

20. TONMEISTERTAGUNG 1998

Zur Wahrnehmbarkeit von Impulsverzerrungen infolge einer 20 kHz oder 40 kHz Tiefpaßbegrenzung

Martin Link, Günther Theile (Institut für Rundfunktechnik, 80939 München)

Derzeit gibt es Bestrebungen, den bisherigen Abtastfrequenz-Standard für die digitale Tonaufnahme von 48 kHz auf mindestens die doppelte Frequenz zu erhöhen. Begründet wird dies in vielen Fällen damit, daß für impulshaltige Tonsignale die 20 kHz Bandbegrenzung die zeitliche Struktur wahrnehmbar verändern kann. Man nimmt an, daß der mit stationären Tonsignalen gemessene steile Anstieg der Ruhehörschwelle im Bereich von 20 kHz nicht unbedingt Rückschlüsse auf eine entsprechende Begrenzung des zeitlichen Auflösungsvermögens des Gehörs zuläßt, sondern daß die Wahrnehmbarkeit feiner Unterschiede im Zeitverlauf impulshafter Tonsignale auf besondere und dadurch extrem empfindliche Auswertungsmechanismen des Gehörs zurückzuführen ist. Mit einem Hörtest wurde diese These überprüft. Zwei Testsignaltypen wurden generiert, der erste impulshaft, der zweite quasistationär, jedoch beide mit identischem breitbandigem Spektrum. Beide Testsignaltypen wurden sowohl bei 20 kHz als auch bei 40 kHz tiefpaßbegrenzt. Für jedes Signalpaar wurde überprüft, ob die unterschiedlichen Tiefpaßbegrenzungen wahrnehmbar waren. Die Ergebnisse werden vorgestellt und diskutiert.

On the perceptibility of temporal distortion due to 20 kHz and 40 kHz low pass filtering

Martin Link, Günther Theile (Institut für Rundfunktechnik, 80939 München)

There are intentions to increase the sampling frequency from the digital recording standard of 48 kHz up to 96 kHz or more. It is argued that the 20 kHz low pass filter possibly might produce an audible modification of the temporal signal structure. The steep increase of the masking pattern in quiet in the 20 kHz area, which is retrieved only from stationary signals, might not be a limitation for the sensitivity for the temporal resolution of the human ear when signal pulses are heard. The process of listening could be more than just frequency analysis. This was subject of a special listening test. It consisted of a comparison of stationary signals to pulse signals presented through 20 kHz and 40 kHz low passes. The subjects should prove the audibility of differences for various couples of signals. The results of it will be shown and discussed.

Einleitung

Bis heute gilt allgemein, dass bei üblichen Abhörpegeln die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Gehöres auf etwa 20 kHz begrenzt ist. In Anlehnung daran wurden seinerzeit die Parameter für die digitale Audiotechnik festgelegt, damit keinerlei hörbare Signalveränderungen bei Aufnahmen oder Übertragungen entstehen. Trotzdem mehren sich Stimmen, die behaupten, dass durch die Digitalisierung bestimmte Feinheiten der Tondarbietungen verloren gehen. Früher mag dies an den Unzulänglichkeiten der damals schwer beherrschbaren Technik gelegen haben, wo kleinere Fehler in Wandlung und Bearbeitung (Berechnung) nicht erkannt bzw. nicht beachtet wurden.

Nachdem heute sogar jeder moderne Heim-PC mehr Rechenleistung bietet als die ersten digitalen Mischpulte, sind derartige Probleme heute kein Thema mehr. Inzwischen wird jedoch behauptet, dass die Beschneidung des Spektrums auf 20 kHz hörbar sei und sogar eine Beeinträchtigung der natürlichen Wiedergabe darstellen soll. Nachdem diese Aussagen aber bis jetzt nicht durch entsprechende Tests belegt sind, soll mit der hier vorgestellten Untersuchung zumindest eine Grundlage für die Klärung der Frage geschaffen werden, ob die Erhöhung der heute üblichen Abtastfrequenzen wahrnehmbar ist und ob sie Vorteile bringt.

Für die Auswahl der Hörbeispiele wurde also nicht die Häufigkeit der kritischen Fälle aus dem Gesamtangebot aller „in der Natur“ vorkommenden Schallereignisse berücksichtigt; vielmehr wurden die Testbeispiele regelrecht dahin ‚gezüchtet‘, mögliche Kandidaten für einen hörbaren Unterschied zu sein. Erst im Nachhinein soll dann deren Relevanz für eine Empfehlung für zukünftige digitale Audiosysteme betrachtet werden. Das Thema wurde bewusst erst einmal auf diese Weise aufgegriffen, indem ausschließlich die Unterscheidbarkeit zur erhöhten Abtastfrequenz ermittelt werden soll, ohne Rücksicht auf Klangästetik oder Bezug zur akustischen Erzeugbarkeit der Beispiele. Mit dieser Vorgehensweise soll sichergestellt werden, dass auch wirklich nur die Eigenheiten der untersuchten Abstraten ohne Verfälschungen durch das benutzte Equipment bis ans Ohr gelangen. Für eine spätere Entscheidung über die Einführung dieser hohen Abtastfrequenzen ist eine saubere Trennung zwischen prinzipiel-

len Unterscheidbarkeit, und ggf. der Bedeutung für die originalgetreue und klangästhetisch korrekte Reproduzierbarkeit von Schallereignissen notwendig. Nach den bisherigen Vergleichstests, in denen Tonaufnahmen allgemeiner Art verwendet wurden, soll der hier vorgestellte Test nur ein erster Schritt sein, um die Frage nach den Vorteilen einer Erhöhung der Abtastfrequenz zu klären.

Das menschliche Gehör

Die akustischen Eigenschaften des menschlichen Ohres werden durch seine spektrale Empfindlichkeit sowie mit dem Verdeckungseffekt beschrieben. Ersteres wird bekanntermaßen durch die sog. Ruhehörschwelle beschrieben, welche individuell verschieden ist. Der Verdeckungseffekt führt zu der sog. Mithörschwelle, welche die individuelle Frequenzempfindlichkeit in Anwesenheit eines bestimmten Schallereignisses für zusätzliche Töne darstellt. Bei der Ermittlung dieser Parameter standen stationäre, tonale Testsignale und schmalbandiges Rauschen im Vordergrund. Mit ähnlichen Signalen wurden auch die zeitlichen Maskierungseffekte entdeckt. Die Vorverdeckung bezeichnet die Maskierung eines leisen Schalles durch ein kurze Zeit später einsetzendes lauterer Signal. Sie erklärt sich aus der langsameren Verarbeitung von leisen Geräuschen im Gehirn. Der Zeitversatz für den Beginn beider Signale darf hierfür nicht größer als ca. 10 Millisekunden sein. Mit der Nachverdeckung wird die Rückkehr zur Ruhehörschwelle nach Ende eines maskierenden Schallereignisses bezeichnet. Sie liegt in der Größenordnung von über 100 Millisekunden.

Jedoch die Einflüsse auf die Hörbarkeit von impulsartigen Signalen werden durch diese allgemein bekannten Zusammenhänge nicht ausreichend beschrieben. Von den binauralen Ohrmodellen weiß man, dass zum Richtungshören Laufzeitunterschiede von weniger als 20 Mikrosekunden ausgewertet werden können. Gerade deshalb darf nicht von vorneherein die Möglichkeit ausgeschlossen werden, dass Feinstrukturen auch bei sehr kurzen Impulsen gehört werden. In Betracht kommen dabei so kurze Schallereignisse, bei denen weder ein Maskierungseffekt greift, noch der Hörvorgang über die Frequenzanalyse in der Cochlea stattfindet. Bezogen auf die zu untersuchenden Abtastfrequenzen gilt es zu klären, ob dazu 48 kHz ausreichen, um diese Feinstrukturen genau genug zu reproduzieren, oder ob das auf diese Abtastfrequenz zugeschnittene Anti-Aliasing-Filter keine hörbaren Veränderungen im zeitlichen Signalverlauf verursacht.

Dieses relativ steilflankige Tiefpassfilter bis 20 kHz mit einer Dauer der Impulsantwort im 1-ms-Bereich lässt die Möglichkeit offen, dass eine hörbare Veränderung auftreten kann. Die Länge der Impulsantwort liegt allerdings unter den bekannten Zeitfenstern von Vor- und Nachverdeckung des menschlichen Ohres. Da es aber noch keine allgemeingültigen Erkenntnisse über Verdeckungszeiten gibt, wenn der Maskierer, d.h. das Nutzsignal kürzer als 1 ms ist, kann nach dem heutigen Wissensstand die Wahrnehmbarkeit der Impulsantwort des Tiefpassfilters nicht ausgeschlossen werden.

Elektroakustische Wiedergabeeinrichtungen

Auf dem Gebiet der Verstärkertechnik stellt allein die spektrale Erweiterung auf ca. 40 kHz keinerlei Problem dar. Dies gilt auch insbesondere für die heutigen Digital-Analog-Wandler. Etwas kritischer sieht es bei den Mikrofonen und Lautsprechern aus, die in der Dimensionierung der zu Grunde gelegten Grenzfrequenz von etwa 20 kHz Rechnung tragen; eine gegebenenfalls nötige Weiterentwicklung dürfte aber kein unlösbares Problem darstellen.

Bei der Durchführung des vergleichenden Hörversuches treten Probleme auf, die beim üblichen Betrieb von hochwertigem Equipment nicht existieren. So beeinflussen sogar die geringen Klirrfaktoren von qualitativ hochwertigen Verstärkern den Vergleichstest. Im Normalfall liegen deren Störprodukte weit unter der Hörbarkeitsgrenze. Bei der 96-kHz-Technik sind natürlich auch im Bereich oberhalb von 20 kHz tonale Komponenten zugelassen, welche zu hörbaren, weil unmaskierten Störprodukten, z.B. in Form von Differenztönen führen können. Dieser Effekt ist z.B. aus der ungefilterten Wiedergabe eines Stereo-UKW-Signales bekannt, welches zusammen mit dem Hilfst Träger von 19 kHz ausgestrahlt wird.

Diese Untersuchung wäre schon sinnlos, wenn z.B. bei bei der maximal wiedergebbaren Lautstärke von über 100 dBA unhörbare, und deshalb auch nicht maskierende Töne zu einem Differenzton von nur 20 dBA führen würden. Aus diesem Grund war es z.B. nicht möglich, die Auswirkung derart hochfrequenter Töne auf irgendwelche Tonbeispiele zu untersuchen. Denkbar wäre die Verwendung von einem oder mehreren Zusatz-Lautsprechern, aus denen die an sich unhörbaren Sinustöne abgespielt werden, um deren Auswirkung auf das Schallergebnis zu erproben. Aus wissenschaftlicher Sicht wäre das bestimmt von Interesse, aber für die Erprobung von Aufnahme- und Wiedergabesystemen liegt das fern ab von jeder Realität. Durch die Auswahl der künstlich erzeugten Testsignalen war es möglich, derartige Artefakte

aus dem Vergleichstest weitgehend herauszuhalten. Bei natürlichen Aufnahmen wäre zumindest eine spektrale Analyse notwendig, um energiereiche Anteile im Bereich oberhalb von 20 kHz aufzuspüren und entsprechende Konsequenzen zu ziehen.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass die derzeit verwendeten Anti-Aliasing-Filter für 48 kHz Abtastfrequenz zwar bei den üblichen Einsatzfällen eine ausreichende Sperrdämpfung aufweisen, aber bei extremen, allerdings unrealistischen Eingangssignalen, wie der eben erwähnten Kombination, durchaus hörbare Spiegelfrequenzen produzieren können. Zudem ist auch der Durchlassbereich des Filters niemals so gerade, dass alles, was unterhalb von 20 kHz geschieht, völlig unverändert bleibt. Diese winzigen Abweichungen spielen normalerweise keine Rolle, sie können aber die Vergleichsergebnisse verfälschen.

Beachtung finden sollten auch frühere Versuchsergebnisse, nach denen Sinustöne oberhalb von 20 kHz bei extrem hohen Pegeln von einigen wenigen Personen gehört werden können. Allerdings stellt sich hier die Frage, ob solche künstlichen Szenarios, die wegen der Gefahr von entstehenden Differenztönen zumindest derzeit nur als "Solodarbietung" sauber reproduziert werden können, überhaupt berücksichtigt werden sollen. Ausserdem ist noch nirgends erklärt worden, ob dieser Personenkreis ihre hochfrequenten Wahrnehmungen überhaupt von derzeit reproduzierbaren Signalen im 20-kHz-Bereich unterscheiden können.

Eine Argumentation für die Erhöhung der Abtastfrequenz kann demnach nicht aus dem Bereich der Wiedergabe von tonalen Komponenten im erweiterten Frequenzbereich kommen. Desahalb soll das Schwerpunkt des hier vorgestellten Hörversuches nicht den spektralen Aspekten, sondern vielmehr der Feinstruktur von impulsförmigen Schallereignissen gelten. Ein wichtiges Element für die künstliche Erzeugung der möglichst kritischen Signale ist die digitale Repräsentation des Dirac-Impulses. Hier ist nur ein einziger Abtastwertwert angesteuert, in seiner Umgebung sind alle anderen Werte Null.

Auch hier werden die Grenzen der derzeit verfügbaren Wiedergabetechnik schnell erreicht, aber unter deren Berücksichtigung scheint es möglich zu sein, Tests in sinnvoller Form durchzuführen. Nachdem solch ein Pulssignal deutlich leiser erklingt als ein ähnlich angesteuerter Dauerton mit gleichem Spitzenwert, wird man zu schnell verführt, die Lautstärke anzupassen und möglicherweise den Verstärker bzw. Lautsprecher zu übersteuern. Bei der verdoppelten Abtastfrequenz von 96 kHz hat der Impuls von 1 Sample Breite nur noch die halbe Energie und fordert deshalb für ein vergleichbares Lautstärkeempfinden etwa die doppelte Aussteu-

Aussteuerungsreserve. Gerade im Vergleichstest ist die Verzerrungsfreiheit oberstes Gebot, denn sonst würden die Testpersonen die elektroakustischen Artefakte anstelle ihrer Hörfähigkeit bewerten.

Vergleicht man die Impulsantwort des Anti-Aliasing-Filters mit derjenigen eines Lautsprechers, so wird die Dimension deutlich, in welcher sich die Unterschiede abspielen. Nimmt man das Lautsprechersignal mit einem Mikrofon auf, so ist zu erkennen, dass die Impulsantwort eines Lautsprechers wesentlich mehr Verformungen bewirkt als der Tiefpass.

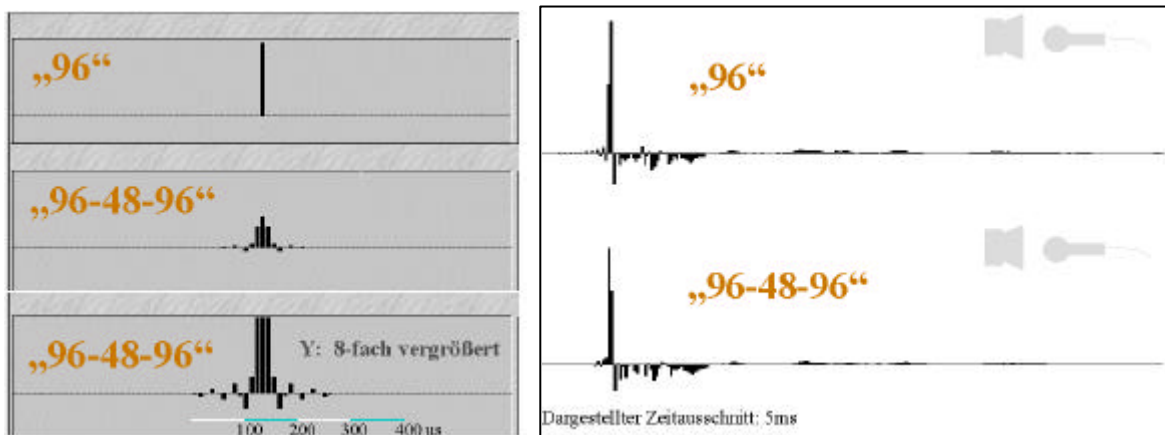


Abb.1 Unterschiede der Impulsantworten: direkter Vergleich – Vergleich nach Lautsprecherwiedergabe
Darstellung für System mit der kürzesten Impulsantwort (Manger-Wandler als Einwege-System)

Technisch gesehen ist dieser Hörtest eine Gratwanderung zwischen der zu erforschenden Hörbarkeit der Frequenzgangeinengung für die Abtastfrequenz von 48 kHz und der drohenden Artefakte, welche die spektrale Erweiterung mit sich bringt. Deshalb wird ein möglicher Schritt zu der erhöhten Abtastfrequenz mit erweitertem Spektrum eine ergänzende Spezifikation für Verstärker, Lautsprecher und Kopfhörer notwendig werden lassen.

Tonbeispiele

In Ergänzung zu anderen Untersuchungen werden hier vorwiegend künstlich erzeugte Signale verwendet. Nachdem hier weniger die stationäre Signale betrachtet werden können und sollen, kommen einzelne Pulse, sowie Pulsfolgen mit verschiedenen Wiederholraten zum Einsatz. Jedoch damit die Besonderheit der Impulssignale deutlich dargestellt werden konnte, wurden zum Vergleich auch Rauschsignale angeboten, deren Spektren an die Impulssignale angepasst waren. Mit den Beispielen „Spieluhr“ und „Kastagnette“ wurde für den Hörtest der

Bezug zu den natürlichen Schallereignissen hergestellt; das Kastagnetten-Beispiel wurde auch in einer verfremdeten Version ohne Raumanteil dargeboten. Beide Schallbeispiele wurde aus allernächster Nähe mit ¼ - Zoll Messmikrofonen Typ 4135 von Brüel&Kjaer aufgenommen.

Bei einigen Pulsfolgen wurden auch dreieck- bzw. e-funktionsförmige Impulse mit variierender Breite verwendet. Andere Beispiele wurden durch Schwebungseffekte bzgl. der Wiederholrate stereofon aufgefächert. Der Durchlassbereich des Anti-Aliasing-Filters war in der Gegend von 20 kHz leicht wellig und zeigte leichte Klangunterschiede bei weißem Rauschen. Diese waren aber nicht signifikant. Deshalb lag es nahe, den Frequenzgang im Durchlassbereich des Anti-Aliasing-Filters leicht nachzuentzerren. Der Einfluss dieser Maßnahme wurde für eine der Pulsfolgen, sowie für das weisse Rauschen genauer betrachtet. Nachdem sie bei den Pulsfolgen zu deutlicheren Klangabweichungen führte, wurde bei den übrigen Beispielen darauf verzichtet.

Nachdem bei Impulsen, die außer einzelnen ausgesteuerten Abtastwerten in einer Umgebung von Nullwerten bestehen, die Unterschiede hörbar sind, muss man sich im Klaren darüber sein, dass diese nicht der Realität der digitalen Aufnahmetechnik entsprechen. Auch ein 96-kHz-A/D- bzw. D/A-Wandler benötigt Anti-Aliasing-Filter, deren Impulsantwort solche

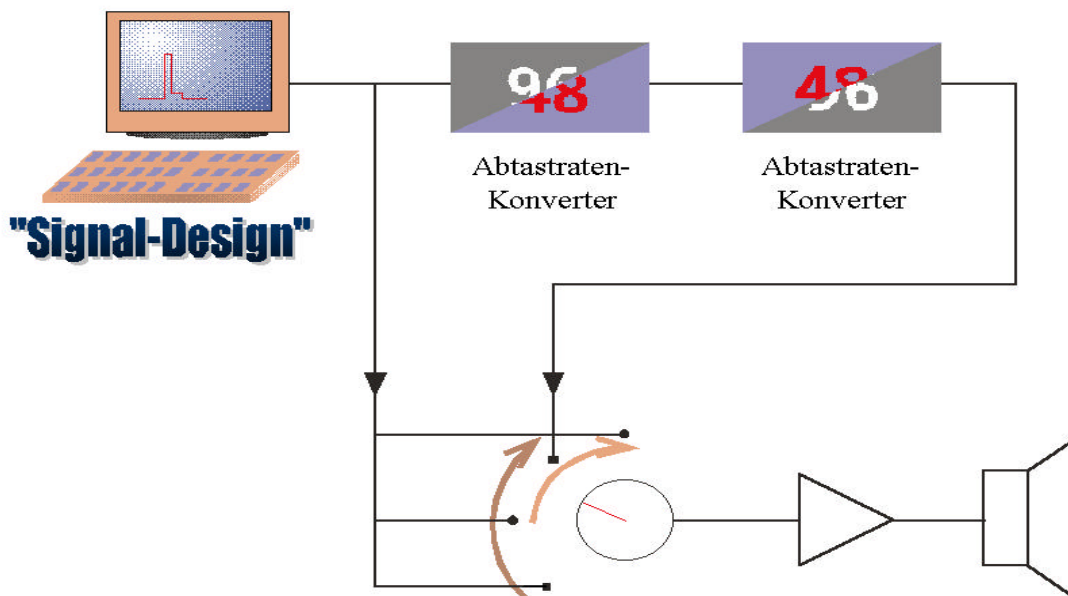


Abb.2 Schematische Darstellung der Versuchsanordnung

Einzelpulse, die am Computer entworfen wurden, niemals zulässt. Daraus ergibt sich, dass in diesem Hörtest nicht die Filterartefakte zwischen der 96-kHz-Technik und der 48-kHz-Technik verglichen werden, sondern – zumindest aufnahmeseitig – das Anti-Aliasing-Filter

der 48-kHz-Technik gegen eine Aufnahme ohne Filterung verglichen wird. Dies wird aber der Absicht dieser Untersuchung in vollem Umfang gerecht. Bei der Wiedergabe ist natürlich stets das Anti-Aliasing-Filter im 96-kHz-D/A-Wandler vorhanden.

Versuchsanordnung

Um bei der Frage nach jeglicher Art von gehörter Unterschieden möglichst wenige Fehlerquellen zu haben, wurden alle Beispiele über ein und denselben D/A-Wandler abgespielt. Zu diesem Zweck wurden die Signale mit 48 kHz Abtastfrequenz vor der Wiedergabe auf 96 kHz gewandelt. Das bedeutet, dass diese Signale das 20-kHz-Tiefpassfilter ein zweites Mal durchlaufen wurde; dies entspricht aber genau der Situation in einem herkömmlichen digitalen Studio, wo je aufnahme- und wiedergabeseitig ein Anti-Aliasing Filter vorhanden ist.

Das größte Problem schien in der Auswahl der Lautsprecher bzw. Kopfhörer zu liegen, weil es auf diesem Gebiet noch keine für unseren Zweck erprobten Exemplare gibt. Zum Einsatz gelangte zum einen der Manger-Wandler, ein bezüglich Impulstreue optimiertes Lautsprechersystem, was für diese Testreihe eine gute Voraussetzung ist. Zum anderen wurde eine extra für HD-Audio neu entwickelte Drei-Wege-Box von Klaus Faika mit einbezogen, welche schon bei ähnlichen Untersuchungen mit Musikbeispielen an der Fachhochschule Düsseldorf verwendet wurde. Frequenzgangmessungen zeigten, dass neben diesen Systemen der im Rundfunk stark verbreitete Studio-Lautsprecher o-98 von Klein&Hummel für den Test gut geeignet war. Als vierte Variante wurde der Kopfhörer Lambda-Pro von Stax gewählt, allerdings bei abgeschalteter Diffusfeld-Entzerrung. Diese wäre der getreuen Impulswiedergabe in diesem Fall nicht dienlich, und eine Anpassung an das natürliche Klangbild durch gemittelte Außenohr-Übertragungsfunktionen ist bei den verwendeten Signalformen nicht notwendig.

Die Tests wurden im Vorführstudio des IRT durchgeführt. Mit einer mittleren Nachhallzeit von nur 0.26 Sekunden war dieser Raum bestens geeignet. Die Testperson konnte sich über eine Gegensprechanlage mit dem Versuchsleiter unterhalten; während der Darbietung der einzelnen Signale wurde der Sprechweg zur Testperson hin ausgeschaltet, um Nebengeräusche zu vermeiden. Abweichend von der üblichen Aufstellung für Nearfield Stereo wurde der Öffnungswinkel von 60° auf über 120° erweitert, um eine bessere Kanaltrennung an den Ohren zu erreichen. Die PegelEinstellung war fest vorgegeben, weil die Gefahr bestand, dass die

Versuchspersonen die maximal zulässige Aussteuerung bei einigen leise erklingenden Beispielen überschreiten könnten. Bei allen verwendeten Lautsprechern wurde darauf geachtet, dass sich die Ohren in der Hauptabstrahlrichtung befanden.

Der D/A-Wandler befand sich direkt bei den Endstufen bzw. Aktivboxen, um auch hier jegliche Fehlerquellen auszuschließen. Die Hörbeispiele wurden im Nebenraum mit Hilfe eines Audio-Editing-Programmes direkt aus einem PC abgespielt.

Versuchsdurchführung

Die gut 20 Testpersonen waren teils geübte Hörer aus dem Bereich Tontechnik und Entwicklung, sowie Personen aus fachfremden Bereichen. Unter Vorwegnahme der Ergebnisse war festzustellen, dass sich die beiden Personengruppen durch ihre Antworten nicht erkennbar unterschieden. Die Kandidaten nahmen einzeln an den Tests teil, um unter optimalen Hörbedingungen und bei individueller Arbeitsgeschwindigkeit urteilen zu können.

Die Testbeispiele waren als „Hidden-Reference“-Folgen angeordnet, wobei das 96-kHz-Signal zum Referenzsignal erklärt worden war. Hierbei erschien als erstes das Referenzsignal, dann das Vergleichspaar mit Referenz- und Testsignal. Die Versuchspersonen hörten also jedes Beispiel drei mal, wobei entweder das mittlere oder das hintere Beispiel die 48-kHz-Version war. Zwischen diese beiden Möglichkeiten wurde nach dem Zufallsprinzip gewechselt. Diese Signal-Triples wurden dann einige Male wiederholt. Die einzelnen Signale dauerten je etwa ein bis zwei Sekunden; die Wiederholungen der Dreier-Sequenzen wurden durch längere Pausen von ca. zwei Sekunden abgesetzt. Wenn der Proband unsicher war, wurde auf dessen Wunsch das Vergleichspaar umgedreht. Bei diesem doch sehr schwierigen Hörtest hatte er so die Möglichkeit, sein vermutetes Testsignal innerhalb des Triples zu „verfolgen“, was viele Testpersonen als Erleichterung zur Entscheidungsfindung sahen. Sie sollten angeben, ob eines der beiden in Frage kommenden Beispiele in irgendeiner Form anders klingt als die Referenz. Eine Wertung, wie etwa die Bevorzugung einer der beiden Varianten wurde nicht protokolliert. Abgesehen von der Hörbarkeit der Unterschiede taten sich die meisten Teilnehmer schon mit der Beschreibung der gehörten Abweichung schwer; gelegentlich fielen Bezeichnungen wie „schärfer“, „angenehmer“, „andere Klangfarbe“, „runderer Klang“ und ähnliches. Eine Bevorzugung einer der Aufnahmetechniken war darin nicht zu erkennen. Dies ist gerade deshalb bemerkenswert, weil die Testpersonen wussten, dass jedes Triple mit der

Abtastfrequenz 96 kHz beginnt. Personen, die anscheinend öfter geraten haben, machten selten derartige beschreibende Angaben.

Am Platz des Testleiters wurden die Signal-Triple, aber auch die Reihenfolge der individuellen Testsignal jedesmal neu nach dem Zufallsprinzip ausgewählt und abgespielt. Über die Gegensprechanlage konnte die Testperson jederzeit eine Antwort geben oder den Tausch der beiden hinteren Signale im Triple fordern. Für die Antworten war kein Zeitlimit vorgesehen, sodass die Entscheidungen ohne Stress möglich waren.

Die Testpersonen benötigten für die Bewertung der 17 angebotenen Vergleichstriple die Zeit von 12 bis 20 Minuten. Dies bezieht sich auf jeden der vier Durchgänge mit den verschiedenen Lautsprechern bzw. Kopfhörern.

Auswertungsmethode

Die Antworten der Versuchsteilnehmer bestanden aus den drei Möglichkeiten „das mittlere Signal klingt anders“, „das hintere Signal klingt anders“ und „kein Unterschied gehört“. Daraus wurden – geordnet nach Klangbeispielen und Wiedergabesystemen – Tabellen erstellt, die nun aus den Interpretationen „‘B’ klingt anders als ‘A’ (richtig)“, „‘A’ klingt anders als ‘A’ (falsch)“ und „keinen Unterschied erkannt“ bestehen. Der wertende Begriffe „falsch“ ist hier angebracht, weil er sich auf den angegebenen Klangunterschied zwischen zwei identischen Proben bezieht. Die Kandidaten waren gebeten, nur dann die Wertung „erkannt“ abzugeben, wenn sie sich ihrer Sache einigermaßen sicher waren. Es war demnach möglich, daß einige Testpersonen bei keinem Beispiel einen Unterschied angegeben haben.

Im Fall der sog. „Forced Choice“-Methode wären alle Teilnehmer gezwungen gewesen, sich für eine der beiden Möglichkeiten zu entscheiden. Umgekehrt ließ es sich nicht vermeiden, dass einige Personen sich trotz der Hinweise zum Versuchsablauf wie „Forced Choice“-Kandidaten verhielten und eher zum Raten neigten als auch zu sagen, dass sie keinen Unterschied wahrnehmen konnten. Sie gaben deshalb oft die Wertung Unterschied „erkannt“ ab, und trafen damit aber schlimmstenfalls zu 50% das falsche Signal, also die Referenz.

Bei der Bewertung der Antworten hat natürlich die innere Schwelle, ab der sich eine Versuchsperson für eines der beiden Signalbeispiele entscheidet, eine große Bedeutung. Von dieser nicht erfassbaren Größe hängt die Bedeutung des Verhältnisses der richtigen und falschen

„erkannt“ - Wertungen zu den „nicht erkannt“ - Wertungen ab. Die eigentliche Frage gilt natürlich der Aussage, die sich aus dem Verhältnis der richtigen zu den falschen „erkannt“ - Antworten machen lässt. Je größer die Gesamtzahl der abgegebenen Antworten ist, so unwahrscheinlicher ist es, dass ein bestimmtes Verhältnis von richtigen zu falschen Antworten nur das Ergebnis eines Zufallsprozesses ist. Für das Ergebnis spielen diejenigen pulsformigen Testsignale eine Rolle, die – neben den angebotenen stationären Klängen und aufgenommenen Beispielen – extra für das Hören von Unterschieden optimiert wurden.

Versuchsergebnis

Schon bei der Gesamtauswertung für alle Wiedergabesysteme und Testsignale ist eine leichte Tendenz zur Hörbarkeit der Unterschiede zu erkennen. Mit 230 richtigen zu 137 falschen Antworten und 354 Angaben „kein Unterschied“ ergibt sich ein Verhältnis von 1.7. Sinnvollerweise dürfen aber nur die optimierten Beispiele zur Versuchsauswertung herangezogen werden. Mit ihnen ergibt sich das Verhältnis zu 2.2 (169/78, kein U.: 216). Die deutlichste Tendenz dieser Auswahl für die einzelnen Lautsprecher ergab sich zu 3.2 (68/21, kein U.: 65) für den als Einwege-System betriebenen Manger-Wandler. Während der Studio-Lautsprecher sowie der Kopfhörer nur den Wert 1.6 „schafften“, kam der in Düsseldorf verwendete Prototyp auf das Verhältnis 2.2. Ob diese Resultate eine Wertung der beteiligten Systeme darstellen, soll dem Leser überlassen werden.

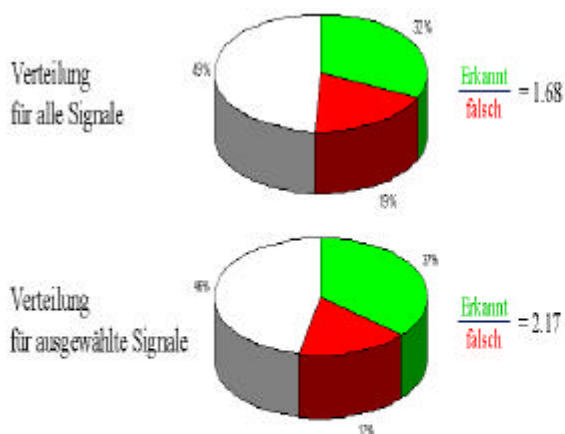


Abb.3 Verteilung der Antworten für alle, bzw. die impulshaften Signale

Wie schon erwähnt, war keine Bevorzugung einer Abtastfrequenz erkennbar. Während in den meisten Fällen die Konzentration der Testpersonen im Vordergrund stand und deshalb keine Priorität angegeben wurde, beschrieben einige Teilnehmer den gehörten Unterschied. Allerdings konnte daraus fast nie eine Wertung abgeleitet werden.

Ferner zeigte sich ein Lerneffekt, d.h. die Teilnehmer haben sich auf die Unterschiede eingehört. Dies zeigte sich an den beiden Pulssignalen, die im Verlauf der zufällig angeordneten Reihenfolge aller Beispiele doppelt vorgesehen waren. Die Antworten für die Wiederholungen wurden mit der entsprechenden Kennzeichnung notiert. In der Auswertung traten bei diesen wiederholten Triplen deutlich mehr richtige Antworten auf als bei der erstmaligen Bewertung dieser Testschalle.

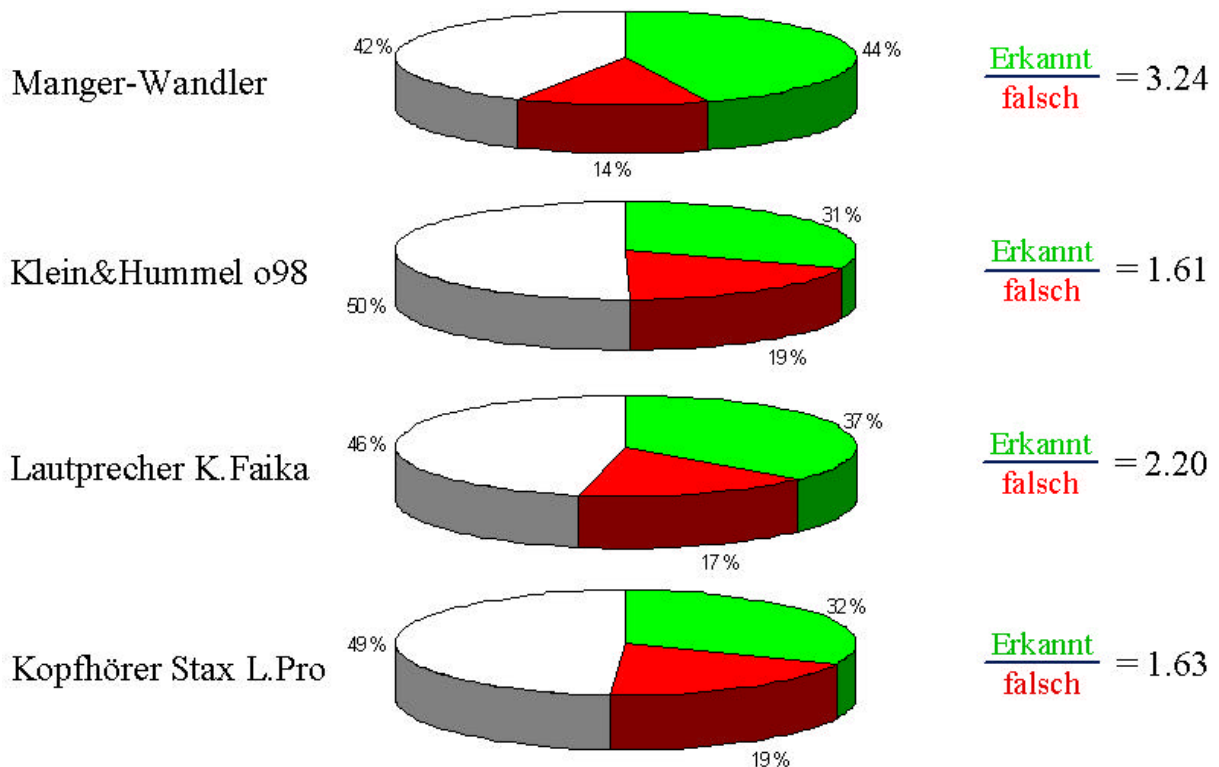


Abb.4 Verteilung der Antworten für die einzelnen Wiedergabe-Systeme

Bedeutung des Ergebnisses

Mit geeigneten Testmustern kann ein Klangunterschied im Vergleich zur erhöhten Abtastfrequenz hörbar werden. Interessant wäre hier noch herauszufinden, in wie weit mit leichten Eingriffen in den Frequenzgang bis 20 kHz Klangeindrücke, die denen bei Erhöhung der Ab-

tastfrequenz gleichen, erzielt werden können, ohne dabei die 48 kHz verlassen zu müssen. Dies würde dann gegen den Mehraufwand der verdoppelten Abtastfrequenz sprechen. Die Wahl der Testsignale geschah ohne Rücksicht darauf, ob dergleichen in der Realität der Aufnahmepraxis oder synthetischen Musik überhaupt vorkommt. Sie sollte ein bißchen die Leute ansprechen, die allein aufgrund der Erkenntnis, dass irgendwann ein Unterschied hörbar wird, für die erhöhte Abtastfrequenz argumentieren. Nachdem sogar in diesem Test ein „Restrisiko“ existierte, auch Wiedergabeartefakte anstatt Hörfähigkeiten zu ermitteln, sollte erst nach weiterführenden Untersuchungen die Frage, ob die Erhöhung der Abtastfrequenz empfohlen werden kann, beantwortet werden. Es bleibt zu klären, ob diese Maßnahme zu einer natürlicheren Wiedergabe in der digitalen Audiotechnik führt. Allein mit dem positiven Ausgang des Hörversuches kann diese Frage noch nicht beantwortet werden.