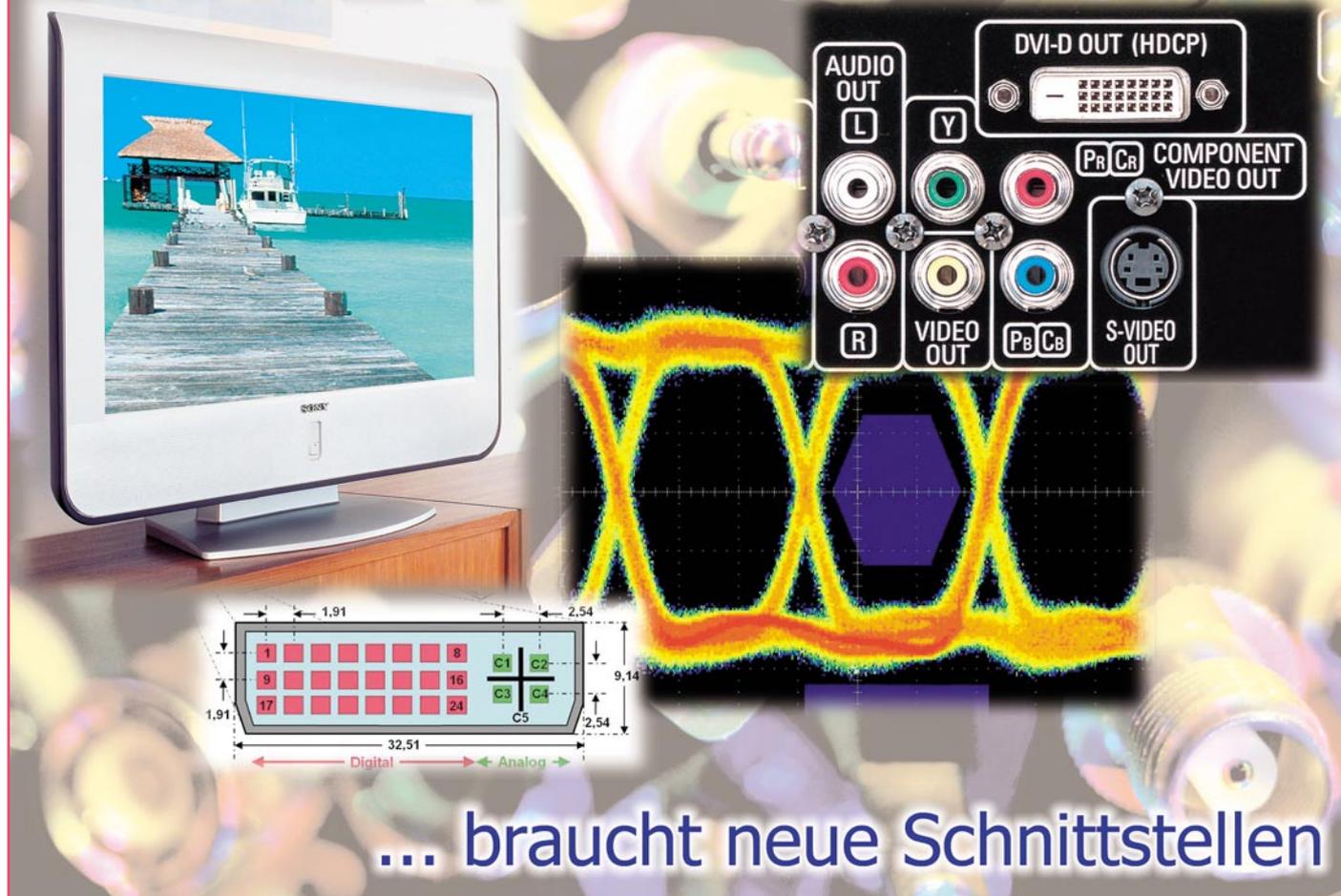


Hochauflösendes Digitalfernsehen ...



DVI, HDMI und HDCP lösen Scart, Cinch und Co. ab.

Alte und neue Verbindungen ...

Erstaunlich lange hat sich die Scart-Buchse (Abbildung 1) für die Audio- und Video-Verbindung analoger Endgeräte wie TV-Gerät, Videorecorder, Sat-Receiver usw. gehalten. Ende der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts in Frankreich als protektionistische Maßnahme gegen den Import ausländischer Fernsehgeräte durch das „Syndicat des Constructeurs d'Appareils Radiorécepteurs et Téléviseurs“ vorgeschlagen, hat sich die Scart-Verbindung trotz zahlreicher Mängel europaweit durchgesetzt und ist bis heute in Neugeräten



Bild 1: Die Ära der 21-poligen Scart-Buchse geht zu Ende. (Quelle: www.converters.tv)

anzutreffen. Scart überträgt analoge Signale: RGB (Rot, Grün, Blau), FBAS (Farb-Bild-Austast-Synchron-Signal, auch engl. CVBS oder Composite Signal genannt) oder S-Video. Eine Schaltspannung kann verschiedenen Zwecken dienen. Für Wiedergabegeräte mit YUV-Eingang (Luminanz Y, Farbdifferenz-Komponenten $U=B-Y$ und $V=R-Y$) sind Wandler im Handel, die RGB in YUV umsetzen (Abbildung 2). Auch als die Signalverarbeitung „immer digitaler“ wurde, hat dies zu keiner Ablösung des „guten“ alten Scart-Kabels durch eine rein digitale Alternative geführt, wodurch die Digitaltechnik ihren Qualitätsvorteil bis heute gar nicht voll ausspielen konnte.

Denken wir an DVB-S-C-T-Receiver (DVB: Digital Video Broadcast, SCT: Satellit Cable Terrestrial) oder einen DVD-Player (DVD: Digital Versatile Disc). Hier wird das digitale Signalverarbeitungsergebnis wieder in ein analoges Signal zurückgewandelt und mit dem Scart-Kabel

zum TV-Gerät übertragen. Ist dieses analog, so war der D/A-Wandlungsschritt unvermeidlich. Absurd wird es jedoch, wenn ein moderner, als hochauflösend apostrophierter Flachbildschirm mit digitaler Ansteuerung einer festen Pixelmatrix zum Einsatz kommt. Dieser muss die A/D-Wandlung wieder rückgängig machen und evtl. eine Anpassung der waagrechten und senkrechten Pixelzahl an seine native Auflösung vornehmen (Skalierung).



Bild 2: Aus RGB wird YUV. (Quelle: www.converters.tv)

DVI-Pin-Belegung

1	TMDS Daten 2-	16	Hot Plug Detect
2	TMDS Daten 2+	17	TMDS Daten 0-
3	TMDS Daten 2/4 Abschirmung	18	TMDS Daten 0+
4	TMDS Daten 4-	19	TMDS Daten 0/5 Abschirmung
5	TMDS Daten 4+	20	TMDS Daten 5-
6	DDC Takt	21	TMDS Daten 5+
7	DDC Daten	22	TMDS Takt Abschirmung
8	Analog V-Sync	23	TMDS Takt +
9	TMDS Daten 1-	24	TMDS Takt -
10	TMDS Daten 1+	C1	Analog Rot Video
11	TMDS Daten 1/3 Abschirmung	C2	Analog Grün Video
12	TMDS Daten 3-	C3	Analog Blau Video
13	TMDS Daten 3+	C4	Analog H-Sync
14	+5 V	C5	Masse für RGB
15	Masse für +5 V u. analog H/V-Sync		

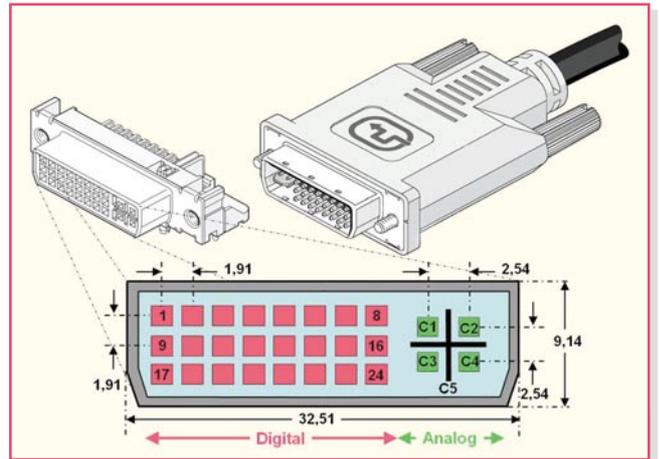


Bild 5: Pin-Belegung und Maße der DVI-I-Steckverbindung (Quelle teilw. Molex)

Wen wundert's, wenn dabei Schärfe, Farbe und Auflösung reduziert wurden. Bei den PC-Grafikkarten und -Monitoren gilt das Gleiche. Eine Ausnahme bildete in den letzten Jahren der Mehrkanalton, der in höherwertigen Geräten als digitaler, serieller Datenstrom über die digitale SPDIF-Schnittstelle (Sony/Philips Digital Interface, elektrisch oder optisch) an entsprechend ausgestattete Verstärker ausgegeben wird.

blüffenden Qualitätsgewinn. Man muss also nicht unbedingt warten, bis der DVD-Markt von hochauflösenden Produktionen überschwemmt wird. Damit hat das letzte Stündchen für Scart geschlagen. Heute muss man sich neue Abkürzungen einprägen: DVI (Digital Visual Interface), HDMI (High-definition Multimedia Interface) und HDCP (High-bandwidth Digital Content Protection). Was es damit auf sich hat, soll in diesem Artikel in knapper Form zusammengefasst werden.

sind DVI-I (Integrated, 29 Pins, Abbildung 5) und DVI-D (Digital, 24 Pins, Abbildung 6). Während DVI-I aus Kompatibilitätsgründen auch die analogen RGB-Signale und die zugehörigen Sync-Impulse „integriert“, beschränkt sich DVI-D auf die rein digitalen Bildsignale. Der Ton wird nicht über die DVI-Schnittstelle transportiert. DVI wurde von den amerikanischen Herstellern Silicon Image und Intel entwickelt und steht nun unter der Aufsicht der DDWG (Digital Display Working Group), einem Zusammenschluss namhafter Unternehmen wie Silicon Image, Intel, Compaq, HP, IBM und NEC (www.ddwg.org).



Bild 4: Das DVI-Logo

Mit dem Siegeszug der Digitaltechnik ist inzwischen entlang der gesamten Übertragungskette von der Kamera über die Studio-, Speicher- und Übertragungstechnik bis zur hochauflösenden Wiedergabe im „Home Theatre“ kein analoges Signal mehr anzutreffen (Abbildung 3). Übrigens bringt die Wiedergabe „normaler“ DVDs über einen Player und Flachbildschirm jeweils mit digitaler Schnittstelle einen ver-

DVI

DVI (Digital Visual Interface) ist eine neue, voll digitale Schnittstellentechnologie, mit der die Wiedergabequalität digital aufbereiteter, unkomprimierter Video-Signale für moderne, voll digitale Flachbildschirme optimiert werden soll. Abbildung 4 zeigt das DVI-Logo. So, wie wir heute keine höherwertige PC-Grafikkarte ohne DVI-Anschluss antreffen, wird dies voraussichtlich in Zukunft auch bei den DVB-Receiver, PVRs, DVD-Playern und Flachbildschirmen der Fall sein.

Es gibt eine ganze Reihe von digitalen Video-Schnittstellen. Die gebräuchlichsten

Für die hohen Datenübertragungsraten via DVI wird das differentielle Verfahren TMDS (Transition Minimized Differential Signaling) verwendet. Ein Adernpaar kann damit über 1,6 GBit/s übertragen. Für die volle Schnittstellenimplementierung (dual link) mit 6 Adernpaaren sind theoretisch etwa 10 GBit/s zu erzielen. Die Länge eines Verbindungskabels ist auf ca. 5 m begrenzt.

HDCP

Wenn es nach dem Willen der Filmindustrie geht, sollen keine kopierschutzten Inhalte über die DVI-Schnittstelle fließen, es sei denn, Quelle und Ziel sind für den neuen digitalen Kopierschutzstandard HDCP (High-bandwidth Digital Content Protection) eingerichtet und berechtigt. HDCP wurde von der Intel Corp. entwickelt (<http://www.digital-cp.com>), um die Urheberrechte an den Inhalten, die über

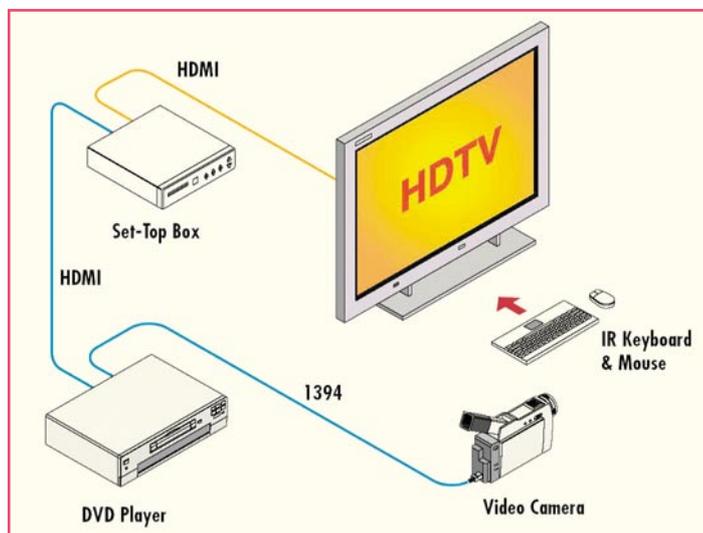


Bild 3: Einfaches HDMI-Heimkinosystem (Quelle Molex)

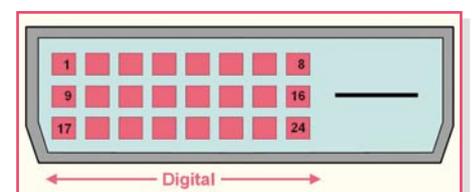


Bild 6: Pin-out der rein digitalen DVI-D-Buchse

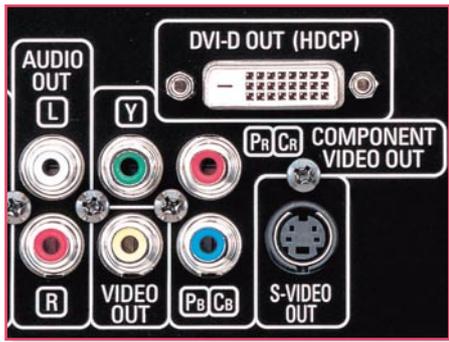


Bild 7: Beim DVD-Player Denon DVD 1919 weiß man, woran man ist.

eine DVI-Verbindung transportiert werden, zu schützen. HDCP zwingt die Geräteindustrie dazu, den Wünschen der Inhalteanbieter zu folgen. Die Hersteller müssen ihre Geräte mit lizenzierten Schlüsseln ausstatten, um den Empfang und die Darstellung der Bilder auf einem Display zu ermöglichen. Eine Lizenz erhält ein Hersteller nur dann, wenn er sich verpflichtet, Markierungen im Inhaltssignal auszuwerten, die das Speichern oder Wiederversenden des Inhalts beschränken. HDCP-konforme digitale Schnittstellen sollten mit einem entsprechenden Hinweis versehen sein, um Verbindungsprobleme zu vermeiden. Ein Beispiel zeigt Abbildung 7, der DVI-D-Ausgang des Denon DVD-Players DVD 1910 ist als kopiergeschützt gekennzeichnet.

Beim Urheberrechtsschutz durch HDCP wirken drei Elemente zusammen. In den HDCP-Spezifikationen Rev. 1.1 liest sich das so: „... Jedes Element spielt innerhalb des Systems eine genau bezeichnete Rolle. An erster Stelle steht das Authentifizierungsprotokoll, durch das der HDCP-Sender verifiziert, ob der HDCP-Empfänger für den Empfang des HDCP-Inhalts lizenziert ist. Wenn der Receiver sich legitimiert hat, wird der verschlüsselte Inhalt zwischen den beiden Geräten auf der Grundlage geheimer Verabredungen übertragen. Die Entschlüsselung findet dann im Receiver statt. Dadurch wird das ‚Belauschen‘ durch andere Empfänger zur Nutzung des Inhalts verhindert. Falls die legitimierten Geräte dennoch ‚ausgespäht‘ werden sollten, um die HDCP-Inhalte unberechtigt zu nutzen, kann der HDCP-Sender durch die Wiederholung der Authentifizierungsprozedur die ausgespähten Geräte an der Übertragung der HDCP-Inhalte hindern. Wird das Signal über einen analogen Ausgang (z. B. YUV oder FBAS) parallel zum digitalen ausgegeben, muss dieser durch den Content-Anbieter beeinflussbar sein (abschalten, Auflösung reduzieren ...).“

Das Anfertigen digitaler Kopien ist bei HDCP nicht möglich, da die aufnehme-

den Geräte (anders als das Display) nicht mit den Entschlüsselungseinrichtungen ausgestattet sind. In Amerika sind die vom FCC (Federal Communications Commission) vorgeschlagenen Regeln für das rechtmäßige Kopieren von Inhalten (fair-use rights) heftig umstritten. Wie HDCP im Einzelnen in Deutschland umgesetzt wird, ist unklar. Nur eines scheint sicher: HDCP erschwert den Umgang mit videobasiertem Programmmaterial, verteuert die Endgeräte und wird bald nach der allgemeinen Einführung „geknackt“ sein.

In Europa hat die EICTA (European Information, Communications & Consumer Electronics Technology Industry Association) Kriterien für HDTV-Geräte aufgestellt, die das „HD ready“-Logo tragen dürfen und ihren Käufern dadurch ein Stück Zukunftssicherheit garantieren. Dies war auch dringend notwendig, da viele der aktuell in den Märkten angebotenen Geräte irreführend mit einem „HDTV“-Schriftzug werben, aber nicht die entsprechende Auflösung und oft genug nicht einmal ei-

Bild 8: Das „HD ready“-Logo garantiert ein Stück Zukunftssicherheit.



große Zahl von Adaptionen zwischen beiden Schnittstellen bezeugt (Abbildung 10).

Zwei zusätzliche Features von HDMI sind die Unterstützung von CEC (Consumer Electronics Control) und DDC (Display Data Channel). CEC basiert auf dem „AV link“-Protokoll und erlaubt die Nutzung einer gemeinsamen Fernbedienung für mehrere HDMI-Quellen wie DVD-Player, DVB-Receiver etc. Mit DDC kann die Quelle via I²C-Kommunikation die Eigenschaften der Senke abfragen. So könnte z. B. ein DVD-Player sein Ausgabeformat selbsttätig an die Auflösung des Displays anpassen. Abbildung 11 zeigt das Blockdiagramm einer durchgängig auf HDMI beruhenden Anlagenkonzeption (Quelle Toshiba).

HDMI-Pin-Belegung

1	TMDS Daten 2+	11	TMDS Takt Abschirmung
2	TMDS Daten 2 Abschirmung	12	TMDS Takt -
3	TMDS Daten 2-	13	CEC
4	TMDS Daten 1+	14	nicht verwendet
5	TMDS Daten 1 Abschirmung	15	DDC Takt (SCL)
6	TMDS Daten 1-	16	DDC Daten (SDA)
7	TMDS Daten 0+	17	DDC/CEC Masse
8	TMDS Daten 0 Abschirmung	18	+5 V
9	TMDS Daten 0-	19	Hot Plug Detect
10	TMDS Takt +		

nen digitalen Eingang für HDTV-Signale haben.

Mit dem „HD-ready“-Logo (Abbildung 8) wird dem Käufer zugesichert, dass das Display

1. mindestens eine nominale Auflösung von 720 Zeilen aufweist, die HDTV-Formate 720p (1280 x 720 progressive) und 1080i (1920 x 1080 interlaced) mit jeweils 50 und 60 Hz unterstützt,
2. mindestens einen digitalen DVI- oder HDMI-Eingang und
3. einen analogen HDTV-fähigen YUV-Komponenten-Eingang hat und
4. HDCP unterstützt.

HDMI

Eine Schwäche von DVI ist, dass man für das digitale Audio-Signal eine eigene Verbindung herstellen muss. Mit HDMI (High-definition Multimedia Interface, Abbildung 9) ist dies vorbei. Es leitet auch die digitalen Signale für bis zu 8 Ton-Kanäle zum digitalen Sound-Prozessor. Das erleichtert natürlich die Verkabelung einer Anlage. Ansonsten ist HDMI zu DVI hundertprozentig abwärtskompatibel, was auch die

Es gibt inzwischen zwei Typen der HDMI-Schnittstelle: HDMI Typ A mit 19 Pins für max. 5 GBit/s (Abbildung 12) und 15 m Kabellänge und HDMI Typ B mit 29 Pins für höhere Video-Datenraten. Typ B ist zwar definiert, aber in der Praxis (noch?) nicht anzutreffen.

Die Pixelfrequenz liegt bei Typ A zwischen 25 und 165 MHz (Typ B bis 330 MHz) mit bis zu 24 Bit/Pixel. Die Abtastmuster sind für RGB 4:4:4 und YUV 4:2:2 oder 4:4:4. HDMI unterstützt komprimierte Audioformate wie Dolby Digital, Dolby Digital EX, DTS und DTS EX und 1 bis 8 unkomprimierte Audio-Datenströme mit Bitraten von 48, 96 oder 192 kHz, alternativ auch komprimierte Mehrkanal-Datenströme mit 32, 44,1, 48, 88,2, 176,4 oder 192 kHz.

Zusammenfassend ist festzuhalten:



Bild 9: Dieses Logo signalisiert „state of the art“.

Bild 10:
Ein DVI-D-
Kuppler auf
HDMI-Stecker



Compliance Test Specification 1.0 (CTS) erforderlich. Damit kann man vom Idealzustand „Plug & Play“ ausgehen. Die Prozedur ist in Abbildung 13 schematisch dargestellt. Die Gebühren für die Lizenzierung betragen 15.000 US-\$/a und zwischen 0,15 und 0,04 US-\$/Gerät. Details kann man unter <http://www.hdmi.org/manufacturer/terms.asp> nachlesen.

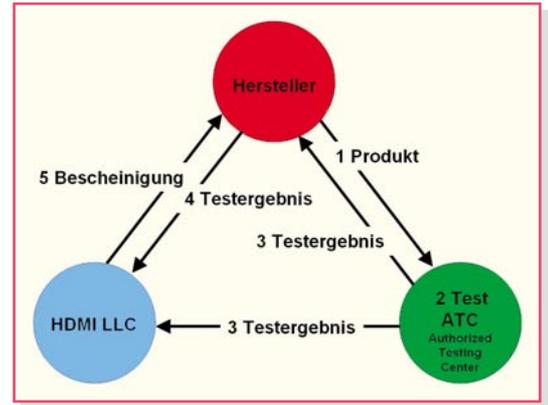


Bild 13: Nur nach erfolgreich bestandener Zertifizierungsprozedur darf das HDMI-Logo auf ein Gerät.

HDMI vereint die unkomprimierte Übertragung von hochauflösendem Video bis zu 1080p (1920 x 1080 Pixel, progressiv) und Vielkanal-Audio, Steuerung sowie digitalen Kopierschutz unter einer Schnittstelle.

Zertifizierung

Wenn Produkte unterschiedlicher Hersteller das HDMI-Zeichen tragen, sollte

Augen auf!

Das kritischste Merkmal für die Signalqualität „überalles“ ist die Öffnung des „Auges“, das sich ergibt, wenn die Ausgangssignale abschnittsweise synchron übereinander geschrieben werden. Bei einem idealen Signal sind die Anstiegs- und Abfallzeiten null sowie Phase und Amplitude konstant und nicht verrauscht. Das Auge ist dann ein scharf umrandetes Rechteck mit maximaler Fläche. In der Praxis ist es durch die genannten Einflüsse mehr oder weniger geschlossen. Dabei darf ein gewisses Toleranzschema (Abbildung 14) nicht verletzt werden. Abbildung 15 zeigt das Ausgangssignal eines TMDS-Senders, welches eine ausreichend weite Augenöffnung besitzt. In Abbildung 16 dagegen weisen die weiß gefärbten Teile des Augendiagramms darauf hin, wo das Toleranzschema verlassen wurde.

Empfehlung

Wer heute vor der Anschaffung neuen Equipments für hochauflösendes Fernsehen steht, sollte unbedingt darauf achten, dass die Geräte über eine digitale Schnittstelle (DVI oder HDMI) und damit über Zukunftssicherheit verfügen. Idealerweise werden alle Geräte mit HDMI ausgestattet sein, aber auch der gemischte Betrieb macht laut der HDMI Licensing, LLC, keine Probleme (sofern beide Schnittstellenarten HDCP-geschützt sind). Geräte mit dem „HD ready“-Logo und hochwertige Verbindungskabel sollten eigentlich gravierende Fehlkäufe ausschließen.

Was ist TMDS?

Für DVI und HDMI ist wegen der riesigen Datenmengen, die zwischen Quelle und Senke transportiert werden müssen, ein sicheres, schnelles und verlustleistungsarmes Übertragungsverfahren zwingend erforderlich (Abbildung 17). Ein vom amerikanischen Hersteller Silicon Image entwickelter Übertragungsstandard dafür ist TMDS. TMDS steht für „Transition Minimized Differential Signaling“, was so viel heißt wie „Differenzielle Übertragung mit

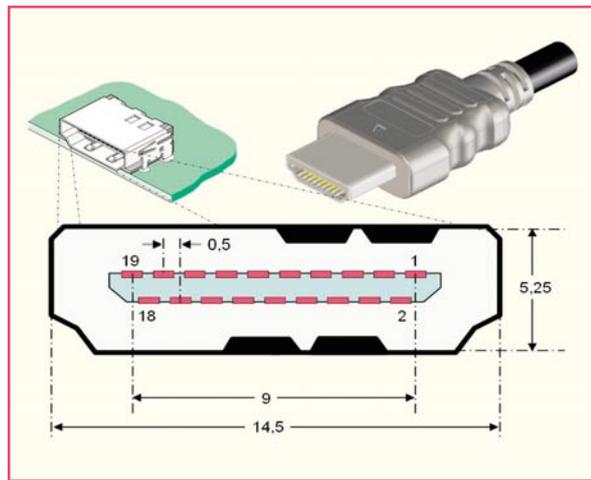


Bild 12: Pin-Belegung und Maße der HDMI-Steckverbindung (Quelle teilw. Molex)

dies die Gewähr für ein problemloses Zusammenspiel sein. Für die Berechtigung zum Führen des Logos ist nämlich das erfolgreiche Bestehen einer gründlichen Zertifizierungsprozedur nach der HDMI

nicht konformes Signal auftreten kann, obwohl die Quelle alle Anforderungen erfüllt. Die Nagelprobe wäre also die „Augenmessung“ am Ende des Display-Anschlusskabels.

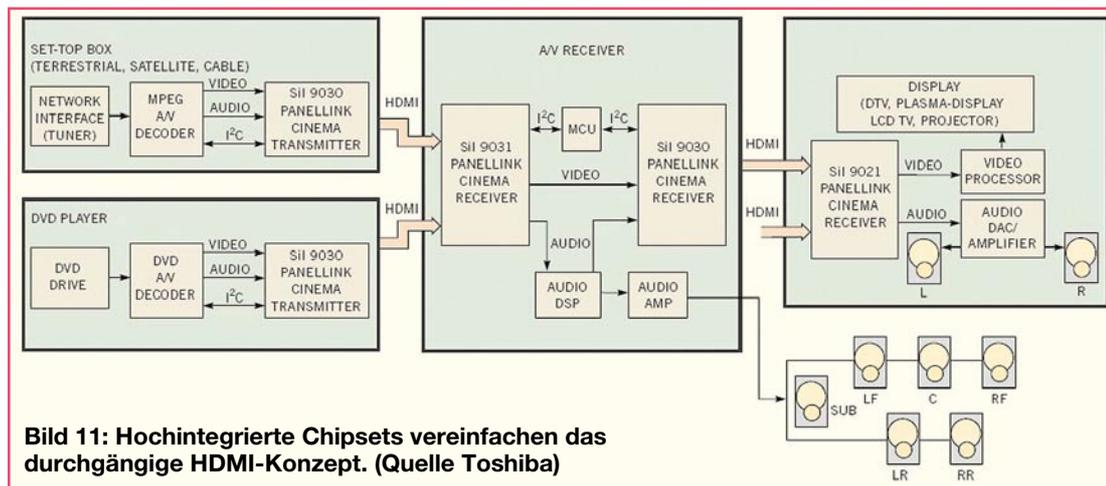


Bild 11: Hochintegrierte Chipsets vereinfachen das durchgängige HDMI-Konzept. (Quelle Toshiba)

minimierter Anzahl von (Pegel-) Übergängen“. Was kann man sich darunter vorstellen?

Differenzielle Übertragung

Die gebräuchlichste Art der Signalübertragung verwendet eine Leitung für den Signalpegel (Single Ended), der sich auf eine Referenz bezieht, in der Regel das Massepotential (Abbildung 18). Einstreunungen auf die Signalleitung überlagern das Nutzsignal und verfä-

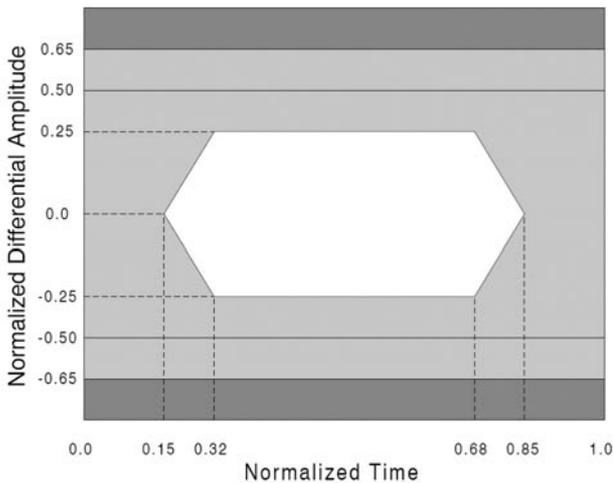


Bild 14: Das TMDS-Signal darf sich nur im hellgrauen Bereich befinden. (Quelle: DVI Test and Measurement Guide, Rev. 1.0, http://www.ddwg.org/data/DVI_TM_guide_REV1.pdf)

nicht mehr von der absoluten Höhe der Logikpegel ab, sondern von ihrer Differenz (typ. 700 mV). Damit ist die differentielle Übertragung erheblich störsicherer als die „eindrätige“.

Minimierte Anzahl von Pegelübergängen

Wird ein Datenwort seriell übertragen, findet ein Pegelübergang (0→1: Anstieg, 1→0 Abfall) immer zwischen zwei benachbarten entgegengesetzten Bits statt. Weil ein Pegelübergang stets mit der Gefahr einer erhöhten Fehlerhäufigkeit infolge EMI (Electromagnetical Interference) und erhöhtem Leistungsbedarf einhergeht, ist es sinnvoll, das übertragene Datenwort so zu codieren, dass die Anzahl der Pegelübergänge möglichst klein wird. Diese Aufgabe erfüllt der TMDS-Encoder auf der Sendeseite. Empfangsseitig wird die Encodierung durch den inversen TMDS-Decoder wieder rückgängig gemacht. Obwohl die Zahl der Bits nach der Encodierung von acht auf zehn zugenommen hat, ist die Zahl der Übergänge gesunken.

Das Encodierprinzip arbeitet zweistufig

1. Schritt. Mit einem Encoder werden die Übergänge innerhalb eines Datenwortes verringert (transition minimizing). Der Encoder besteht aus 7 Gattern, die entweder eine Verknüpfung als Exklusiv-Oder (XOR: $e_8 = 1$) oder als negiertes Exklusiv-Oder (XNOR: $e_8 = 0$) (Abbildung 19) realisieren und aus einem achtstelligen Datenwort D für den Pixelwert ($d_7d_6d_5d_4d_3d_2d_1d_0$) das Encodiererergebnis E ($e_8e_7e_6e_5e_4e_3e_2e_1e_0$) erzeugen (Abbildung 20). Welche Funktion (XOR oder XNOR) sie ausüben, hängt davon ab, aus wie vielen Nullen und Einsen das zu codierende Datenwort D besteht. Im Ergebnis werden aus 8-Bit-Datenwörtern mit jeweils bis zu acht Übergängen (einschließlich des Übergangs zwischen benachbarten Wörtern) 9-Bit-Da-

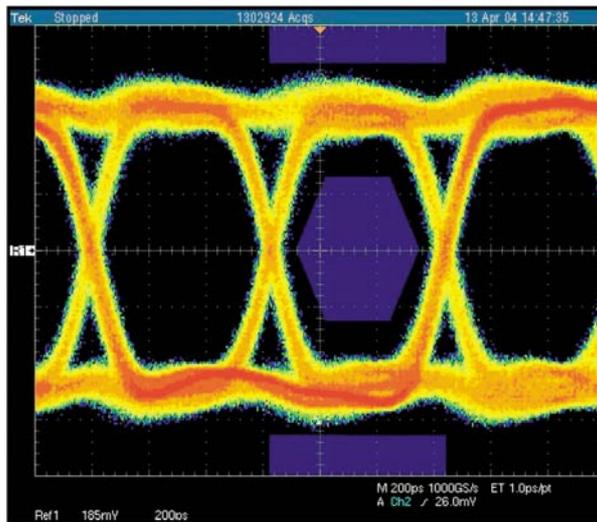


Bild 15: Das Auge ist so weit offen, dass das Toleranzschema nicht verletzt wird.

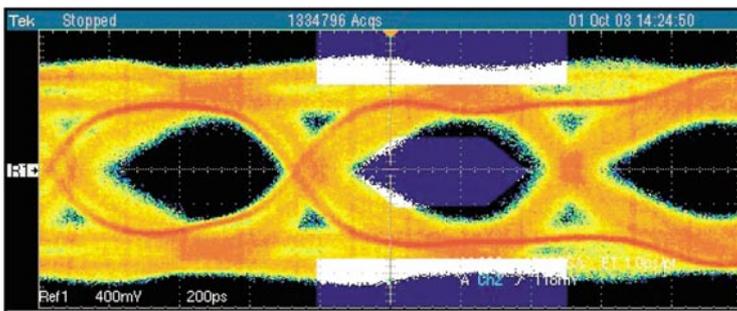
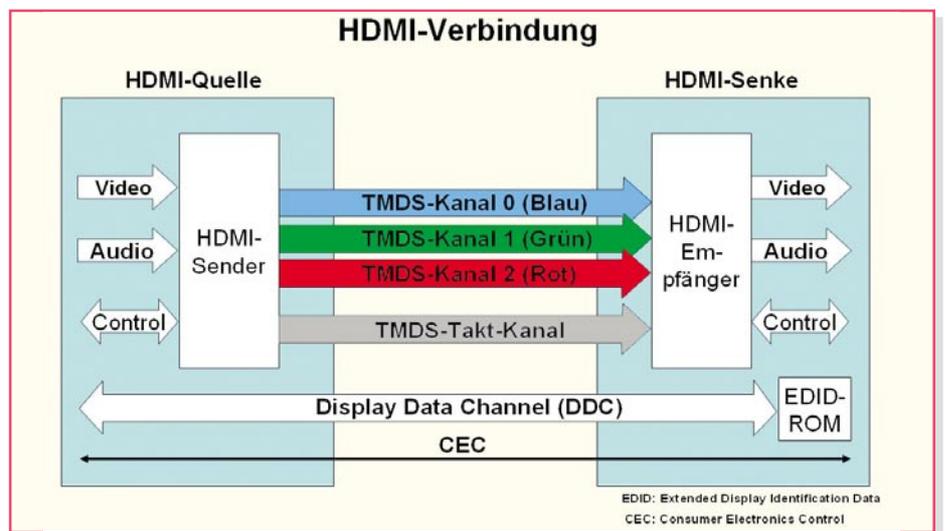


Bild 16: Ein schlechtes HDMI-Signal mit Amplituden- und Phasenjitter und langen, unsymmetrischen Anstiegs- und Abfallzeiten

schen es damit. Bei digitalen Werten kann somit ein „Low“ zu „High“ kippen und umgekehrt. Dieses Problem ist elegant zu lösen, indem das Signal S+ und seine inverse Kopie S- („0“→„1“, „1“→„0“) über ein verdrehtes Leitungspaar zum Empfänger geführt werden. Er bildet die Differenz aus beiden, wodurch sich die Einstreuungen kompensieren. Die Differenzspannung wird den logischen Pegeln „0“ und „1“ zugeordnet. Der Logikwechsel hängt also

Bild 17: Das prinzipielle Blockschaltbild einer HDMI-Verbindung. Die Bilddaten werden auf drei TMDS-Kanälen für Rot, Grün und Blau übertragen. Für den Takt gibt es einen eigenen TMDS-Kanal.



tenwörter mit maximal fünf Übergängen.

2. Schritt. Das encodierte Datenwort $e_8e_7e_6e_5e_4e_3e_2e_1e_0$ wird um ein weiteres Bit e_9 erweitert. e_9 hat die Aufgabe, für die mittlere Gleichstromfreiheit des Ergebnisbitstroms zu sorgen (DC balancing). Das verhindert das „Aufladen“ des Kabels (was den Wechsel in den entgegengesetzten logischen Zustand erschweren und dadurch Datenfehler hervorrufen würde) und erleichtert die Verwendung von Transformatoren (die andernfalls in die Sättigung getrieben werden könnten). Wenn bereits durch die vorangegangenen encodierten Worte mehr „0“-Bits als „1“-Bits übertragen wurden und das aktuell encodierte Wort E ebenfalls mehr „0“-Bits als „1“-Bits enthält, werden alle Bits im aktuell encodierten Wort invertiert. Der empfangsseitige Decoder wird durch $e_9=1$ darüber informiert, worauf er die sendeseitige Invertierung rückgängig macht. Enthält das aktuell encodierte Wort E bereits mehr „1“-Bits als „0“-Bits, was ja dem angenommenen Überschuss an vorangegangenen „0“-Bits entgegenwirkt, wird E unverändert übernommen. $e_9=0$ teilt dem Decoder mit, dass er dieses Wort einfach kopieren kann. Obwohl das Codierergebnis nun zehn-statt achtstellig ist, hat die Zahl der Übergänge im Wort und zwischen den Wörtern abgenommen, wie man an einigen Zahlenbeispielen überprüfen kann.

Der Codieralgorithmus soll an einigen 8-Bit-Datenwörtern demonstriert werden. Zuerst wird geprüft, wie viele „0“- oder „1“-Bits im Wort vorkommen.

Es gibt nun drei mögliche Ergebnisse:

Mehr „0“-Bits: Codiert wird nach der Vorschrift $e_8=1$ (XOR), $e_i = e_{i-1} \text{ XOR } d_i$ für $1 \leq i \leq 7$ und $e_0 = d_0$. Beispiel: $I000I00I \rightarrow I10000I1$, d. h. aus vier Übergängen sind zwei geworden.

Mehr „1“-Bits: Codiert wird nach der Vorschrift $e_8=0$ (XNOR), $e_i = e_{i-1} \text{ XNOR } d_i$ für $1 \leq i \leq 7$ und $e_0 = d_0$. Beispiel: $I0I1I0I1 \rightarrow I0I10000I1$, aus vier Übergängen sind drei geworden.

Wahrheitstafel für $1 \leq i \leq 7$			
e_{i-1}	d_i	e_i (XOR)	e_i (XNOR)
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

Bild 19: Durch sukzessive Verknüpfung entsteht aus dem Datenwort D das encodierte Wort E .

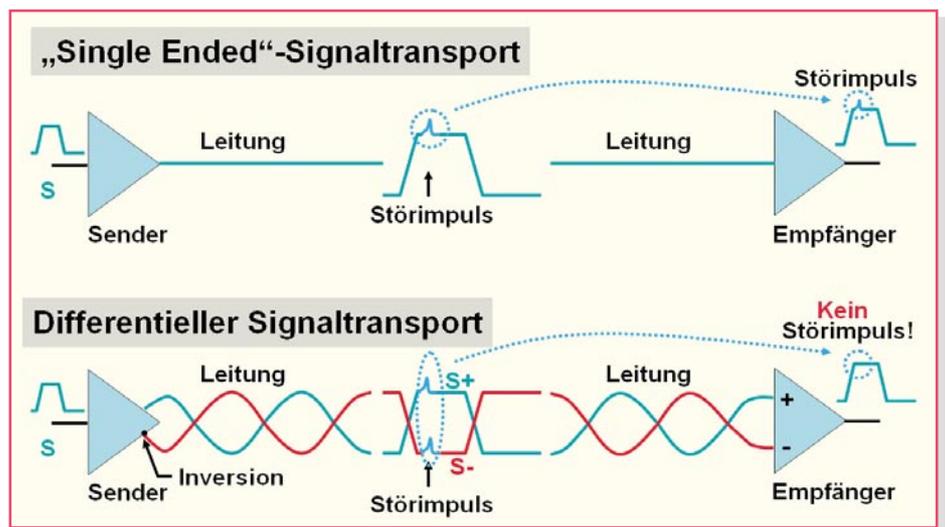


Bild 18: Beim differentiellen Übertragungsverfahren werden Leitungsstörungen „heraussubtrahiert“.

Gleich viel „0“-Bits wie „1“-Bits: In diesem Fall entscheidet das niedrigstwertige Datenbit d_0 , ob mit XOR ($d_0 = 1$) oder XNOR ($d_0 = 0$) verknüpft wird. $0I0I0I0I \rightarrow I00I100I$, $I0I0I0I0 \rightarrow 0I100I10$.

Wie bereits erwähnt, ist es die Aufgabe des zweiten Schritts, die Differenz zwischen der Gesamtzahl an „0“-Bits und „1“-Bits (und damit den mittleren Gleichanteil) klein zu halten. Am „Worst Case“-Beispiel einer längeren Folge von „Null“- oder „1“-Bytes kann man ersehen, wie sich Ergebnisziffern ergeben, deren Gleichanteil null ist.

00000000, 00000000, 00000000, 00000000, ... \rightarrow
 (0I0000000, I1111111, 0I0000000, I1111111, ... \rightarrow
 (000000000I, I11111100, I11111100, 000000000I, I11111100, 000000000I, I11111100, ... \rightarrow
 (000000000I, I11111100, I11111100, 000000000I, I11111100, 000000000I, I11111100, ...

Die Null-Byte-Folgen bewirken Zyklen (in Klammern) mit einer Länge von 9 Wörtern, die jeweils 45-mal die „1“ und 45-mal die „0“ enthalten. Bei Folgen von Bytes mit dem Dezimalwert 255 (IIIIIIII) ergeben sich 7-Wort-Zyklen mit 35-mal „0“ und 35-mal „1“. Die Zyklen sind durch die Parität von Nullen und Einsen also „ausgewogen“.

Eine exakte Beschreibung des Codieralgorithmus findet sich in der Spezifikation „Digital Visual Interface – DVI“ Rev. 1.0 vom April 1999 der Digital Display Working Group (www.ddwg.org).

Als Nachteil muss man dieser TMDS-Codierung anrechnen, dass sie unabhängig von den Eigenschaften des übertragenen Bildes arbeitet. Berücksichtigt man die Ähnlichkeiten benachbarter Pixel innerhalb eines Bildes in Bezug auf ihre Signalwerte (tonal locality), lassen sich die Pixeldaten auf noch weniger Pegelübergänge umcodieren. Das Verfahren dazu heißt „Chromatische Codierung“. Sie kann die Zahl der 0 \rightarrow 1- und 1 \rightarrow 0-Übergänge um bis zu 70 % reduzieren (vergl. Cheng, Weichung: „Chromatic Encoding: Chromatically Transition Minimized Differential Signaling“, Dept. of EE Systems, University of Southern California, 2004). **ELV**

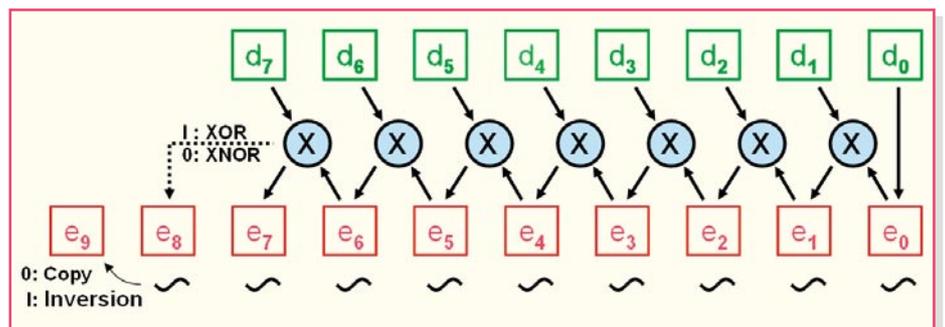


Bild 20: Je nachdem, ob Nullen oder Einsen im Datenwort überwiegen, wird mit XOR oder XNOR verknüpft.