

Was ist analog und digital?

Die Begriffe analog und digital werden im Folgenden im Bezug auf Hifi erklärt.

Kurzerklärung:

Bei einer analogen Übertragung werden sich kontinuierlich ändernde Spannungen übertragen.

Bei einer digitalen Übertragung wird nicht mehr eine Spannung übertragen, sondern Zahlenwerte, die den Spannungswerten entsprechen.

Analog sind beispielsweise: Leistungsverstärker, Schallplatte, Tonband, Cassettenrecorder, Üblicherweise Fernsehen über Antenne, Fernsehen über Analog-Sat-Tuner

Digital sind beispielsweise: CD, DVD, SACD, Fernsehen über Digital-Sat-Tuner, Datenspeicherung in PCs

Ausführlichere Erklärung:

Bei einer analogen Übertragung werden sich kontinuierlich ändernde Spannungen übertragen.

Wenn wir Musik hören, so handelt es sich um analoge Signale, d.h. um kontinuierliche Änderungen von Schallwellen, und ebenso wird dieser Schall in elektrischen Geräten durch sich kontinuierlich ändernde Spannungen dargestellt. Die Spannungen ändern sich sozusagen stufenlos.

Wenn man so ein elektrisches Signal von einem Gerät zu einem anderen Gerät transportiert, über ein Kabel, so kommt am zweiten Gerät nicht mehr exakt das an, was das erste Gerät verschickt hat.

1. Durch die Leitung wird das Signal abgeschwächt. Die Spannung beim empfangenden Gerät ist niedriger.

Durch die elektrischen Eigenschaften des Kabels werden die hohen Frequenzen mehr abgeschwächt als die niedrigen. Bei kurzen Kabeln, bis ca. 2 m, wirken diese Effekte relativ wenig. Bei Lautsprecherkabeln, die auch viel länger sein können, spielt der Leitungswiderstand eine Rolle, der den Klang und die Leistung beeinflussen können.

2. Durch Einflüsse von außen können Störungen in das Kabel eindringen, Brumm oder hochfrequente Störungen (Radiostimmen), Funktelefonisignale (diese sind oft so stark, dass sie in die Elektronik der Geräte selbst einstrahlen, wenn die Kabel durch ihre Bauweise das nicht mehr ermöglichen, und dann gibt es kein Mittel mehr dagegen außer die Telefone auszuschalten).

Diese Effekte können durch Maßnahmen beim Bau der Ausgänge und Eingänge der Verstärker für den Bereich der hörbaren Frequenzen weitgehend ausgeschaltet werden, jedoch brauchen die Geräte hierzu Verstärker, die dann wiederum Rauschen produzieren.

Bei einer digitalen Übertragung wird nicht mehr eine veränderliche Spannung übertragen, sondern Zahlenwerte, die den Spannungswerten entsprechen.

Diese Zahlenwerte werden binär übertragen, d.h. mit den Zuständen 0 und 1.

Bei 16 Bit werden für die Zahlenwerte 16 Bits verwendet, das entspricht den Zahlen von -32768 bis +32767. Bei einer Übertragung werden diese Bits evtl. auch verfälscht, jedoch spielt das hier keine so große Rolle mehr, dafür gibt es Verfahren zur Fehlerkorrektur:

1. Wenn analoger Wert zu 30 % verändert wird, dann ist das eine hörbare Veränderung. Wenn ein digitaler Wert zu 30 % verändert würde, dann wird aus 0 z.B. 0,3 oder aus 1 wird 0,7 oder 1,3. Diese Werte können jedoch wieder genau auf 0 und 1 zurückgeführt werden. Hier ist die Toleranz gegenüber Verfälschungen schon wesentlich größer als bei analog.

2. Durch die Übermittlung von Zahlenwerten kann der Absender der Daten zusätzlich zu den Daten Steuerungsinformationen senden, anhand derer der Empfänger jederzeit prüfen kann, ob er korrekte Daten empfangen hat oder ob die Daten verfälscht worden sind. Die Daten können dann z.B. noch mal angefordert werden.

In der Praxis spielen jedoch diese beiden Fehlermöglichkeiten bei der Übertragung von einem Gerät zum anderen bei Hifi-Geräten keine so große Rolle (mit ihren kurzen Kabeln), bei der EDV jedoch im Netzwerkbereich ist das essentiell (von 10 m hin bis zu Transatlantik-Kabeln), deshalb verzichtet die digitale Verbindung von Hifi-Geräten auf viele Möglichkeiten zur Fehlerkorrektur. Bei der Abtastung von optischen Datenträgern ist das jedoch wichtig und ohne Fehlerkorrektur ginge gar nichts.

Digitalisierung mit A/D und D/A-Wandlern:

Es gibt jedoch auch Schattenseiten bei der Digitalisierung:

1. Quantisierungsrauschen
2. Grenzfrequenzen/Abtastraten
3. Ausgangsfilter/Oversampling
4. Fehlerkorrektur/Interpolation
5. Übersteuerung
6. Jitter
7. Zeitlicher Versatz

Diese Schattenseiten sind jedoch technisch gut beherrschbar, hauptsächlich deshalb, weil das Ohr für die entstehenden Probleme noch viel zu ungenau ist.

Zu 1. Quantisierungsrauschen:

Die Zahlenwerte selbst müssen erst mal ermittelt werden: mit einem **A/D-Wandler**. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen hat man bei der CD sich beschränkt auf die Zahlenwerte von -32768 bis +32767, das entspricht dem Wertebereich, den man mit 16 Bit darstellen kann, wobei 44100 mal in der Sekunde ein Zahlenwert ermittelt wird (ein Sample genommen wird (Sample = Muster)). Nehmen wir einfach mal an, für die Vollaussteuerung eines Geräts gibt es Spannungen von - 1 Volt bis +1 Volt. Dem Bereich von -1 V bis +1 Volt entsprechen dann die Zahlen -32768 bis +32767.

Beispiele:

0 Volt hat den Zahlenwert 0, 1 Volt hat den Zahlenwert 32767, + 0,5 Volt hat den Zahlenwert $32767/2 = 16383,5$. Da es in der Binärmathematik keine Kommazahlen gibt, muß man entweder aufrunden oder abrunden, und hat somit eine kleine Abweichung vom analogen Wert. Abgerundet ergibt sich 16383. -0,5 Volt hat den Zahlenwert $-32768/2 = -16384$, dieser Wert könnte ohne zu runden übertragen werden. Vereinfacht gesagt, gibt es für jeden Zahlenwert einen Bereich von Spannungen. Wenn sich die Spannung innerhalb von so einem Spannungsbereich ändert, wird immer die gleiche Zahl übertragen.

Die ermittelten Zahlenwerte kann man nun übertragen, und der Empfänger muss sie wieder in eine analoge Spannung umwandeln: mit einem **D/A-Wandler**.

Durch die Differenzen, die durch das Auf- bzw. Abrunden entstehen, ist das Signal beim Empfänger nicht mehr exakt identisch mit dem analogen Signal vor der Wandlung, wenn man die beiden Signale vergleicht, kann man dann das so genannte **Quantisierungsrauschen** messen, das sind die Unterschiede, die durch das Auf- bzw. Abrunden beim "Quantisieren", beim Messen der analogen Spannungen entstehen.

Bei einem Spannungsbereich von 2 Volt und 65536 Zahlenwerten entspricht jeder Zahlenwert einem Spannungsbereich von ca. 31 Mikrovolt. Die zwei ungünstigsten Fälle sind:

- eine Spannung ändert sich von Messzeitpunkt zu Messzeitpunkt um diese Spannung und es durch den A/D-Wandler immer der gleiche Zahlenwert erzeugt, d.h. der D/A-Wandler bekommt die Änderungen gar nicht mit und erzeugt immer die gleiche Spannung, oder
- eine Spannung ändert sich nur minimal an der Grenze zwischen 2 Zahlenwerten, und deswegen werden abwechselnd zwei aufeinander folgende Zahlenwerte erzeugt, obwohl sich die Spannung um weniger als 31 Mikrovolt geändert hat. Der Empfänger erzeugt dann eine größere Wechselspannung als wie es vorher analog eingegeben hat.

Zu 2. Grenzfrequenzen/Abtastraten

Im Falle einer CD wird 44100-mal in der Sekunde das analoge Signal abgetastet und ein Zahlenwert erzeugt (für Stereo werden je Sekunde doppelt so viele Zahlenwerte erzeugt). Dadurch kann man nur Frequenzen bis zu einer bestimmten Frequenz digitalisieren, bei der CD ist die höchste Frequenz 22050 Hz. Für das normale Hören ist das völlig ausreichend. Höhere Frequenzen können mit dieser Abtastrate nicht mehr erfasst werden. Bei neueren Verfahren bei SACD und DVD-Audio werden viel höhere Abtastraten verwendet, das hat meines Erachtens die folgenden Gründe:

- technisch ist es jetzt leicht möglich, viel höhere Abtastraten zu realisieren als zur Anfangszeit der CD. Auch wenn das menschliche Gehör einerseits und die Musikinstrumente andererseits in den letzten 20 Jahren keine nennenswerte Entwicklung durchgemacht haben, so ist es doch ein geniales Marketing, wenn man Frequenzen bis 100 kHz übertragen kann und dieses auch noch verkaufen kann.
- eine technisch einfachere Bauweise von D/A-Wandlern, weil die Filterkomponenten so besser und einfacher gebaut werden können.
- Es ist ein Fortschritt, und ohne Fortschritt geht die Industrie irgendwann Pleite, so wie bei den mechanischen Schreibmaschinen. Die Hersteller von mech. Schreibmaschinen sind praktisch ausgestorben.

Zu 3. Ausgangsfilter/Oversampling

Im D/A-Wandler soll aus lauter aufeinander folgenden Zahlenwerten wieder ein analoges Signal gemacht werden. Aus den einzelnen Zahlenwerten wird aber im Prinzip eine Art treppenförmiges Signal erzeugt. Immer ein 44100stel einer Sekunde gibt es einen bestimmten Zahlenwert bzw. eine entsprechende Spannung, und die nächste 44100stel Sekunde lang gibt es dann den nächsten Zahlenwert bzw. die entsprechende Spannung usw. Ein Ausgangsfilter macht dann aus dieser Treppe ein kontinuierliches Signal. Das hat mehrerlei Sinn:

- diese winzig kleinen Treppensprünge werden von der Elektronik als sehr hochfrequentes Signal interpretiert. Man kann es zwar nicht mehr hören, aber die Hochtöne eines Lautsprechers könnte man damit leicht überlasten.
- Auch ein Verstärker würde dieses Signal erst mal verstärken, und das kostet Leistung.
- Es ist technisch gesehen einfach unsauber.

Durch ein Filter lassen sich diese Frequenzen unterdrücken. Aber ein Filter, das alle Frequenzen ab 22050 Hz total abfiltert (bei der CD), ist aufwendig. So hat man das Oversampling erfunden. Beim 8-fach Oversampling werden aus einer Treppenstufe dann 8 kleinere Treppenstufen. Es wird jede Zahl mit 8 multipliziert und von einer ursprünglichen Zahl zu nächsten hat man dann einen Abstand von 8, Aus 100 und 101 wird dann 800 und 808 usw. Dann wird statt nach jeder 44100stel Sekunde in jeder 352800stel Sekunde eine kleine Treppenstufe von 800 bis 808 usw. gemacht. Dadurch verschiebt sich die Frequenz, aber der man hohe Frequenzen wegfiltren muss, von 22050 Hz auf 176400 Hz, d.h. man hat für den Filter einen viel größeren Spielraum. Es gibt noch andere Oversampling-Verfahren.

Zu 4. Fehlerkorrektur/Interpolation

Vom digitalen Signal bis zur Umwandlung zurück in ein analoges Signal ist evtl. ein langer Weg. Auf der CD ist das digitale Signal als eine Folge von Vertiefungen vorhanden. Dann wird es z.B. digital (d.h. als Zahlenwerte)

transportiert über ein optisches Kabel zu einem Verstärker mit opt. Eingang, und dort wird es dann per D/A-Wandler in das analoge Signal umgewandelt. An verschiedenen Stellen können Fehler auftreten, z.B. kann die CD verschmutzt sein, und kann nicht gelesen werden. Auch an anderen Stellen können Übertragungsfehler auftreten. Dort, wo es zu den schlimmsten Fehlern führen kann, bei der Abtastung der CD, gibt es eine Fehlerkorrektur, mit der bestimmte Fehler so korrigiert werden können, als wären sie nie aufgetreten. Andere Fehler können vielleicht nicht mehr korrigiert werden, dann wird oft eine der folgenden Maßnahmen durchgeführt:

- Interpolation: eine Zahl oder eine Folge von Zahlen kann nicht gelesen werden, dann wird von der letzten Zahl, die noch korrekt gelesen werden konnte bis zur nächsten Zahl, die wieder korrekt gelesen wurde, interpoliert. Z.B. wenn die Zahl 10000 gelesen wurde, dann kommt eine Lücke von 4 unleserlichen Zahlen, und dann kommt die Zahl 10300, dann würde man für die 4 unleserlichen Zahlen die Zahlen 10060, 10120, 10180, 10240 einsetzen. Bei den meisten kurzen Lücken wird das gar nicht auffallen.
- Es wird die Zahl 0 verwendet. Dadurch hat man einen Sprung in der Ausgangsspannung, dieses Verfahren ist nicht so gut wie das vorherige.
- Es wird der Signalverlauf vor der unleserlichen Stelle und danach untersucht und die interpolierten Werte werden nicht linear ermittelt, sondern mit quadratischer oder kubischer Interpolation, je nachdem, ob die Interpolation mit Kurven zweiten oder dritten Grades erfolgt. Das wird in DSP-Software verwendet, um hochfrequente Störkomponenten aus Signalen zu entfernen, wie sie bei fehlerhaften Datenströmen vorkommen.

Zu 5. Übersteuerung

Im obigen Beispiel wurde eine Spannung von +1 Volt bis -1 Volt digitalisiert. Wenn die Spannung diesen Bereich überschreitet, z.B. + 2 Volt, dann ist übersteuert. Größer als der größte oder kleiner als der kleinste Zahlenwert kann die Zahl nicht werden. Selbst kleinste Übersteuerungen sind oft deutlich hörbar. In der analogen Signalverarbeitung hat man meistens viel mehr Reserve, und die Verzerrungen steigen nicht schlagartig an wie in der Digitaltechnik, sondern nur langsam. Die Übersteuerungsreserve wird auch Headroom genannt.

Zu 6. Jitter

Eine Folge von Zahlen wird mit dem D/A-Wandler in eine analoge Spannung umgewandelt. Bei der CD kommen alle 44100stel Sekunde zwei Zahlen für die 2 Kanäle. Wenn dieses Zeitraster von 44100stel Sekunden nicht exakt eingehalten wird, dann kommt es zum zeitlichen Versatz, genannt Jitter. Dieser Jitter ist oft messbar, ob er hörtechnisch eine Rolle spielt, wage ich zu bezweifeln.

Jitter (als Substantiv "Flimmern" , als Verb "zittern") bedeutet, daß bestimmte Ereignisse nicht exakt zu den eigentlich notwendigen Zeitpunkten eintreten, sondern die tatsächlichen Zeitpunkte um den korrekten Wert herum variieren, eben "zittern" (jittern).

Kurz ausgeholt; die Theorie der Abtastung eines Analogsignals basiert darauf, daß man nicht das gesamte Signal übertragen muß, sondern es ausreicht, zu definierten Zeitpunkten Proben des Signals zu entnehmen. Es reicht, diese entnommenen Proben zu übertragen, und der Empfänger kann aus diesen Proben das Originalsignal wieder exakt rekonstruieren. (bei Einhaltung der Randbedingung)

Es leuchtet ein, daß diese Rekonstruktion nur dann gelingen kann, wenn die Proben zu *exakt* den gleichen Zeitpunkten wieder zusammengefügt werden, zu denen sie entnommen wurden.

Jitter bedeutet nun, daß die Proben mal zu früh und mal zu spät wieder hintereinandergesetzt werden. Die Auswirkungen können verschieden sein. Ist das "mal zu früh, mal zu spät" zufällig, wird die Auswirkung ein erhöhtes Rauschen sein. Folgt es einer, wie auch immer gearteten, Zeitfunktion wird die Auswirkung eine Modulation des Originalsignals sein.

Jitter spielt nicht nur bei AD/DA-Wandlung eine Rolle (das Problem ist bekannt ziemlich genau seit es so etwas wie Digitalisierung gibt) sondern auch bei rein digitalen Systemen. Daher rührt meist auch das Verständnisproblem bei den Jitterauswirkungen der Digitalschnittstelle z.B. des CD-Spielers.

In der Norm ist ein recht großer Jitterwert (20ns) genannt, der zulässig ist, aber dieser Wert gilt nur für die Digitaleiseite, d.h. bis zu diesem Wert darf bei der Übertragung kein Datenfehler auftreten. Der Grenzwert für maximal zulässigen Jitter, der das Audiosignal qualitativ nicht beeinträchtigt, beträgt bei einem 16-Bit-System 110 - 130 ps (liegt also beinahe 2 Größenordnungen niedriger)

Zu 7. Zeitlicher Versatz

Wenn ein Gerät einen A/D und einen D/A-Wandler hat, dann ist das Ausgangssignal meistens gegenüber dem Eingangssignal zeitlich versetzt, weil in den Geräten oft die Zahlen als Folge von einzelnen Bits übertragen werden. Auch bei einem opt. Kabel zur Verbindung zweier Geräte werden die Zahlen bitweise seriell übertragen. Dann kann der Empfänger erst, wenn er alle 16 Bits bekommen hat, die analoge Spannung festlegen. Es gibt also einen kleinen zeitlichen Versatz. Je nachdem wie aufwendig der digitale Teil eines Geräts ist und welche Aufgabe er zu erfüllen hat, kann dieser zeitliche Versatz nur ein Sekundenbruchteil sein oder im Sekundenbereich liegen.

Weitere Überlegungen

24 Bit und höhere Abtastfrequenzen

Die obigen Beispiele basieren auf den 16 Bit und 44100 Samples/Sekunde/Kanal, also auf dem, was auf der CD drauf ist. Der technische Fortschritt hat es möglich gemacht, dass man jetzt problemlos mit 24 Bit und viel mehr als 44100 Samples/Sekunde digitalisieren kann. Das Problem dabei ist die anfallende Datenmenge.

CD: 74 Minuten brauchen ca. 780 MB (74 min *60 sec/min * 44100 Samples / sec *2 Bytes (je 8 Bit) * 2 Kanäle)

Bei einer Aufzeichnung von 24 Bit und 192 kHz benötigt man für 74 Minuten: $(74 \text{ min} * 60 \text{ sec/min} * 192000 \text{ Samples / sec} * 3 \text{ Bytes (je 8 Bit)} * 2 \text{ Kanäle}) = 5114880000 \text{ Byte} = 4,7 \text{ GB}$, das geht gerade noch auf eine DVD, aber mehr als 2 Kanäle wären dann nicht mehr möglich.

SACD und DVD-Audio

Bei beiden Formaten arbeiten die A/D und D/A-Wandler anders, bei SACD (DSD) wird mit sehr hohen Abtastfrequenzen aufgezeichnet, aber je gemessenem Wert wird nur gespeichert, ob der Wert sich um ein Bit vergrößert oder verkleinert hat. In regelmäßigen Abständen werden dann wieder komplette 24-Bit-Zahlen gespeichert, und ab da dann wieder nur die Veränderungen.

Bei DVD-Audio wird mit konventionellen A/D und D/A-Wandlern gearbeitet, so wie oben beschrieben. Hinsichtlich ihrer Genauigkeit sind beide ähnlich, wobei DVD-Audio flexibler ist, weil es da auch niedrigere Bitraten und Bitanzahlen gibt. Es kann da auf jedem Datenträger mehrere Verfahren geben, man kann sogar mitten im Titel auf ein anderes Verfahren umschalten, sofern es gerade verfügbar ist.

Wichtig ist es immer festzustellen, ob die Daten verlustlos komprimiert werden oder verlustbehaftet. Bei einer verlustlosen Komprimierung, so wie z.B. mit WinZip, kann man durch ein Auspacken (oder entkomprimieren) wieder exakt das ursprüngliche Signal herstellen. Bei verlustbehafteter Komprimierung geht das nicht. Der DVD-Video-Ton mit dts oder Dolby Digital ist verlustbehaftet komprimiert, der DVD-Audio und SACD-Ton ist unkomprimiert. Ein Kompromiss ist die verlustbehaftete Komprimierung mit MP3, dort wird aber nur das weggemacht, was man nicht hören kann, und je nach Komprimierungsgrad ist zu einer unkomprimierten Wiedergabe kaum ein Unterschied zu hören.

Interessant wäre es, wenn die Industrie eine verlustlose Komprimierung verwenden würde, was kein Problem wäre. WAV-Dateien in CD-Qualität lassen sich mit WinZip gut packen und auf weniger als 50 % verkleinern. Bitstream-Verfahren (wie SACD), nur eingeschränkt auf 20 Hz bis 20 kHz und 20 Bit wären realistischer und platzsparender.

Aber leider liegt das nicht im Interesse der Industrie, die eher bestrebt ist, möglichst un-kopierbare Formate zu erfinden.

Wieviel db ist ein Bit?

Welche Bitanzahl ist überhaupt noch sinnvoll? Wenn man die besten der aktuell verfügbaren Verstärker ansieht, dann werden dort Werte von z.B. 120 dB Rauschspannungsabstand angegeben. Bei 120 dB Nutzsignal ist das Rauschen dann genau 0 dB laut. Wie viele Bits bräuchte man, damit das Quantisierungsrauschen noch darunter liegt? Hier die Rechnung:

120 dB entsprechen einem Spannungsverhältnis von 1 zu einer Million.

$2 \text{ hoch } 20$ sind 1048576, also knapp über einer Million, und damit ist bei 20 Bit das Quantisierungsrauschen etwa gleich laut wie das Rauschen des Verstärkers. Da sind 24 Bit zwar ein bisschen zu hoch, aber 24 Bit sind ein leichter zu verarbeitender Wert in der Digitaltechnik als z.B. 21 Bit (um besser zu sein als 20 Bit).

Welche höchste Abtastfrequenz ist sinnvoll?

Für eine Abtastung der höchsten hörbaren Frequenz von 20 kHz braucht man eine Abtastfrequenz in doppelter Höhe, also von 40 kHz. Bei einem Bitstream-Verfahren (wie bei der SACD) würde für 20 kHz und 24 Bit und einem Pegel bei 20 kHz von maximal 5 % der Maximallautstärke eine Abtastfrequenz von ca. 96 kHz genügen.

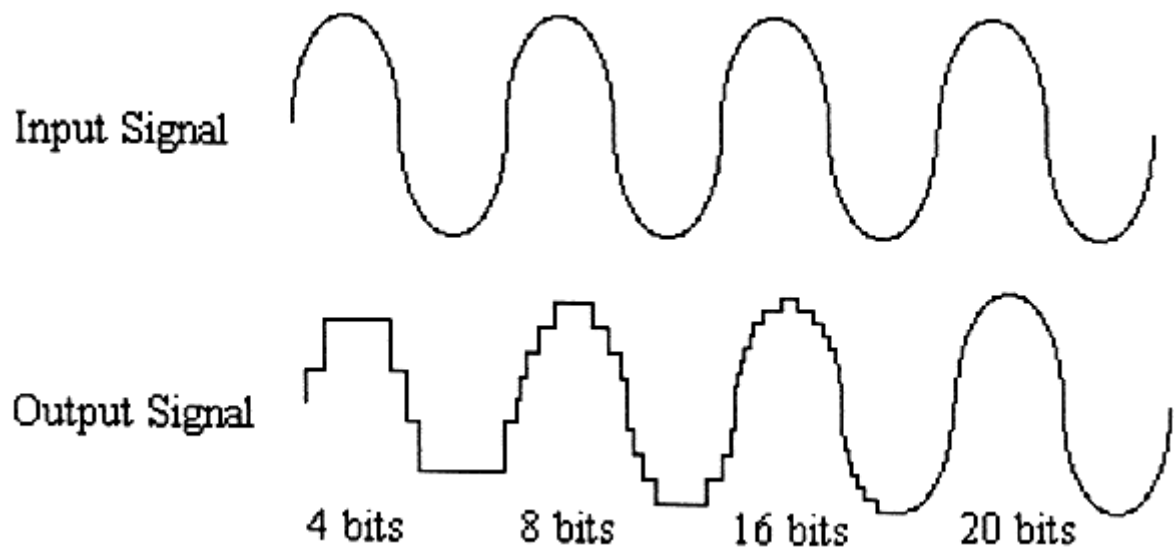
Ludwig van Beethoven

Ein Beispiel mit Ludwig van Beethoven für die Unfähigkeit der Industrie:

Eine Partitur einer Beethoven-Sinfonie mit ca. 100 Seiten für 30 Instrumente (ist eh schon digital): Die Noten, sie lassen sich als Text-Datei auf einige Kilobyte "komprimieren". Sogar die Technik zur Zeit des alten Ludwig war der heutigen Industrie schon meilenweit voraus! Das Ergebnis (ein Konzert) ist relativ flexibel und kann jederzeit beim Abspielen an den jeweiligen Zeitgeist angepasst werden. Nur die Kosten verhindern eine Aufführung im heimischen Wohnzimmer. Als DVD-Audio in kompromissloser Qualität bräuchte man alleine für den Ton einige Giga-Byte, vom Bild ganz zu schweigen.

Eine Meßgröße ist analog, wenn sie ihren Wertebereich kontinuierlich abdeckt, also unendlich fein abgestufte Werte annehmen kann. Alle meßbaren Dinge in der Natur, abgesehen von der Anzahl der Dinge, sind analog, z.B. der Farbton des Morgenrots, die Temperatur oder die Luftfeuchtigkeit. Die unendlich feine Abstufung analoger Signale ist in der Technik gleichzeitig Vor- und Nachteil. Sie ermöglicht relativ einfache Konstruktionen (z.B. Übertragung eines Telefongesprächs als analoge elektrische Spannung in einem Kupferdraht), aber genauso, wie ein Signal sehr feine Wertunterschiede annehmen kann, wird es auch unmerklich und ständig verfälscht werden...

Zusatz Brösel: Besonders pingelige Zeitgenossen werden entgegen: das ist alles falsch. Spannungen sind nicht analog, weil sie durch Elektronen/Protonen erzeugt werden, und dieses sind Teilchen, und damit nicht stufenlos. Allerdings braucht man $10 \text{ hoch } 24$ Elektronen für ein Ampere (oder so ähnlich)...



Wie man hier sehr schön sieht, ist das "analoge Input-Signal" schon stufig abgebildet, weil die Bildschirmauflösung das Bild nur so wiedergeben kann.