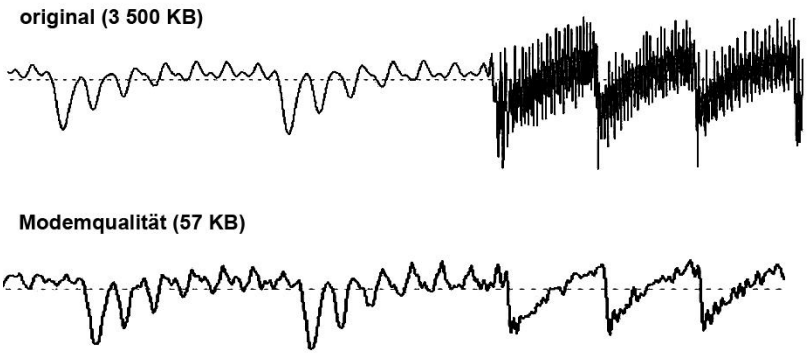


Abb. 4.6 Veränderung der Schwingungsform bei extremer Komprimierung

Die Kompression beruht auf einer Reihe hörpsychologischer Effekte (siehe Kapitel 3) und verfährt – grob gesagt – so, dass das Schallsignal in Frequenzbänder unterteilt und für jedes Frequenzband der geringst mögliche Speicherbedarf ermittel wird. Der Kompressionsfaktor hängt daher von der Art des Schallsignals ab und beträgt ca. 1:10. Das Verfahren ist mit Verlusten behaftet, d.h. Information geht verloren und kann nicht wieder her gestellt werden. Insofern ist **mp3** etwas qualitativ anderes wie das „Zip“-Verfahren beim Computer, wo Daten verlustfrei komprimiert werden. Ein „Zippen“ von Audiodaten bringt fast keinen Gewinn! (PLAY: Musikpassage in 3 unterschiedlichen mp3-Qualitätsstufen.)

Da die Original-Musikdaten bei der **mp3**-Kompression „umgerechnet“ werden, spricht man von „Algorithmen“ (Rechenverfahren). In der aktuellen Computerterminologie haben die originalen Musikdaten die Endung „**wav**“ (Windows) oder „au“ (Apple), die komprimierten beispielsweise die Endung „**mp3**“. *Encoder* sind Programme, die **wav**- in **mp3**-Dateien verwandeln und *Decoder* verwandeln **mp3**- in **wav**-Dateien. Der Algorithmus selbst heißt daher „**Codec**“.

Heute sind sowohl Weiterentwicklungen von **mp3** als auch alternative Komprimierungsverfahren auf dem Markt, einige sind „open source“, andere sind sorgsam geschützt (ausführlicher über http://de.wikipedia.org/wiki/Audiodatenkompression):

- **AAC** (advanced audio coding) wird von Apple („iTunes Store“) und Real Media (rm-Player) eingesetzt. Die meisten Online-Radios verwenden AAC. So entspricht 96 Kbit/sec von AAC in etwa der UKW-Qualität. Diverse Handys setzen AAC ein und seit Dezember 2007 ist auch Nitendo (Fernseh-Spielkonsole „Wii“) auf AAC umgestiegen. Die Kompressionsrate von AAC ist in der Regel größer als bei **mp3**, etwa 1:16.
- **WMA** (windows media audio) ist eine stark an **mp3** angelehnte Kompression von Microsoft, die – wie immer – „aggressiv“ um den Markt kämpft. Das Format ist flexibel („variable Bitrate“, Surround-Wiedergabe u.a.) und enthält die Möglichkeit zum Kopierschutz! Es gibt auch eine Version „nur für Stimme“ mit sehr kleiner Übertragungsrate.
- **OGG** (Ogg-Vorbis – ein Kunstname) ist patentfrei und daher für Programmierer einsehbar. Qualitativ ist ogg mit aac vergleichbar, aber weniger verbreitet. Heute spielen die meisten Player

– auch der Windows Media Player! – ogg-Dateien ab. Das Deutschlandradio sendet mit ogg, weil ogg „streamingfähig“ ist.

- **ATRAC** (Adaptive TRansform Acoustic Coding) war zur Zeit, als die letzte Auflage des vorliegenden Scriptums (1997) erschien, noch ein Marktführer von Komprimierung, den Sony für die Minidisk 1992 entwickelt hatte. Heute hat sich auch Sony von atrac abgemeldet, die Minidisk-Player laufen aber immer noch hervorragend und werden beispielsweise von Rundfunkleuten gerne verwendet. Erst seit 2 Jahren machen ihnen tragbare Harddiskrecorder Konkurrenz (Abbildung 4.9).

Zwischen einer **Audio-CD,** die in einem herkömmlichen CD-Player abgespielt werden kann, und einer **CD-ROM**, die Musikdaten im Format **wav**- oder **au**- oder **mp3**- etc. enthält und nur über einen Computer oder entsprechend konfigurierten DVD-Player abgespielt werden kann, muss unterschieden werden! Im Prinzip sind die Daten auf einer Audio-CD mit „**wav**“ identisch (unkomprimiert 1 : 1), sie haben aber einen speziellen „Kopf“ und die CD ist „finalisiert“, so dass sie nicht mehr weiter bearbeitet werden können.

Um die Musikdaten einer Audio-CD auf einer Festplatte als wav- oder au-Daten zu speichern und eventuell dann in mp3 zu verwandeln, muss man die Audio-CD mittels spezieller Programme „rippen“ (d.h. den „Kopf“ und die Finalisierung abstreifen). Man erhält dann eine wav-Datei, die (manchmal in einem Durchgang) in mp3 gewandelt werden kann. Herkömmliche CD-Player können nur Audio-CD’s wiedergeben. Es gibt aber auch (vor allem in Ghettoblastern eingebaute) CD-Player , die mp3-Dateien von einer CD-ROM (=Daten-CD) abspielen und/oder sogar mp3 und wma über einen USB-Eingang direkt von einer Festplatte oder einem „Stick“ lesen können. Die meisten **DVD-Player** sind in der Lage nicht nur (finalisierte) DVD’s und Audio-CD’s, sondern auch mp3 und wma auf CD-ROM’s oder DVD-ROM’s (also CD’s oder DVD’s mit Computerdateien) wieder zu geben.

Ein **mp3-Player** oder **iPod** enthält neben einem Speichermedium für mp3- oder aac-Dateien einen Decoder und einen D/A-Wandler zur analogen Ausgabe der Musik. Über einen digitalen Ausgang (USB oder iPod-spezifisch) können die mp3-/aac-Daten auch direkt an einen Computer übergeben oder auf einem DVD-Player mit USB-Eingang gespielt werden. Für den spezifischen digitalen iPod-Ausgang gibt es zudem Spezial-Player im entsprechenden i-Design.

Während die mit „unhörbaren“ Verlusten behafteten Kompressionsverfahren bei CD-Qualität den Faktor 1 : 10 erreichen, kommen *verlustfreie* Kompressionsverfahren wie MLP (meridian lossless packing) oder PPCM (packet puls code modulation) auf Komprimierung mit dem Faktor 1: 2,5 . Verwendung finden solche Verfahren bei qualitativ hochwertigen Übertragungen von Mehrkanal-Musik (z.B. 5.1-Dolby) oder bei der sagenumwobenen Audio-DVD, die mit Studiowerten 96 000 Hz/24 Bit aufwartet und sich bislang auf dem Markt nicht durchsetzen konnte. Man erreicht durch diese Kompression, dass selbst bei Mehrkanal-Audio 74 Minuten auf eine DVD-Scheibe passen.

4.4. Technik digitaler Speicherung

Alle Musikdaten, ob unkomprimiert oder komprimiert, können nach denselben Verfahren gespeichert werden. Hier ein kleiner Einblick in die Technik der Digitaldatenspeicherung:

Analoge Speicher- und Übertragungsmedien

„Tonbänder“ (DV, DAT, VHS-Video, Telefonkabel, RS232) werden zur Speicherung oder Übertragung von digitalisierter Musik (oder allgemeiner: Computerdaten) verwendet. Das Telefonkabel ist ein analoges Kabel und überträgt bekanntlich massenhaft digitale Daten. Bisweilen sind die „digitalen Daten“ noch akustisch hörbar, beispielsweise bei der Einwahl eines Modems . Hier werden – ähnlich wie beim Strichcode im Supermarkt – in gewisser Reihenfolge „0 oder 1“ als „Pieps oder Ruhe“ oder „schwarz oder weiß“ oder „hoch oder tief“ usw. gesendet. Freilich können die „Sendefrequenzen“ bei einer Übertragungsrate von 96 000 Bit/sec nicht mehr im hörbaren Bereich sein.

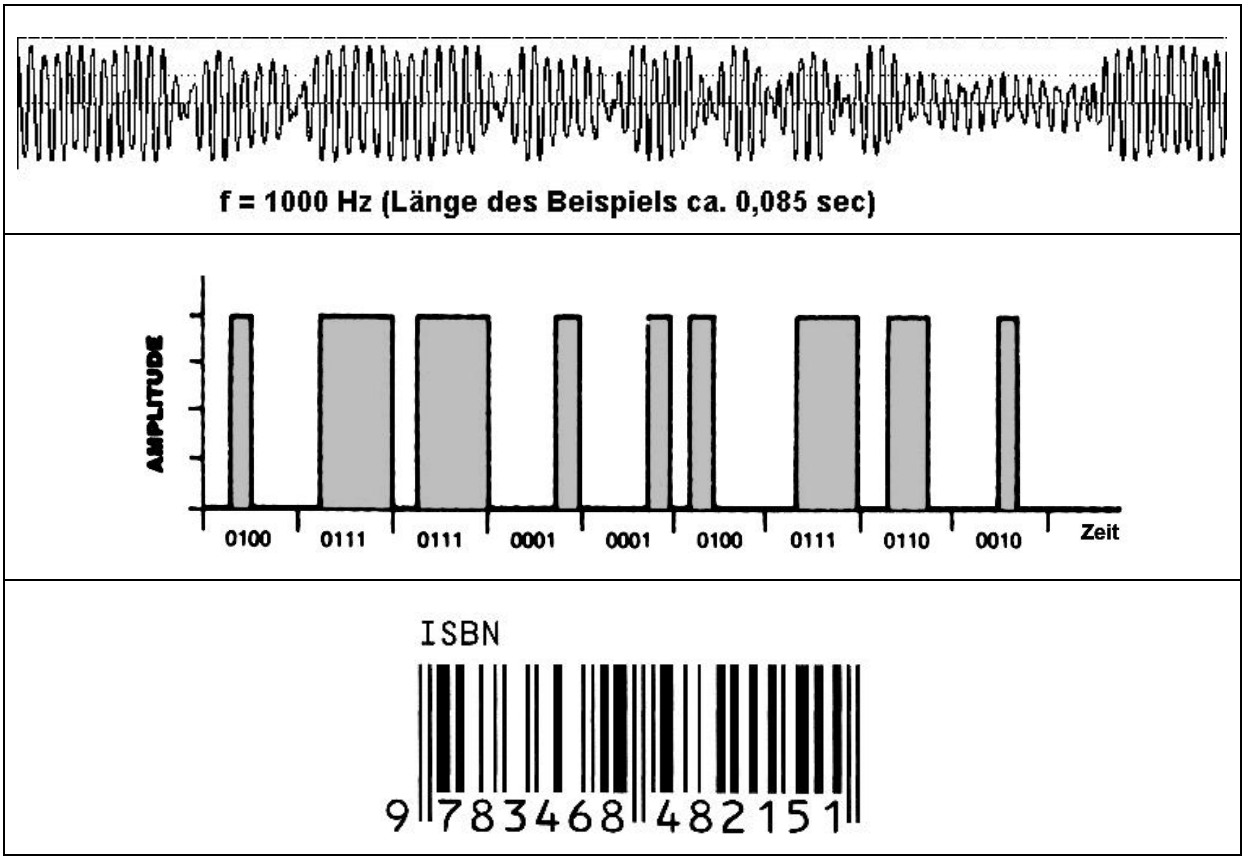


Abb. 4.7 Digitale Daten auf analogen Medien gespeichert: die Tonfolge bei der Einwahl eines Modems (hier 779010 für die Uni Oldenburg) - Darstellung von Zahlen zwischen 0 und 15 - Strichcode im Buchladen

Im mittleren Beispiel werden 16 Zahlen zwischen 0 und 15 ($2^4 = 16$) übertragen. Je nach Position der „1“ innerhalb eines Viererpakets kommen unterschiedliche Ziffernfolgen und somit Zahlen zustande. (Dualzahlensystem: 0100 = 0+4+0+0 = 4, 0111 = 0+4+2+1 = 7, ... 1010 = 8+0+2+0 = 10.)

DAT-Bänder sind analog arbeitende digitale Speichermedien von hoher Kapazität. Sie sind (ähnlich den DV-Bändern im Videobereich) sehr robust und preiswert. Da die „Navigation“ etwas umständlich ist, sind DAT-Recorder heute nur noch in Studios und zur Archivierung von Endabmischungen oder als Sicherheitskopie zu finden.

Digitale Speichermedien

Zu den genuin digitalen Speichermedien gehört die CD und gehören alle Arten von Computerdisketten, CD-ROM’s, DVD’s und Speicherkarten. Auch „Festplatten“ mit einer rotierenden Scheibe gehören hierher (es sind faktisch „optimierte CD-Player“). Die digitale Information wird auf all diesen Medien „eingebrannt“ und danach wieder „ausgelesen“.

Zu Abbildung 4.8: Die Erhebungen („pits“) werden von einem Laserstrahl abgelesen. Bei der CD hat dieser die Wellenlänge 780 nm und ist 2,1 µm dick, bei der DVD wird die kleinere Wellenlänge 650 nm und ein dünnerer Strahl von 1,3 µm verwendet. (nm = Nanometer = ein Millionstel Millimeter; µm = Mikrometer = ein Tausendstel Millimeter.)

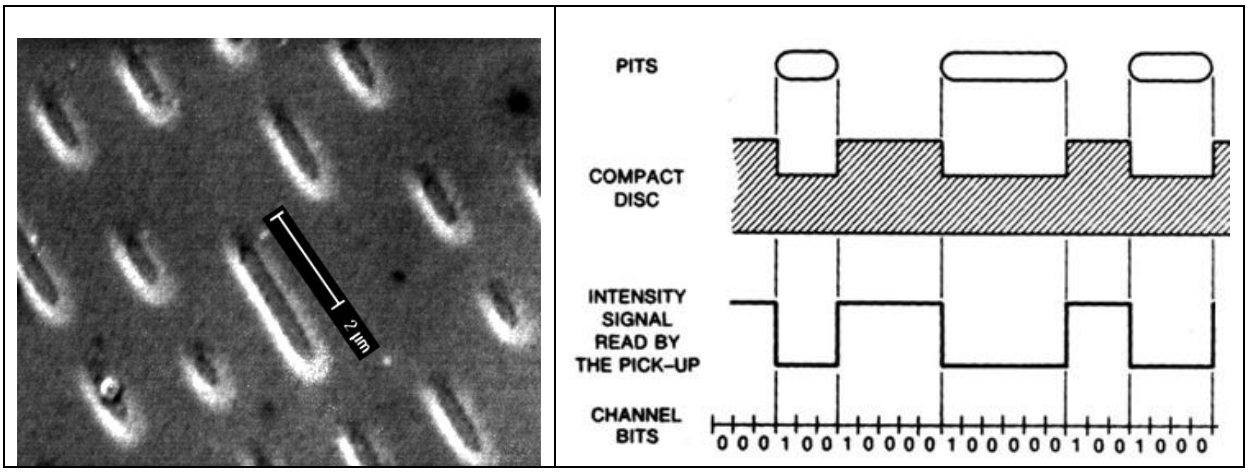


Abb. 4.8 CD unter dem Mikroskop und schematisch

Harddiskrecording

Ein meist computergesteuertes Verfahren zur Aufnahme, zum „Schneiden“, Mischen, Kopieren und Wiedergeben digitalisierter Musik, bei der das Musikmaterial vorübergehend auf einer Festplatte abgelegt ist, heißt heute Harddiskrecording. Es gibt verschiedene Modelle:

Modell 1: Ein Computer ist über eine seiner Schnittstellen (i-Link, SCSI oder USB 2) mit einem externen Analog-Digital-Wandler verbunden, der die Aufgabe hat, analoge akustische Schwingungen zu digitalisieren. Die Audio-Ein- und -Ausgänge des Systems befinden sich an diesem externen Wandler. Der Computer ist mit einem Programm versehen, das in der Lage ist, die über seine Schnittstelle ankommenden digitalen Musikdaten ordentlich auf seiner Festplatte zu speichern und zu verwalten.

Modell 2: Das System Computer/Wandler wird zum alleinigen Zweck des Harddiskrecordings in einem „Stand alone“-Gerät zusammengefasst. Solch ein Gerät genau wie ein Mehrspurtonbandgerät mit Mixer aus und wird auch so bedient. Die Musikdaten werden auf einer im Gerät befindlichen Festplatte gespeichert und können auch an einen Computer „ausgegeben“ werden.

Modell 3: Das externe Wandler-System der ersten Lösung wird als Karte in den Computer hinein verlegt. Macht man Qualitätsabstriche, so können die Analog-Digital-Wandler einer Multimedia-Soundcard verwendet werden. Dann ist Harddiskrecording ein „Kinderspiel“ (im doppelten Sinne!) und kostet als „MAGIX Music Makers“ nur noch 49 Euro.

Abb. 4.9 Links der erste Mini- Harddiskrecorder (von Microtrack). Rechts das Innere einer Festplatte, das wie ein Schallplattenspieler aussieht.

Modell 4: Ein kleines handliches Gerät enthält A/D-Wandler, Mikrofon, Speicherkarte und einfachste Bedienelemente zur Aussteuerung einer Stereoaufnahme. Aufgenommen werden **wav**- oder **mp3**-Dateien, teilweise sogar in Studioqualität. Zur Weiterverarbeitung der Musikdaten muss man dieselben einem Computer mit einem Programm von Modell 2 oder 3 übergeben. Das Gerät enthält aber auch einen D/A-Wandler, so dass man die (nicht bearbeitete) Musik auch analog ausgeben und anhören kann.

Die Arbeit mit einem Harddiskrecordingprogramm verläuft „intuitiv". Bei „einstimmigen" Aufnahmeprogrammen wie dem unter „Windows-Zubehör" befindlichen **Audiorecorder** kann man Klänge aufnehmen, schneiden und (vorwärts oder rückwärts) abspielen sowie neue Klänge dazu mischen (Abbildung 4.10). Bei „mehrstimmigen" Programmen ähnelt der Bildschirm einer Partitur (vgl. Abbildung 11.4) von links nach rechts verläuft die Zeitachse und alle untereinander stehenden „Stimmen" (= digitale Musikdateien) erklingen gleichzeitig. Werden diese Stimmen bearbeitet (geschnitten, verdoppelt, gemischt mit Effekten versehen usw.), so geschieht dies alles rein „logistisch" und nicht real. Die zu Grunde liegenden Musikdateien bleiben unangetastet und ein „Schnitt" an der Stelle X bedeutet nur, dass der Computer sich die Information merkt: „gehe in der Datei nicht bis ans Ende, sondern nur bis zum Schnittpunkt X" (Prinzip der Nicht-Destruktivität).

Experiment 4.2. Windows „Audiorecorder"

Das musikalische Herz des Computers ist die **Soundcard** (Klangkarte), die im Computer eingebaut ist und alle musikalischen Arbeiten erledigen kann. Sie tritt beim Harddiskrecording ebenso in Aktion wie beim Abspielen einer Audio-CD, beim Internettelefonieren oder beim Abspielen eines Videos mit Ton.

Die heute gebräuchlichen Multimedia-Soundcards enthalten, wie schon angedeutet, ein einfaches Harddiskrecordingsystem und meistens auch noch einen „Soundchip" (d.h. das Herzstück eines Synthesizers). Um die Soundcard vom Computer aus bedienen zu können, muss ein Programm DSP (digital sound processing) gestartet werden. Der Bildschirm zeigt eine Art Tonbandgerät mit PLAY, STOP und REC (Abbildung 4.10). Oft arbeitet dies Gerät aber auch unsichtbar im Hintergrund. Aktiviert man REC, so werden alle an der Soundcard eintreffenden analogen Schwingungen („line" oder Mikrofon) im A/D-Wandler digitalisiert und vom DSP-Programm entweder im Arbeitsspeicher (RAM) gespeichert oder sofort auf Festplatte übertragen. Im RAM oder auf Festplatte liegen die digitalen Daten in einem bestimmten Format, bei Windows, wie nicht anders zu erwarten, als ***wav***, bei Apple als ***au***.

Abb. 4.10 Audiorecorder aus dem Windows-Zubehör

Hat man im DSP-Programm eine bestimmt **wav**-Datei ausgewählt und aktiviert PLAY, so wird diese Datei gegebenenfalls von Festplatte in den RAM geholt und dort dem D/A-Wandler übergeben, der die analogen Ausgänge der Soundcard mit elektrischen Schwingungen versorgt, die ein Kopfhörer, eine Hifi-Anlage oder ein Kassettenrecorder „versteht". Die Datei kann aber auch übers Internet als „Datenstrom" („streaming") während des Vorgangs der D/A-Wandung oder von einem USB-Stick oder **mp3**-Player via USB „live" eingeflogen kommen. In jedem Fall: will man Musik hören, so muss die Soundcard eine D/A-Wandlung durchführen.

Dass eine Soundcard auch eine MIDI-Sektion mit einem (normierten) Speichervorrat an Digitalklängen hat, mit der ohne großen Datenaufwand Musik gemacht werden kann, wird in Kapitel 10 abgehandelt.

Nun zum Experiment: Mit dem Windows Audiorecorder lassen sich Musikdateien „schneller“ und „langsamer“ abspielen. Dabei wird die ursprüngliche Abtastfrequenz erhöht oder erniedrigt. Es ist interessant subjektiv zu beobachten, wie sich Instrumentalklänge verändern, wann Sprachlaute nicht mehr zu erkennen sind usw. Da man die Dateien auch rückwärts abspielen kann, kann auch untersucht werden, welche Klänge „umkehrinvariant“ sind.

Ergebnis: Bei Tempoveränderungen bleibt die Verständlichkeit der Sprache erhalten, der Charakter der sprechenden Person verändert sich (z.B. Mickeymaus-Effekt oder Opa-Stimme). Bei Instrumentalklängen werden Melodie/Harmonie „transponiert“, die Klangfarbe des Instruments kann sich ändern (genauer in Experiment 4.7). Beim Rückwärtsabspielen der Sprache geht die Verständlichkeit verloren, der Charakter des Sprechenden bleibt aber erhalten. Bei Instrumentalklängen geht wegen der „falsch sitzenden“ Einschingvorgänge der Charakter des Instruments verloren.

Mit diesen Experimenten ist eine Problematik des Soundsampling angeschnitten:

Ein **Soundsampler** ist ein als Musikinstrument optimiertes Harddiskrecordingsystem. Klänge sind digital gespeichert. Sie können von den Tasten eines Keyboards aus abgerufen werden. Im Idealfall gibt es für jede Taste und jede denkbare Lautstärke (oder Klangfarbe) ein eigenes Sample. Im Normalfall ist dies aber zu kostspielig. Man nimmt einen Sound nur wenige Male auf und „transponiert“ ihn je nach gedrückter Keyboard-Taste dadurch, dass die Musikdatei mit einer größeren („höhere Taste“) oder kleineren („tiefer Taste“) Abtastfrequenz ausgelesen wird als es aufgenommen worden ist. Neben der Frequenz (Tonhöhe) ändert sich dabei auch die Dauer des Samples und die Klangfarbe. Das Dauernproblem wird dadurch gelöst, dass ein möglichst einfacher und charakteristischer Teil der Gesamtschwingung als Schleife („loop“) sooft wiederholt wird, bis die Taste losgelassen wird. Das Klangfarbenproblem ist grundsätzlich nicht optimal lösbar, wie wir in Kapitel 6 sehen werden. (PLAY: Beispiele des ersten Soundsamplers „Fairlight CM1“ zu 100 000 DM.)

Backward-Masking?

Untersuche einige finstre “bachward-masking”-Botschaften durch erneutes Rückwärtsabspielen auf dem Windows-Audiorecorder (Beispiele wie „Revolution 9“ der Beatles auf www.uni-oldenburg.de/musik-for/akustik/download)!