oicable®

» Jenseits von 0 dBFS «

Oder, wie man zuverlässig D/A-Wandler übersteuert ...

von Fritz Fey (Studio-Magazin)

technical.paper

Jenseits von 0dBFS – Oder, wie man zuverlässig D/A-Wandler übersteuert

von Fritz Fey (Studio-Magazin)

Genügen moderne CD-Produktionen heutigen Anforderungen an eine verzerrungsfreie Wiedergabe?

»Mastering in der Musikproduktion nimmt heute zunehmend den Charakter einer permanenten Schlacht um das lauteste Programm an, anstatt – wie ursprünglich beabsichtigt – eine Herausforderung zu sein, musikalische und technische Qualität zu erhalten, zu unterstützen und möglichst auch noch zu steigern. Viele Experten kommen daher zu der Ansicht, dass die bestklingenden Produktionen im Bereich der Pop- und Rockmusik zwischen 1982 und 1995 veröffentlicht wurden, und nicht etwa in den letzten Monaten bis heute, wie man annehmen sollte. Trotz höherer Wandlerauflösung, geringerem Jitter, DSP-Akrobatik und wahrscheinlich auch einem besseren generellen Verständnis der Digitaltechnik scheinen wir uns in diesen Tagen eher auf einer fallenden Qualitätskurve zu bewegen. Haben wir etwas Wichtiges übersehen? Ist es das bedingungslose Streben nach immer lauter klingenden CDs und Radioprogrammen, liegt es am zunehmenden Einsatz so genannten semiprofessionellen Equipments von schlecht ausgebildeten Anwendern?

Die meisten Heim-CD-Player, Abtastratenwandler, digitalen Audioworkstations und Mischpulte wurden nicht gebaut, Pegel jenseits von 0 dBFS zu verarbeiten, ohne dabei nennenswerte Verzerrungen [wirklich nennenswerte von bis zu 10 Prozent] zu erzeugen. Dieses Phänomen ist so offensichtlich in seiner die Audioqualität zerstörenden Wirkung, das daneben höhere Auflösungen als 16 Bit, höhere Abtastraten als 44.1 kHz, hochwertige Kabel und andere die Audioqualität bestimmende Elemente vergleichsweise bedeutungslos aussehen, bevor nicht das in diesem Beitrag behandelte Problem beseitigt ist.

Selbstverständlich habe nicht etwa ich dieses Problem entdeckt, sondern ich bin darauf in Zusammenhang mit dem Intersample Peaklimiter des TC System 6000 gekommen. Wieso »Intersample« und warum

existieren Peaks zwischen den Samples? Da ich kein Ingenieur und schon gar kein Wissenschaftler bin, habe ich mich der Expertenunterstützung von Thomas Lund, Entwickler bei TC Electronic, versichert, der sich schon lange mit dieser Thematik beschäftigt und mir selbst die Aufgabe gestellt, den Sachverhalt in für einen normal begabten Mitteleuropäer verständlicher Darstellung aufzuarbeiten.

Wie man digitalen Pegel misst

Beim Mastering ist es gängige Praxis eine Mixtur aus analogen und digitalen Pegelinstrumenten zu verwenden, wobei letztere oft einen Zählmechanismus für aufeinander folgende Samples bei 0 dBFS beinhalten, der in der Regel bei drei oder fünf Vertretern dieser Gattung beschließt, eine rote Overload-LED zum Leuchten zu bringen, obwohl ja vielleicht gar keine Übersteuerung im eigentlichen Sinne vorhanden ist, sondern lediglich die Vermutung nahe liegt, dass eine solche wohl unmittelbar im Anmarsch ist. Erst recht nicht geeignet ist diese Meßmethode für die Aufdeckung von »0 dBFS+« – Pegeln, also Pegeln oberhalb von 0 dBFS.

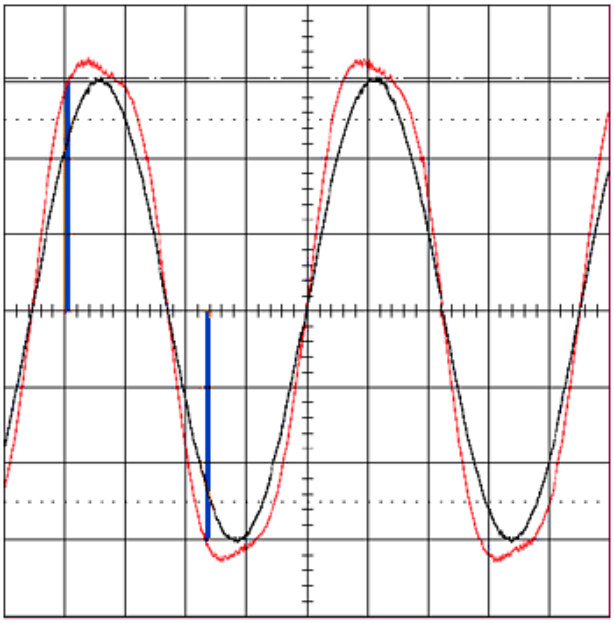

Fig1 – Pegelunterschiede durch Variation der Startphase des Sinus-Testsignals um 45Grad [schwarz: 90Grad, 0dBFS]

Bekanntlich zeigen analoge Peakmeter oder auch Spitzenpegel-Aussteuerungsinstrumente [jetzt wissen Sie, warum ich lieber »Peakmeter« sage...] aufgrund ihrer Integrationszeiten Pegelspitzen nicht in vollem Umfang an. Einfach gesprochen ist ihr Reaktionsvermögen zu langsam. Die gilt insbesondere für VU-Meter, die aufgrund der Trägheit des Zeigers überhaupt keine Transienteninhalte eines Audioprogramms erfassen können. Nun ja, sie wurden vor langer Zeit vor dem Hintergrund analoger Signalwege mit zum Teil erheblichen Übersteuerungsreserven und der Bandsättigung von Magnetband-Maschinen entwickelt. Was sollte da schon großartig passieren?

In der digitalen Welt rasen Hunderte von Samples an analogen Peak- oder VU-Metern vorbei, ohne dass ihr realer Pegel angezeigt würde, doch kann eine digitale

Übersteuerung bekanntlich sehr unangenehme Auswirkungen haben. Dann allerdings sprechen wir von einer echten Übersteuerung, die durch Unachtsamkeit oder überraschend aufgetretene Pegelspitzen entsteht und sogleich auffällige Störgeräusche verursacht. Erfahrungsgemäß zeigen daher digitale Aussteuerungsinstrumente einen 3 bis 5 dB höheren Pegel als analoge Peakmeter und etwa 16 bis 20 dB mehr als VU-Meter an.
Doch selbst digitale Peakmeter erfassen nicht den echten Spitzenwert, den ein D/A- oder Abtastratenwandler bisweilen reproduzieren muss. Diese messen nämlich zumeist den Pegel auf einer Sample-zu-Sample-Basis, so dass ein Mastering-Ingenieur meist nicht ahnt, welche Anforderungen er an das Wiedergabe- Equipment tatsächlich stellt. Die Verzerrungen, die beim Abspielen moderner CDs mit modernen CD-Playern entstehen, liegen oft in der Größenordnung von 10 Prozent für die Dauer der Transienten, weshalb sich vielleicht auch erklärt, wieso manche CDs auf dem einen CD-Player ganz schrecklich und auf einem anderen recht passabel bis deutlich besser klingen, ohne dass man sagen könnte, woran es denn eigentlich liegt. Zeitgenössische Pop-Produktionen enthalten so viele Peaks, dass der arme Heim-CD-Player nur noch selten aus der Verzerrung herauskommt. Erstaunlicherweise kommen besonders ältere CD-Player aufgrund ihres [analogen] Filterdesigns besser mit 0 dBFS+ Pegeln zurecht. Doch davon später mehr...

0 dBFS plus

In der digitalen Ebene kann der Spitzenpegel von dem in der analogen Ebene abweichen, und zwar aus zwei Gründen. Die Abtastung eines analogen Signals erfolgt, wie wir gelernt haben, in regelmäßigen Intervallen.

Bei Frequenzen nahe des ganzzahlig teilbaren Bezugs zur Abtastrate, also zum Beispiel fs/4 = 11.025 Hz, kann die Phase des Signals verglichen mit dem Abtastintervall für einen Spitzenpegel nennenswert unterhalb des analogen Spitzenwertes verantwortlich sein. Je näher sich die abzubildende Frequenz diesem Punkt [in unserem Beispiel 11.025 Hz] nähert, desto exakter wird der analoge Spitzenpegel dargestellt.

In der Praxis richten sich musikalische Transienten selten nach dem Abtasttiming und müssen daher auch sehr häufig vom D/A-Wandler mit beträchtlich höherem Pegel rekonstruiert werden, da ihre eigentlichen Spitzen möglicherweise zeitlich nicht synchron zum Abtastin-

tervall liegen. Da diese Rekonstruktion auf Spitzenpegelinhalte zwischen den Samples zurückzuführen ist, erklärt sich nun auch der Begriff »Intersample Peaks«.

Der zweite Grund für das Entstehen von Pegeln oberhalb 0 dBFS basiert auf der Struktur von Rechtecksignalen, die in der Praxis auch durch Clipping [Abschneiden] von Signalspitzen besonders in der digitalen Ebene entstehen.

Viele moderne Pop-Produktionen beinhalten durch den Einsatz, oder besser Missbrauch von Softlimitern, Clippern und anderen die Lautheit fördernden Hilfsmitteln zahllose Signalstrukturen mit flach abgeschnittener Spitze. Ein Rechtecksignal kann als Summe individueller Sinuswellen betrachtet werden, die sich aus Frequenzen des Ein-, Drei-, Fünf- oder Mehrfachen der Grundfrequenz zusammensetzt. Das »Flachdach« des Rechtecks hängt von der Anwesenheit aller Harmonischen mit richtigen Pegeln und Phasenlagen ab. Wenn einige dieser Harmonischen durch Tiefpassfilterung entfernt werden, steigt der Signalspitzenpegel an. Da bei der Digital/Analog- Wandlung immer ein Tiefpassfilter eingesetzt wird, kann der analoge Pegel aus diesem Grunde höher als erwartet ausfallen.

Das Dilemma

Es wäre zu viel verlangt, das Verhalten ausnahmslos aller digitalen Bearbeitungsprozesse zu untersuchen, die eine Intersample- Pegelberechnung vornehmen, doch könnten neben D/A-Wandlern viele Komponenten der digitalen Audio-Signalkette von 0 dBFS+ Pegeln betroffen sein, zum Beispiel Filter, asynchrone und synchrone Abtastratenwandler oder Datenkompressions- und Datenexpansionsstufen. Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen, die Thomas Lund durchführte, richtete sich auf Consumer-CD-Player und damit auf die Auswirkungen in D/AWandlern.

Der einfachste D/A-Wandler-Typ, der jedoch kaum in modernen CD-Playern verwendet werden dürfte, hat einen Vorteil, wenn es um die Verarbeitung hoher Pegel geht. Das Signal wird ohne Filterung auf der digitalen Ebene im D/A-Chip mit der einfachen Abtastrate gewandelt.

Ein aktives, analoges Rekonstruktionsfilter läuft oft mit einer +/–15 Volt Spannungsversorgung, die in der Regel ausreichend analoge Übersteuerungsreserve zur Verfügung stellt.

Viele frühe D/Adesigns verwenden niedrige Oversampling- Faktoren von 2, 4 oder 8, kombiniert mit einem digitalen Rekonstruktionsfilter, bevor die Samples mit dieser höheren Rate durch einen konventionellen D/A-Chip gewandelt werden. Auf der analogen Seite bedämpft ein einfaches Filter Spiegelfrequenzen im Bereich der durch den Oversampling-Faktor bestimmten Nyquist-Frequenz.

Ein moderner D/A-Wandler besteht typischerweise aus einem integrierten Chip mit sehr hoher Oversampling-Rate und einem eingebauten digitalen Rekonstruktionsfilter. Auch bei diesem Wandlertyp entfernt ein einfaches analoges Filter Spiegelfrequenzen am Ausgang.

Zu den Verursachern von Verzerrungen und Clipping im D/A-Wandlungsprozess und dem nachfolgenden analogen Signalpfad gehören demnach zusammengefasst digitale Filter vor dem D/A-Wandler, der D/A-Wandler- Chip und speziell seine Ausgangsstufe, analoges Gain-Staging hinter dem Wandler, integriert Verstärkungsregelstufen oder die analoge Ausgangsstufe, wenn sie durch eine niedrige Versorgungsspannung in ihrer Pegelverträglichkeit limitiert ist.

Der Test

Um Intersample Peaks mit kalkulierbarem 0 dBFS+ Pegel in einer Testreihe mit sieben verschiedenen CD-Playern zu erzeugen, wurden vier Sinustöne mit bestimmten Frequenzen erzeugt. Drei der Töne entsprachen dem ganzzahligen Teil der Abtastfrequenz von 44.1 kHz [5.512,5 Hz, 7.350 Hz und 11.025 Hz], während einer mit 997Hz keinen einfachen Bezug zur Abtastrate hatte und damit geeignet war, exakt 0 dBFS zu generieren.

Um die Beschreibung des Test-Aufbaus nicht zu unübersichtlich zu machen, seien die Versuche mit speziellen Rechtecksignalen hier nicht weiter erwähnt. Durch Variierung der Startphase der Sinustöne wurden Pegel von +0.69 dBFS, +1.25 dBFS und +3.0 dBFS generiert und von einer CD auf den Playern abgespielt. Die Verzerrungsmessung erfolgte mit einer Bandbreite von 20 Hz bis 80 kHz. Bei 0 dBFS lieferten die Test-

player Verzerrungswerte im Bereich von rund –58 bis –82 dB. Bei +0.69 dBFS rutschten die Ergebnisse bereits auf –30 bis –65 dB ab. Bei +1.25 dBFS wurde das Testteam bereit mit Werten von –24 bis –59 dB konfrontiert und bei +3.0 dBFS schließlich brachen alle Geätetestkandidaten mit –17 bis –29 dB endgültig zusammen.

Interessanterweise schnitt ein Player-Modell älteren Datums mit einem sehr einfachen Wandler mit analogem Rekonstruktionsfilter am besten ab [siehe vorheriger Abschnitt]. Dieser Player erreichte konstant den jeweils besten genannten Verzerrungswert, während die anderen Player-Modelle durchweg namhafter Hersteller mehr oder weniger gemeinschaftlich am schlechteren Ende der Skala landeten.

Eigene Versuche

So ganz ohne Eigenuntermauerung des bislang beschriebenen Sachverhaltes wollte ich natürlich auch nicht dastehen und habe mich daher für zwei, drei Stunden ins Studio gesetzt, um eine ganze Reihe moderner Pop-Produktionen hinsichtlich ihrer Spitzenpegel zu untersuchen. Als Werkzeug diente mir dabei der Brickwall-Limiter [Intersample Peaklimiter] unseres TC S6000, den ich seither aus gutem Grund konsequent bei jedem Stereo-Mastering einsetze. Dieses Software-Modul ist in der Lage, eingangs- und ausgangsseitig Pegel bis hinauf zu +3 dBFS zuverlässig anzuzeigen, in dem auch rekonstruierte Intersample Peaks Berücksichtigung finden, und schließlich auch sauber auf exakt 0 dBFS zu begrenzen. Ich habe rund zehn Pop-CDs wahllos ausgesucht und gemessen.

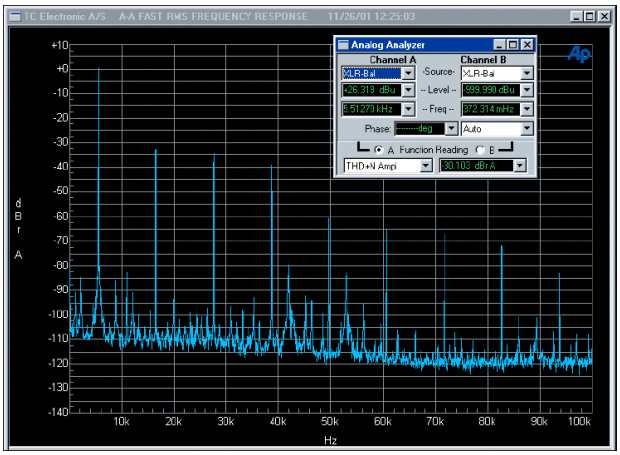

Fig2 – Klirrmessung eines digitalen Mischpultkanals bei +0.69 dBFS [!]. Das Resultat sind nur –35 bis –40dB Klirrdämpfung für k3, k5, k7.

Und ich sage Ihnen, es war keine einzige dabei [!], bei der ich nicht Pegel zwischen +1 und +3 dBFS gesehen hätte. Dies bedeutet, dass alle gemessenen Produktionen, wohlgemerkt aus der Hand amtlicher Mastering-Studios, auf beliebigen Playern zum Teil massive Transientenverzerrungen erzeugen, was mit einem CD-Player- abhängigen Klangverhalten einhergeht, das jeweils mehr oder weniger schlecht, aber selten richtig gut

ausfallen dürfte. Der gleiche Versuch diente mir auch dazu, ein wenig über die Anwesenheit von Dynamik in Pop-Produktionen dazu zu lernen, doch hielt sich mein Erfolg in bescheidenen Grenzen. Der überwiegende Teil der CD-Produktionen zeichnet sich durch massive Begrenzung und Kompression aus, so lange, bis sich kein Peakmeter mehr nennenswert bewegt, selbst bei getragenen Pop-Balladen.

Nebenbei musste ich mich darüber wundern, wie es dem deutschen Rundfunk gelingt, ganz gleich, ob öffentlich-rechtlich oder privat, diese schon kaum noch vorhandene Dynamik noch deutlich zu reduzieren, bevor sie über den Sender geht. Ich denke, da wird uns in Sachen »Digitalradio« noch einiges bevorstehen, was das Thema dieses Beitrages betrifft. Es scheint fast so, als wäre das Rechteck die einzige noch erlaubte Wellenform. Zur Ehrenrettung unseres Berufsstandes fand ich dann doch noch zwei CDs, allerdings älteren Datums, die 0 dBFS als Obergrenze akzeptierten und den IS-Limiter zu keiner Regung veranlassten.

Gestatten, Intersample Peaklimiter

Dieser Anschnitt funktioniert nicht ganz ohne die Anwesenheit eines realen Produktes, nämlich des »Brickwall Limiters« aus dem MD-3 Mastering-Software-Paketes des System 6000 von TC Electronic. Natürlich kann eine solche Software nicht die Zerstörung der Dynamik in vorangegangenen Bearbeitungsschritten verhindern oder gar rückgängig machen, aber es kann das Signal von den Anteilen befreien, die die D/A-Wandler von CD-Playern, Sendeprozessoren oder Daten-Reduktions-Codecs zum Verzerren nötigen. Der Brickwall Limiter [Intersample Peaklimiter] arbeitet mit einer erhöhten Präzision von durchgängig 48 Bit und 5fachem Oversampling, um Intersample Peaks aufzuspüren und zu begrenzen.

Der interessierende Upsample- [Oversampling] Betrieb kann zwar abgeschaltet werden, doch findet dann auch keine Rekonstruktions- Kalkulation mehr statt und Pegel jenseits von 0 dBFS haben freien Durchgang. Die Eingangs- und Ausgangs-Peakmeter befinden sich jedoch ständig im Oversample-Modus, so dass jederzeit Pegel über 0 dBFS angezeigt werden.

Die Skala reicht eingangs- und ausgangsseitig bis +3 dBFS. Der Limiter-Algorithmus beinhaltet eine Programm-adaptive Steuerung der Zeitkonstanten [Ansprech- und Rückstellzeit], um Verzerrungen durch die Ausregelung tiefer Frequenzen zu verhindern und gleichzeitig auf schnelle Spitzen reagieren zu können. Wann immer der Limiter keine Pegelreduktion durchführen muss, wird das Programm vollständig unangetastet und Bit-transparent durchgereicht. Auf diese Weise kann der IS-Limiter auch zur Bearbeitung bereits fertig gemasterten Programms eingesetzt werden, um lediglich 0 dBFS+ Pegel zu entfernen. Zur weiteren Reduzierung von Verzerrungen, arbeitet der Limiter mit einem geringfügigen Preview-Delay von 1.58 ms, das bei allen Abtastraten gleich bleibt und auch im Bypass-Modus aktiv ist. Als gestalterisches Element wurde ein Soft Clipper integriert, der eigentlich dem Sinn des Brickwall Limiters widerspricht, denn mit ihm lassen sich Verzerrungen im zuvor beschriebenen Sinne generieren, um den Eindruck einer größeren Lautheit zu erzeugen.

Und noch eine Erkenntnis

In der gleichen Testreihe untersuchte Thomas Lund auch die Reaktion von Studio- Equipment auf 0 dBFS+ Pegel, unter anderem einer Workstation, eines digitalen Mischpultes, eines Effekt-Prozessors, zweier Abtastratenwandler und eines Sendeprozessors und auch des eigenen Produktportfolios, wobei die Fremdfabrikate aus Gründen der »Pietät« nicht namentlich genannt werden.

Auch hier kann man von zum Teil verheerenden Auswirkungen sprechen. Workstation, Mischpult und alles anderen Geräte erzeugten Verzerrungen in der Größenordnung von –64 bis –15 dB [!]. Und auch die eigenen Erzeugnisse [–81 bis –28.7 dB] machten hier keine besondere Ausnahme. Lediglich das System 6000 [so viel Werbung muss sein] brachte es bei einem Pegel von +3 dBFS immer noch auf beachtlich –86.3 dB Klirr.

Was kann man tun?

Die preiswerteste Methode, Pegel jenseits von 0 dBFS zu verhindern, wurde von einigen besonnenen Mastering-Ingenieuren bereits entwikkelt: Sie steuern ihre digitalen Master grundsätzlich nicht höher als –3 dBFS aus. Prinzipiell sollten jedoch alle Studios ihre Programme mit interpolierenden Peakmetern kontrollieren, anstatt Messinstrumente zu

verwenden, die lediglich die Sample-Werte darstellen. Ein interpolierendes Peakmeter rekonstruiert die Wellenformamplitude aus den Samples und zeigt reale Spitzenwerte an.

Die Herstellerindustrie [HiFi und Studiotechnik] sollte verstärkt auf Übersteuerungsreserven in ihrem Equipment achten, auch wenn die Angaben zur Rauschmessung dann vielleicht um 3 dB schlechter aussehen, was ohnehin keinen Unterschied macht, aber uns zu besser klingenden D/A Wandlern verhelfen würde. Und als letztes ist natürlich auch der Einsatz eines Intersample-Peaklimiters für Produktions- und Mastering-Studios empfehlenswert, die damit eine Qualitätsverschlechterung verhindern, von der sie bislang möglicherweise noch nicht einmal gewusst haben.
Ich möchte mich am Schluss dieses Beitrags sehr herzlich bei Thomas Lund, TC Electronic, bedanken, der mir nicht nur umfangreiches Material zur Verfügung stellte, sondern auch viel Zeit mit mir in Dänemark und am Telefon zu diesem Thema verbrachte.

Eine Meinung ...

Der Artikel – und viel mehr noch die praktischen Erfahrungen – zeigen mögliche Ursachen über »schlechten Klang« moderner CD-Produktionen, aber auch, daß digitale Komponenten und Kabelverbindungen bei der Beurteilung mit fehlerhaftem Material zu fragwürdigen Beurteilungen führen können.

Wiederabdruck. – Mit freundlicher Genehmigung von »Studio-Magazin« (studio-magazin.de)

impressum.

ANSCHRIFT ADDRESS
pconsult – Inh. Helmut Püllmanns
< cicable >
Comeniusweg 27
51143 Köln
02203.982255
www.cicable.com

URHEBERRECHT COPYRIGHT
Alle Inhalte dieser Informationsbroschüre sind urheberrechtlich geschützt (Copyright). Copyright und Nutzungsrechte für alle Abbildungen, Fotos, Texte etc. liegen bei pconsult, Koeln (Germany) bzw. bei den jeweils benannten Autoren, Fotografen etc. Alle Rechte bleiben vorbehalten. Jede Form der weiteren fremden Nutzung, der Übernahme oder Vervielfältigung von Inhalten, Daten, Texten, Textteilen oder Bildmaterial bedarf der ausdrücklichen und vorherigen schriftlichen Genehmigung der pconsult. — *The content of this website is protected by copyright. All rights reserved. Copyright and rights of use for pictures, photos, text are owned by pconsult, Koeln (Germany) or by any of the authors, photographs, artworkers etc, who gave permission for publishing on this website. Any way of reproduction is prohibited. Errors, text mistakes and technical changes are subject to alteration without prior notice.*

WARENZEICHEN TRADEMARK
cicable® ist ein eingetragenes Warenzeichen der pconsult
cicable® is a registered trademark of pconsult

SONSTIGES OTHERS
Die auf diesen Seiten veröffentlichen Daten, Mengen, Spezifikationen, Preise oder andere, sonstigen Informationen sind übliche, von uns ermittelte Daten. Trotz aller Sorgfalt können Fehler nicht augeschlossen werden. Wir behalten uns daher das Recht auf Irrtum und Änderung von Angaben, technischen Daten, Preisen etc. ohne vorherige Ankündigung ausdrücklich vor. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Angaben wird ausdrücklich verneint. Abbildungen sind nicht vertragsbindend. — *Errors, text mistakes and technical changes are subject to alteration without prior notice.*

datum 15.02.2007 – vs.2