

Arbeitsauftrag VGA, HDMI, DVI, DisplayPort, Thunderbolt, Firewire

VGA

VGA-Anschluss (engl. Video Graphics Array) umfasst die Spezifikation einer analogen elektronischen Schnittstelle zur analogen Übertragung von Bewegtbildern zwischen Grafikkarten und Anzeigegeräten sowie Spezifikationen für hierzu geeignete Stecker und Kabel. Die Einführung erfolgte 1987 gleichzeitig mit dem Video Graphics Array von IBM und folgte dem EGA-Anschluss.



Hierbei wird das analoge VGA-Signal durch den Video Display Controller/RAMDAC der Grafikkarte erzeugt. Bei aktuellen Bildschirmtechnologien wie Flachbildschirmen und Videoprojektoren ist eine Umwandlung des digitalen Bildes der Grafikkarte in ein analoges Signal nicht mehr notwendig, da im Anzeigegerät ohnehin ein digitales Signal benötigt wird. Bei einer VGA-Verbindung muss das von der Grafikkarte erzeugte digitale Bild zunächst verlustbehaftet analogisiert und im Anzeigegerät wieder re-digitalisiert werden, was zu Qualitätseinbußen führt. Daher sind hier digitale Verbindungen vorzuziehen wie DVI, HDMI oder DisplayPort, welche rein digital arbeiten und Umwandlungsverluste vermeiden. Für die analoge Übertragung von NTSC- und PAL-TV-Signalen existieren verwandte Standards, z. B. RGB, S-Video und F-BAS.

Früher wurde unter anderem in Workstations der Unternehmen Sun, Silicon Graphics und IBM der Steckertyp 13W3 verwendet, bei dem die Bildsignale besser geschirmt sind. Die elektrischen Signale sind aber ansonsten identisch. Eine kompaktere, manchmal in Laptops eingesetzte Variante ist Mini-VGA, welche sich nur mechanisch und nicht elektrisch vom ursprünglichen VGA-Anschluss unterscheidet. Die PC-99-Norm schreibt seit dem Jahr 1999 für VGA-Stecker und Buchsen die blaue Farbe vor. Ende 2010 gaben Intel und AMD bekannt, ab dem Jahr 2015 kein VGA mehr in ihren Produkten zu unterstützen. Sie konzentrieren sich fortan auf die Schnittstellen HDMI und DisplayPort.

Steckverbindung

Mit VGA-Stecker bezeichnet man einen 15-poligen Mini-D-Sub-Stecker (auch D-Sub-Mini-Anschluss genannt) mit drei Anschlussreihen (Typ DE-15).

Der Ausgang der Grafikkarte ist stets eine Buchse, der Eingang am Anzeigegerät kann prinzipiell beiderlei Geschlechts (vgl. eng. male = Stecker, female = Buchse) sein (je nach Geräte-Modell). In der Regel (alle modernen Röhren- und LCD-Monitore) ist dieser aber ebenfalls eine Buchse, sodass ein Verbindungskabel zwei Stecker-Enden benötigt. Viele Anzeigegeräte (Monitore) haben auch ein fest

angebrachtes Kabel, wobei dieses mit einem Stecker endet und an die Buchse der Grafikkarte im PC passt.

Der Nachfolger von VGA- und DVI-Anschluss ist der DisplayPort.

Der Signalpegel beträgt (außer für die Datenleitungen) 0,7 V_{ss} mit 75 Ω Impedanz. VGA-Kabel können je nach Qualität schon bei Längen unter 5 m deutlich störanfällig sein, oder auch bei über 30 m Kabellänge noch ein gutes Signal übertragen. Vorteilhaft ist ein hochfrequenzgeeignetes Kabel (geringe Dämpfung, hohe Abschirmung (>65 dB), passende Impedanz (75 Ω)) mit koaxialem Aufbau für die Farbkanäle.

Generell ist der VGA-Anschluss bis 400 MHz Videobandbreite einsetzbar, was für Auflösungen bis zu 2560 × 1440 Pixeln bei einer Bildfrequenz von 75 Hz ausreicht. Bei hohen Auflösungen können Unschärfen (durch Ausrunden der Signalfanken) und/oder Schattenbilder (durch Reflexionen in der analogen Verbindung) in Abhängigkeit von der Kabelqualität deutlich sichtbar werden.

DDC1 verwendet Pin 14 (V-Sync) als SCL, allerdings geht nur ein vereinfachtes Datensignal vom Monitor zum PC, DDC2 verwendet dafür Pin 15, unterstützt aber Signale in beide Richtungen und hat mehr Funktionen.

Je nach Auflösung(en) gibt es noch mehr Kombinationen (PIN 15 wird dann manchmal als ID3 bezeichnet)

Manche moderne Grafikkarten und Beamer unterstützen auch einen HDTV-Ausgang (Component Video) am VGA-Stecker; dann wird statt des RGB-Signals ein YPbPr-Signal übertragen. Die Belegung ist typischerweise, jedoch nicht zwingend, Rot-Differenz = Pr auf Pin 1, gammakorrigierte Helligkeit = Y auf Pin 2 (mit Sync), Blau-Differenz = Pb auf Pin 3, Pin 6 bis 8 Masse, Rest NC (engl. not connected, d. h. nicht belegt).

Signaleigenschaften

Durch die Generierung von unterschiedlichen Pixelfrequenzen durch die Grafikkarte ist ein Einsatz von einstellbaren Tiefpassfiltern zur Begrenzung der Videobandbreite nach dem RAMDAC technisch kaum realisierbar. Ein VGA-Signal erfährt daher keine Bandbegrenzung, was zu einem treppenförmigen Verlauf des Analogsignals im Pixeltakt mit eventuell vorhandenen Überschwingern nach Pixelflanken führt. Die Verarbeitung solcher Signale ist bei rein analogen Röhrenbildschirmen meist unproblematisch, kann aber bei LCD-Flachbildschirmen zu Problemen führen. Für die Wiedergabe auf einem LCD muss das Signal zuerst mit einem Analog-Digital-Umsetzer (ADC) wieder digitalisiert werden, was eine korrekte Einstellung der Pixelfrequenz und der Pixelphase (Zeitpunkt der ADC-Abtastung während jeder Pixeldauer) voraussetzt. Dies wird in heutigen Flachbildschirmen durch automatische Routinen innerhalb 0,5–2 s bewerkstelligt, gelingt aber nicht immer fehlerfrei, so dass eine manuelle Feineinstellung für jede verwendete Bildauflösung notwendig werden kann.

Auflösung

Ursprünglich wurde der VGA-Anschluss nur für eine Auflösung bis 640 × 480 Pixeln auf analog arbeitenden Bildschirmröhren konzipiert. Bis 1280 × 720 Pixeln ist die Benutzung von VGA normalerweise unproblematisch, bei guten Grafikkarten und Monitoren auch noch bis in den Full-HD-Bereich bei 1920 × 1080 Bildpunkten. Durch die D/A-Umwandlung, die bei vielen Bildpunkten rechenintensiver wird, kann es bei älteren Grafikkarten oberhalb von 1280 × 720 Pixeln eventuell zu einem Stocken kommen und durch die eingeschränkten HF-Eigenschaften eines VGA-Kabels zu Kontrastproblemen. Mit guten VGA-Kabeln oder BNC-Kabeln mit VGA-Anschluss sind jedoch auch noch

höhere Auflösungen wie z. B. 2048x1536 problemlos möglich. Die Grenzen ergeben sich dann hauptsächlich durch die maximale RAMDAC-Frequenz der Grafikkarte, bei neueren Grafikkarten sind 400 MHz üblich.

Verwandtschaft zu DVI

DVI, der digitale Nachfolger von VGA, besitzt zwingend auch einige Pins, in denen ein analoges VGA-Signal übertragen wird. Ob über diese vorhandenen Pins aber ein analoges Signal gespeist wird, entscheidet der Hersteller jeweils. Gekennzeichnet wird dies mit dem Zusatz „I“ oder „A“: DVI-I und DVI-A. Liegt ein analoges Signal vor, können also mit einem simplen Adapter VGA-Geräte auch an DVI-Ausgängen betrieben werden.

HDMI

High Definition Multimedia Interface ist eine seit April 2002 entwickelte drahtgebundene Schnittstelle für die digitale Bild- und Ton-Übertragung in der Unterhaltungselektronik. Sie ersetzt existierende analoge Schnittstellen wie SCART, Composite Video, S-Video und Component Video und überträgt digital in hoher Qualität Video und Audio über ein gemeinsames Kabel. In HDMI ist ein zusammenhängendes Kopierschutz-Konzept (DRM) integriert, was insbesondere in der Anfangszeit auf Kritik stieß.



HDMI basiert auf dem 1999 entwickelten Digital Visual Interface Digital (DVI-D), allerdings sind die Stecker deutlich kompakter, es wird weiterhin Audio und ein Kopierschutz unterstützt. Bei Verwendung geeigneter Kabel oder Adapter und bei Verzicht auf diese Eigenschaften sind DVI-D und HDMI 1.0–1.2 weitgehend kompatibel.

Ursprünglich als Schnittstelle der Unterhaltungselektronik entwickelt, ist HDMI neben DisplayPort zögerlich auch zu einer Schnittstelle von Grafikkarten und Computermonitoren geworden und hat den VGA-Anschluss und Digital Visual Interface in seinen drei Varianten als Computerschnittstelle vollständig

verdrängt. DisplayPort hat dabei Features von HDMI übernommen und HDMI hat Features von DisplayPort übernommen, so dass beide Schnittstellen ähnliche Eigenschaften aufweisen.

HDMI ist eine im Wesentlichen unidirektionale Schnittstelle, in der ein Quellgerät (Blu-ray-, DVD-Player, Spielkonsole, SAT-Receiver, Computer, hochpreisige Smartphones, Tabletcomputer, Camcorder oder Digitalkamera) ein Multimedia-Signal an ein digitales Zielgerät (TV-Gerät, Computermonitor, Videoprojektor, VR-Brillen) überträgt.

Die aktuelle HDMI-Version ist 2.1a, welche am 4. Januar 2022 auf der CES 2022 der Öffentlichkeit vorgestellt wurde.

Geschichte

Die Spezifikation für HDMI wurde von einem Industrie-Konsortium für den Bereich der privat genutzten Unterhaltungselektronik (englisch home entertainment) entwickelt.

Die Gründer des HDMI-Konsortiums Hitachi, Matsushita Electric Industrial (Panasonic, National, Quasar), Philips, Silicon Image, Sony, Thomson und Toshiba begannen am 16. April 2002, gemeinsam den neuen AV-Verbindungsstandard HDMI zu entwickeln. HDMI ist eine Weiterentwicklung von DVI und zu diesem abwärtskompatibel. Beide benutzen dieselbe Signalcodierung TMDS.

HDMI 1.0 wurde so entworfen, dass es einen kleineren Stecker als DVI hat. Außerdem sollte es die Funktionen von DVI um Audioübertragung, erweiterte Unterstützung für YCbCr und um eine benutzergesteuerte Kontrollfunktion (englisch Consumer Electronics Control) erweitern. Der Kopierschutz HDCP 1.1 (High-bandwidth Digital Content Protection), der in der HDMI-Spezifikation vorgesehen ist, wurde von Intel entwickelt. Er soll das Abgreifen des Video- und Audiomaterials innerhalb der Verbindung zwischen Sender und Empfänger verhindern.

Der erste Hersteller, der Ende 2003 HDMI-fähige Komponenten auf den Markt brachte, war Pioneer mit den DVD-Playern DV-668AV und DV-868AVi, dem DVD-Rekorder DVR-920 H-S sowie den Plasmafernsehern PDP-434HDE und PDP-504HDE.

Formate

Der HDMI-Standard unterscheidet in Formate, die ein HDMI-fähiges Gerät zwingend entgegennehmen/ausgeben können muss, und optionale Formate. Die meisten fortgeschrittenen Fähigkeiten (hohe Auflösung, viele Audiokanäle u. ä.) sind optional und müssen von einem Gerät nicht angeboten werden, um als HDMI-konform zu gelten.

In den optionalen Bestandteilen des HDMI-Standards können fortgeschrittene Formate übertragen werden:

Mit seiner hohen Datenübertragungsrate verarbeitet HDMI alle heute bekannten digitalen Video- und Audioformate der Unterhaltungselektronik. HDMI 1.2 überträgt PCM-Audiodaten mit Abtastfrequenzen bis zu 192 kHz mit Abtastbreiten bis zu 24 Bit für max. 8 Kanäle. Für HDMI 1.3 wurden als neue Audioformate Dolby Digital Plus und Dolby TrueHD mit aufgenommen. Die maximale Pixelfrequenz für Videodaten mit Single-Link liegt für HDMI 1.2 bei 165 MPixel/s (Typ A) und für HDMI 1.3 bei 340 MPixel/s (Typ A/C). Damit lassen sich Bildauflösungen bis 2560 × 1600 Pixeln mit 75 Hz ohne Qualitätsverlust übertragen. Das umfasst die in der Unterhaltungselektronik eingeführten Bild- und Tonformate einschließlich HDTV. Mit HDMI 1.3 kam auch die Unterstützung für höhere Farbtiefen von 10 Bit, 12 Bit und 16 Bit pro Farbkomponente (RGB 4:4:4, YCbCr 4:4:4) hinzu. Bisher waren nur 8 Bit pro Komponente

(RGB 4:4:4, YCbCr 4:4:4, YCbCr 4:2:2), 10 Bit und 12 Bit aber nur mit Farbunterabtastung (YCbCr 4:2:2) möglich. HDMI 1.3 unterstützt zusätzlich zu den bisherigen Formaten SMPTE 170M/ITU-R BT.601 und ITU-R BT.709-5 das neue Farbraummodell xvYCC, das im Standard IEC 61966-2-4 definiert ist, und ermöglicht somit einen sehr großen Farbraum zur Verbesserung Darstellung extrem gesättigter Farben bei geeigneten Geräten. Dazu werden spezielle Farbraum-Metadaten übertragen.

Datenübertragungsraten

HDMI 1.2 bietet Datenübertragungsraten von bis zu 3,96 Gbit/s (Typ A, 19-polig; außer Stecker kompatibel zu Single-Link-DVI) bzw. 7,92 Gbit/s (Typ B, 29-polig, nie Bedeutung erlangt; außer Stecker kompatibel zu Dual-Link-DVI). Mit HDMI 1.3 und 1.4 sind bis zu 8,16 Gbit/s (Typ A und C, 19-polig), mit HDMI 2.0 bis zu 14,4 Gbit/s und mit HDMI 2.1 bis zu 42,667 Gbit/s möglich.

Spezifikationen

Die Versionen, die in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet sind, beschreiben die von der HDMI-Organisation vorgegebenen Spezifikationen für die höchst- bzw. bestmöglichen, optionalen Formate, die ein HDMI-verifiziertes Gerät der entsprechenden Version bietet. Die Mindestanforderungen liegen deutlich niedriger. Neue Spezifikationen werden in unregelmäßigen Abständen veröffentlicht. Darin enthalten sind Vorgaben an Eigenschaften der Endgeräte, Kabeleigenschaften und übermittelte Signale und deren Funktion.

Die Kabel wurden anfangs nach dem gleichen Versionsschema wie die Spezifikation nummeriert (bspw. Spezifikation 1.2 führte zu Kabeln mit der Versionsnummer 1.2), da eine höhere Version ein leistungsfähigeres Kabel erforderte. Als in den Spezifikationen ab Version 1.4 keine besseren Kabel definiert wurden, die Kabel im Handel aber mit höheren Versionsnummern bezeichnet wurden und damit eine höhere Leistungsfähigkeit suggerierten, entschied sich die HDMI-Organisation dafür, neue Bezeichnungen für die Kabel zu definieren (siehe Abschnitt HDMI-Kabel-Typen und -Eigenschaften).

HDMI 2.1

Am 4. Januar 2017 wurde erstmals auf der CES in Las Vegas das neue HDMI-Format 2.1 vorgestellt. Am 28. November 2017 wurde der offizielle Standard HDMI 2.1 veröffentlicht.

HDMI 2.1 unterscheidet sich deutlich von allen vorherigen HDMI-Versionen, obwohl die Versionsnummer das nicht unbedingt suggeriert:

- Man verabschiedete sich von einer pixeltaktsynchronen Übertragung und wechselte zu einer reinen Datenübertragung mit festem Takt, wie es bei DisplayPort seit 2006 der Fall ist.
- Als Takte sind 6 GHz (FRL 6x4 bzw. 24 Gbps) und 12 GHz (FRL 12x4 bzw. 48 Gbps) möglich.
- Das freiwerdende Adernpaar für den ehemaligen Pixeltakt wird, wie bei DisplayPort, für die Datenübertragung genutzt.
- Bei der Modulation wechselte man vom 8b10b-Code zum 10 % effizienteren 16b18b-Code.
- Die damit möglichen Übertragungsraten betragen mit $21\frac{1}{3}$ GBit/s (fix) bzw. $42\frac{2}{3}$ GBit/s (fix) etwa das Anderthalbfache bzw. dreifache von HDMI 2.0.
- Weiterhin entfallen die „Zwangspausen“ für die Zeilen- und Bildaustastlücken, auch wenn diese häufig vorher bei TFT-Ansteuerung schon verkürzt waren, die aber immer noch als Altlast der Kathodenstrahlröhrenzeit mitgeschleppt wurden.

Die Abkehr von der Pixeltakt-getriebenen Übertragung (die eine Altlast aus Analogzeiten war) zu einer reinen Datenübertragung erlaubt die Implementierung von Quick Media Switching (Wechsel von Auflösung und Bildrate ohne Unterbrechung), Quick Frame Transport (Übertragung von Frames mit der maximalen Übertragungsrate der Verbindung) und Display Streams Compression (Datenkompression wie bei DisplayPort 1.4) und vereinfacht die Implementierung von Variable Refresh Rate (VRR).

Die Neuerungen sind:

- Weitaus höhere Übertragungsrate (bei Ausschöpfen aller Möglichkeiten ist diese knapp neunmal so groß wie bei HDMI 2.0). Damit sind zum einen weitaus höhere Auflösungen ohne Abstriche (bspw. 4K mit 120 Hz und 10 bit) übertragbar und zum anderen VRR-Modi mit geringerer Übertragungslatenz möglich (2560 × 1440 sind in 0,7 ms statt in 6,2 ms übertragen).
- Unterstützung von höheren Auflösungen und schnelleren Bildwiederholfrequenzen, z. B. von 7680×4320 mit 60 Hz und 3840×2160 mit 240 Hz.
- Es gibt zwei Übertragungsmodi: Der 24Gbps-Modus (FRL 6x4), der die gleichen Anforderungen an Kabel wie HDMI 2.0 bei maximaler Datenrate stellt (HDMI Premium High Speed), aber effektiv nur 21½ GBit/s überträgt und einen 48Gbps-Modus (FRL 12x4), der effektiv 42½ GBit/s überträgt, aber deutlich höhere Ansprüche an eingesetzte Kabel stellt (HDMI Ultra High Speed oder auch 48G genannt).
- Dynamic HDR (HDR dynamic metadata) stellt sicher, dass Videos mit optimalen Werten für Farbtiefe, Detail, Bildhelligkeit, Kontrast und breiterem Farbspektrum angezeigt werden, und zwar auf einer Basis nach jeder einzelnen Szene oder sogar jedes Frames. Dabei werden alle vier dynamischen HDR-Technologien, die bei SMPTE unter der Bezeichnung ST-2094 festgelegt sind und auf der von Dolby entwickelten PQ-Kurve ST-2084 basieren, als Übertragung unterstützt. Das sind Dolby Vision, SL-HDR1 (Philips), Advanced HDR (Technicolor) und HDR10+ (Samsung).
- Enhanced Audio Return Channel (eARC) unterstützt Audio-Formate wie objektbasiertes Audio und ermöglicht Steuerung des Audiosignals einschließlich automatischer Erkennung des Geräts.
- Variable Refresh Rate (VRR): Der VRR-Modus gestattet eine variable Bildwiederholfrequenz, die es einem Grafikprozessor ermöglicht, Bilder sofort nach deren Berechnung anzuzeigen. Damit ist die Anzeige von Spielen und technischen Darstellungen mit geringstmöglicher Latenz ohne Frame Tearing und ohne Stottern möglich.
- Quick Media Switching (QMS): HDMI 2.1 unterstützt den Wechsel von Auflösung und/oder Bildrate ohne Bildaussetzer. FRL ist dafür eine Voraussetzung.
- Quick Frame Transport (QFT): HDMI 2.1 unterstützt eine schnellere Übertragung von Frames unabhängig von der Framerate, nur noch limitiert durch die Übertragungsrate.
- Auto Low Latency Mode (ALLM): HDMI 2.1 unterstützt verschiedene Processing-Modi und deren Wechsel. So kann bei Wiedergabe von Videos Frame-Interpolation verbunden mit höheren Latenzen aktiviert werden und bei Wiedergabe von Spielen diese abgeschaltet werden.
- VESA Display Streams Compression 1.2 (DSC 1.2a): Visuell verlustfreie Komprimierung wie bei DisplayPort

Implementierungsfehler

Im Oktober 2020 deckte das Computermagazin c't (Ausgabe 23/20) einen Fehler in den Chips des Herstellers Panasonic Solutions (Nuvoton Technology) auf. Dieser verursacht, dass AV-Receiver, in denen dieser Chip verbaut ist, Bildmaterial von einem externen Zuspeler unter bestimmten Bedingungen (bspw. in 4K-Auflösung mit 120 Bildern pro Sekunde und erhöhtem Kontrastumfang (High Dynamic Range)) nicht ordentlich zu einem passenden Fernseher weiterleiten (schwarzes Bild).

Betroffen sind unter anderem Produkte von Denon, Marantz und Yamaha.

HDMI 2.1a

Am 4. Januar 2022 wurde auf der CES in Las Vegas das neue HDMI-Format 2.1a vorgestellt. Als neues Feature taucht SBTM (Source-Based Tone Mapping) auf, die anderen erwähnten Neuerungen sind schon Bestandteil des fünf Jahre älteren HDMI 2.1.

SBTM ermöglicht es Zusiellern, die HDR-Fähigkeiten des Displays abzufragen und das Tone Mapping selbst (und damit meist deutlich besser) durchzuführen.

HDMI-Kabel-Typen und -Eigenschaften

Seit etwa November 2010 werden HDMI-Kabel verbindlich in zuerst fünf, inzwischen in neun Klassifikationen eingeteilt.

Laut Lizenzbestimmungen für HDMI-Produkte dürfen diese seit dem 1. Januar 2012 nicht mehr, wie früher üblich, mit Versionsnummern gekennzeichnet werden.

Gleichzeitig wurde ein Verbot für den Verkauf von HDMI-Kabeln mit den alten HDMI-Versionsnummern mit einjähriger Frist bis November 2011 erlassen. Seit 1. Januar 2012 ist auch auf Geräten die Angabe einer HDMI-Versionsnummer verboten, und alle Funktionen, die die Schnittstelle unterstützt, müssen aufgezählt werden, da man von der Versionsnummer keine Rückschlüsse auf die unterstützten Funktionen ziehen kann. Z. B. muss eine Schnittstelle der Version 1.4 nicht mehr Funktionen als eine Schnittstelle der Version 1.0 unterstützen. Das geschah im Zuge der Umstellung auf die neuen Kabelbezeichnungen, um eine bessere Orientierungshilfe bei der Kabelwahl zu gewährleisten. Grund für das Verbot sind die irritierenden Nummern, die häufig den Marketing-Abteilungen der Kabelhersteller entsprungen sind und den Eindruck vermittelt haben, dass nur die neueste Kabelversion allen Anforderungen genüge. Da aber z. B. HDMI-1.3-Kabel dieselben Leistungseigenschaften aufweisen wie 1.4-Kabel, nur ohne zusätzliche HEC-Leitung, reichen auch diese oft aus. Daher ist ein direkter Vergleich der neuen Bezeichnungen mit den alten Nummern nicht möglich.

Auch ein Vergleich der neuen Kabelbezeichnungen mit den verschiedenen HDMI-Spezifikationsversionen ist nicht möglich, da die Spezifikationen auch Anforderungen an Geräte festlegen, die nicht unbedingt von den Kabeln abhängig sind.

HDMI Automotive Standard und HDMI Automotive High Speed

HDMI-Kabel für den Automobilbereich wurden gezielt für die Anforderungen im Fahrzeugbereich entwickelt, sie können zum Beispiel Temperaturschwankungen und Vibrationen besser widerstehen. Für einen besseren Schmutz- und Vibrationsschutz kann der Stecker-Typ E zum Einsatz kommen.

HDMI High Speed

Diese Kabel übertragen Full-HD 3D und Deep Color bis 1080p mit einer Frequenz von mindestens 340 MHz. Die maximal übertragbare Brutto-Datenrate beträgt 8,16 GBit/s (3 TMDS-Verbindungen \times 340 MHz \times 8 Bit pro Datenwort). Nach Abzug des Overhead der verwendeten 8b10b-Kodierung ergibt sich eine Netto-Datenrate von maximal 8,16 GBit/s. Außerdem ist 4K2K (24 Hz) möglich.

HDMI High Speed mit Ethernet/Audio Return Channel

Der HDMI-Ethernet-Channel (HEC) ist ein zusätzlicher Kanal im High-Speed-HDMI-Kabel, der für die Übertragung von 100 Mbit/s-Ethernet-Netzwerksignalen genutzt werden kann.

Dieser Kanal kann auch für die Rückübertragung von Audio-Daten (Audio Return Channel, ARC) dienen und wird dann auch HEAC genannt (HDMI Ethernet and Audio Return Channel).

Ein typischer Anwendungsfall für ARC ist, dass ein Audio/Video-Receiver einen Fernseher via HDMI-Kabel mit Video- und Audiosignalen versorgt. Der Benutzer kann Parameter wie Lautstärke, Balance etc. über die Fernbedienung des Fernsehers einstellen. Zwecks besserer Audiowiedergabe soll diese nicht über den Fernseher selbst erfolgen, sondern über externe Lautsprecher. Herkömmlich würde nun ein separates Kabel (typischerweise TOSLINK (optisch) oder Cinch (analog)) die Audiosignale vom Fernseher zum Audioverstärker führen, an den die Boxen angeschlossen sind. Mit ARC kann dieses separate Kabel eingespart werden: die Audiosignale werden innerhalb des HDMI-Kabels rückgeführt zum Audio/Video-Receiver und die Lautsprecher können dort angeschlossen werden.

HEC/HEAC wurden mit HDMI 1.4 eingeführt. Physikalisch nutzt der Kanal differentielle Signalübertragung über die Leitungen HEC Data+ und HEC Data- (Pin 14 / Pin 19 bei Steckertyp A). HEC Data+ war bis einschließlich Spezifikation 1.3 als „reserviert“ deklariert, HEC Data- nutzt dieselbe Leitung wie die Hot-Plug-Erkennung. Wird nur der Audio-Return-Kanal benötigt, aber kein Ethernet, kann das Audiosignal über die eine Leitung HEC Data+ übertragen werden.

Kabellänge und Kabelqualität

Von der HDMI-Organisation sind bisher maximal zehn Meter lange Kabel vorgesehen. Vereinzelt sind auch Längen bis zu 20 Metern erhältlich, die aber nicht in allen Fällen problemlos funktionieren. Außerdem gibt es spezielle Kabel mit Lichtwellenleitern, die eine Länge bis zu 100 Metern erlauben. Lange Kabel müssen im Allgemeinen bessere Hochfrequenzeigenschaften aufweisen, um eine fehlerfreie Datenrückgewinnung im HDMI-Empfänger zu gewährleisten. Für eine fehlerfreie Übertragung sind die Kabelqualität wie auch die Empfangseigenschaften des HDMI-Empfängers ausschlaggebend. Bei Kabellängen bis zu fünf Metern sind aufgrund der digitalen Übertragung auch minderqualitative Kabel ausreichend.

Ab einer Kabellänge von ca. zehn Metern ist mit Übertragungsfehlern zu rechnen, die man durch qualitativ hochwertige Kabel reduzieren kann. Ob Fehler auftreten, lässt sich aufgrund der bei HDMI verwendeten TMDS-Kodierung sehr einfach an der resultierenden Bildqualität beurteilen. Das kann man durch farbiges „Aufblitzen“ von Bildpunkten (Pixel) oder ganzer Pixelreihen erkennen. Bildrauschen im herkömmlichen Sinn, wie bei der analogen Datenübertragung, lassen sich bei HDMI daher generell ausschließen, sofern der HDMI-Transmitter beziehungsweise der HDMI-Receiver die Videodatenauflösung nicht begrenzt (zum Beispiel 8-Bit anstatt 12-Bit Farbkomponentenauflösung im YCbCr-4:2:2-Format).

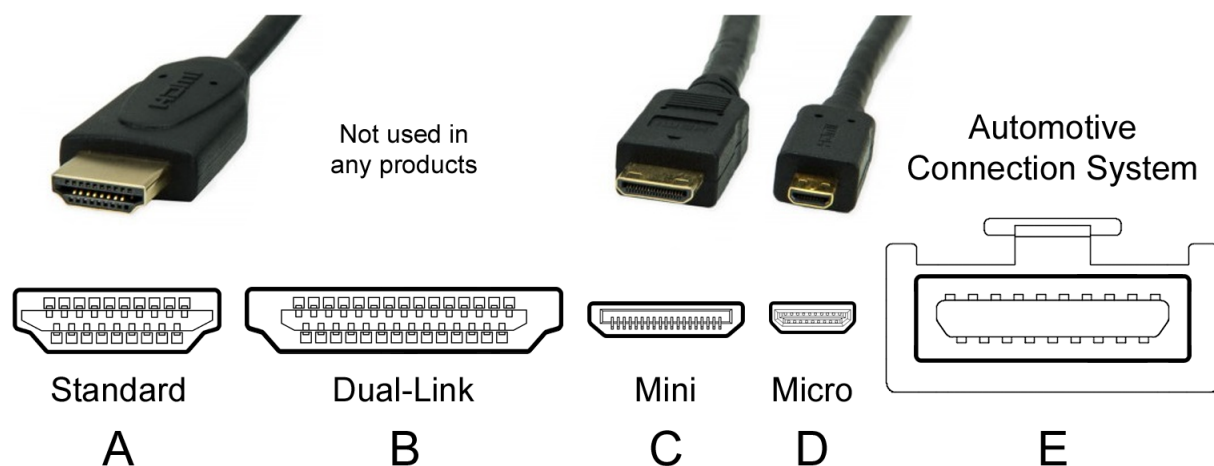
Um die Datenrate für HDMI 1.3 weiter zu steigern, wurden zwei Kabelkategorien mit unterschiedlichen Hochfrequenzeigenschaften definiert. Ein Kategorie-1-Kabel kann Pixelraten bis 74,25 MHz übertragen, ein Kategorie-2-Kabel bis zu 340 MHz. In HDMI 1.3 sind, um eine fehlerfreie Übertragung auch über längere Kabel sicherzustellen, erstmals die Kabeleigenschaften wie Dämpfung, Signallaufzeitdifferenzen und Übersprechen festgelegt. Um der unvermeidbaren Kabeldämpfung entgegenzuwirken, ist bei HDMI 1.3 für Pixelraten über 165 MHz empfängerseits ein Kabelequalizer zur Anhebung der höherfrequenten Signalanteile vorgesehen.

Mit Signalrepeatern (zum Beispiel in einem AV-Receiver) kann die Distanz verdoppelt werden. Für größere Distanzen stehen Extender zur Verfügung, die das Signal wandeln und über Lichtwellenleiter übertragen. Mit entsprechenden Konvertern ist auch eine Wandlung nach HD-SDI und zurück möglich, wobei der Vorteil darin besteht, dass HD-SDI über ein Koaxialkabel mit BNC-Steckverbindern auch größere Strecken überbrücken kann. Der Einsatz von SDI-Verbindungen hat sich vor allem bei professionellen Anwendern, zum Beispiel am Filmset, bewährt.

Stecker

Bei HDMI 1.1/1.2 sind zwei Steckertypen (Typ A und Typ B, etwa 4,5 mm × 13/21 mm Querschnitt) definiert. Für HDMI 1.3 wurde zusätzlich ein kleiner Stecker (Typ C bzw. Mini-Stecker, etwa 2,5 mm × 10,5 mm Querschnitt) für kompakte Geräte mit aufgenommen. In HDMI 1.4 wurde ein noch kleinerer Stecker-Typ D (Micro-Stecker, etwa 5,8 mm × 2,2 mm Querschnitt) definiert. Außerdem ist in den HDMI-1.4-Spezifikationen der Stecker-Typ E definiert, der aber nicht bei 1.4-Kabeln zum Einsatz kommt, sondern nur bei HDMI-Standard-Automotive-Kabeln.

Typ A, C und D basieren auf einer Single-Link-Verbindung, bei der drei TMDS-Signalleitungspaare zur Verfügung stehen. Typ B erlaubt durch eine Dual-Link-Verbindung mit sechs TMDS-Signalleitungspaaren die doppelte Datenrate, fand aber bei HDMI (im Gegensatz zu DVI) nie Verwendung.



Kompatibilität

HDMI ist DVI-Single-Link so ähnlich, dass es bei der Kompatibilität häufig nur Kontakte verbindende Adapter ohne Wandler erfordert. Professionelle Anwender bedienen sich dagegen schon seit Ende der 1990er Jahre der SDI-Schnittstelle. Der Kopierschutz HDCP wird gegebenenfalls vom Videomaterial-Hersteller (z. B. in CSS-codierten DVDs) über Steuerbits aktiviert und erfordert dann laut Vorschrift an beiden Schnittstellen einen Hardware-Chip, der das Videosignal auf der digitalen Ausgangsleitung kodiert

bzw. anschließend im Display dekodiert. Ohne HDCP-Chip bleibt sonst der Bildschirm dunkel (oder zeigt nur farbiges Rauschen), außerdem kann in sogenannten HD-ready-Geräten noch eine evtl. vorhandene analoge Ausgangsschnittstelle (progressive Komponentensignale YPbPr) beeinflusst werden (z. B. nur Standardauflösung), um hochwertige Kopien zu verhindern.

Die DVI-Schnittstelle an HDCP-fähigen neueren Videogeräten (z. B. DVD-Playern) ist daher nicht kompatibel zu DVI-Schnittstellen im Computerbereich, es sei denn, auf diesen Komponenten ist HDCP implementiert (was mit Stand vom Januar 2009 bei vielen PC-Flachbildschirmen der Fall ist). Bei derartigen Geräten, die einen DVI-Eingang mit HDCP-Unterstützung haben, kann mit einem Adapter von HDMI auf DVI das kopiergeschützte Bildsignal ausgegeben werden. Auch Audio kann über DVI ausgegeben und empfangen werden, das Audiosignal wird digital mit dem Bildsignal, wie bei HDMI auch, im TMDS-Signal übertragen.

Mittlerweile sind Grafikkarten mit HDMI-Schnittstelle auf dem Markt, die einen HD-Audio-Chip enthalten, um direkt über den HDMI-Ausgang der Grafikkarte auch Audiosignale mit ausgeben zu können. Dieser Audiochip erscheint im Betriebssystem als zweite Soundkarte und kann auch so genutzt werden. Dadurch können derart ausgestattete Computer im Bedarfsfall direkt mit einem Flachbildfernseher oder HD-Beamer verbunden werden. Das macht die Möglichkeiten des Heimkinos mit einem Home-Theater-PC noch interessanter.

Am 23. August 2005 wurde HDMI 1.2 offiziell verabschiedet, das vollständig abwärtskompatibel zu HDMI 1.0/1.1 ist. Als Erweiterung wurde ein 1-bit-Audiostream aufgenommen, wie er beispielsweise bei der SACD-Anwendung findet. Zudem wurden einige neue sekundäre Videoformate aufgenommen, um beispielsweise höhere Bildwiederholfrequenzen bis 240 Hz und mehr PC-übliche Videoformate zu unterstützen.

- Ein Problem hat sich beim Verbinden verschiedener Fabrikate von Wiedergabegeräten und Bildschirmen ergeben, weil die Industrie die digitalen Bildpegelformate „DVI-PC“ oder „DVI-Video“ (HDMI enthält das gleiche Videoformat wie DVI-Anschlüsse) oft in ihre Geräte implementiert hat, ohne an eine nachträgliche Umstellmöglichkeit zu denken. Der Unterschied: Während bei Computern (DVI-PC) die Helligkeitsschritte von $Y = 0$ bis $Y = 255$ reichen, wird bei Heimelektronik (DVI-Video) ein Bereich unter- bzw. oberhalb der Schwarz- und Weißpegel reserviert (die Spezifikation ITU-601R definiert Schwarz mit $Y = 16$ und Weiß mit $Y = 235$). Nur manche Videoprojektoren und Flachbildschirme können per Einstellungs Menü zwischen PC-Level oder RGB („extended“/„erweitert“) und Video-Level oder YCbCr („Standard“/„normal“) umgestellt werden. Schwarz ist entweder zu hell oder untere Helligkeitsbereiche werden verschluckt (d. h. dunkle Bildbereiche werden ganz schwarz), der Weißpegel ist nicht maximal oder wird übersteuert, alles je nach Gerätekombination. Nur bei zufällig gleicher Auslegung des digitalen Videopegels in beiden Geräten stimmt der Kontrastumfang am HDMI-Eingang, der nicht durch Helligkeits- oder Kontrastregler änderbar ist.
- Ein weiteres Problem hat sich durch die neuen Tonformate wie DTS-HD oder Dolby TrueHD ergeben: Häufig schleifen Flachbildfernseher das HDMI-Audiosignal einfach über S/PDIF durch und machen es so für Soundreceiver zugänglich. Die Datenrate reicht derzeit nicht aus, um die neuen HD-Soundformate 1:1 zu übertragen. Bei DTS-HD wird hier der DTS Core mit 1509,75 kBit/s ausgegeben. Bei anderen Formaten ist ein Echtzeit-Downmix von etwa 6144 kBit/s auf 1536 kBit/s vorgesehen, so dass auch über S/PDIF ein Signal ausgegeben werden kann.

Grundsätzlich geht das jedoch mit entsprechend geringerer Tonqualität einher. Bei LPCM-Mehrkanalton würde nur ein AC3/DTS-Live-Encoder Abhilfe bringen.

DVI

DVI (Digital Video Interface) ist eine Schnittstelle für die digitale und analoge Übertragung von Videodaten. Sie gilt als digitaler Nachfolger des S-VGA-Standards und hat sich über viele Jahre neben HDMI als Verbindung zwischen Computern und Monitoren etabliert.



Der Erfolg des DVI-Standards im Computerbereich liegt vor allem in zwei Faktoren begründet: einfaches Handling und eine gute Bildqualität.

DVI ist für das Hot Plugging ausgelegt. Der Begriff bezeichnet die Möglichkeit, Komponenten im laufenden Betrieb miteinander verbinden und voneinander trennen zu können. Dieser Vorteil kommt vor allem Nutzern von Laptops zugute, die ihr Gerät mobil und an wechselnden Monitoren oder Beamern betreiben.

Auch bei der Bildqualität punktet DVI gegenüber analogen Schnittstellen wie VGA. Der Grund ist einfach: Das digitale Ausgangssignal muss für die Übertragung nicht erst in ein analoges Signal umgewandelt werden. Die Bilddaten bleiben als Resultat über die gesamte Signalkette digital und damit unverfälscht.

Zugunsten durchgängiger Kompatibilität ist DVI zusätzlich in der Lage, analoge Signale zu verarbeiten. So lassen sich zum Beispiel VGA-fähige Monitore über entsprechende Adapter an der DVI-Schnittstelle betreiben.

Die Kompatibilität ist auch an anderer Stelle einer der größten Vorteile von DVI: die Schnittstelle lässt sich zu HDMI kompatibel betreiben und ist daher bestens geeignet, um den Computer beziehungsweise das Notebook mit einem Fernseher zu verbinden, wenn beide Geräte unterschiedliche Schnittstellen aufweisen. InLine® führt zahlreiche qualitätsgeprüfte Adapter für einen nahtlosen Videoübergang zwischen diesen etablierten Standards.

Generell ist dabei zu beachten, dass DVI – anders als HDMI – keine Audiodaten verarbeitet. Der Ton kann bei Bedarf separat, beispielsweise durch ein zusätzliches Cinch-Kabel, übertragen werden.

DVI-D (Digital) & DVI-I (Integrated)

DVI-D überträgt ausschließlich digitale Videodaten, während DVI-I sowohl digitale als auch analoge Signale wiedergeben kann. Beide Kategorien unterscheiden im digitalen Betrieb zwischen einer einkanaligen (Single-Link) und einer zweikanaligen (Dual-Link) Version. Single-Link eignet sich für

Auflösungen bis circa 1600 x 1200 Pixel bei 75 Hertz. Dual-Link ist leistungsfähiger und wird entsprechend für höher auflösende Formate verwendet.

DVI-A (Analog)

DVI-A überträgt ausschließlich analoge Videodaten. In der Praxis kommt DVI-A ausschließlich an Adapterkabeln für VGA zur Anwendung. Anders als bei DVI-D und DVI-I gibt es für DVI-A keine unterschiedlichen Steckertypen. Dieser Unterschied rührt daher, dass für die verschiedenen Funktionen der unterschiedlichen DVI-Varianten nur bestimmte Pins benötigt werden, die jeweils eine feste Funktion erfüllen. Ein Anschluss mit mehr Funktionen verfügt entsprechend über mehr Pins.

DisplayPort

DisplayPort ist ein durch die Video Electronics Standards Association (VESA) genormter, universeller und lizenzfreier Verbindungsstandard für die Übertragung von digitalen Bild- und Tonsignalen. Anwendungsbereich ist im Wesentlichen der Anschluss von Computermonitoren an PCs oder Notebooks.



Entwicklung

Die erste DisplayPort-Spezifikation wurde am 1. Mai 2006 veröffentlicht. Am 11. Januar 2007 wurde die Revision 1.1a veröffentlicht, die zunächst hauptsächlich Korrekturen enthielt. Im April 2007 verabschiedete die VESA die finale Version 1.1, die unter anderem die Unterstützung der Verschlüsselung mittels HDCP 1.3 beinhaltet. Dieser Kopierschutz (DRM) wird bereits bei DVI und HDMI verwendet. Neben HDCP wird auch DPCP (DisplayPort Content Protection) unterstützt.

Version 1.2 wurde am 22. Dezember 2010 veröffentlicht, Neuerungen sind unter anderem die Unterstützung für Multi Stream Transport (MST), Stereoskopie („3D“), die Farbräume xvYCC, sRGB sowie Adobe RGB 1998. Daneben wurde auch die Datenrate des AUX-Channels von 1 Mbit/s auf 720 Mbit/s erhöht, was Einsatzzwecke mit höherem Bandbreitenbedarf erlaubt. Darüber hinaus ist die DisplayPort-Spezifikation ab Version 1.2 nicht mehr frei verfügbar, sondern nur noch gegen Bezahlung oder (ebenfalls kostenpflichtige) Mitgliedschaft in der VESA-Group einsehbar.

Version 2.0 wurde am 26. Juni 2019 veröffentlicht.

Weiterentwicklungen

DisplayPort 1.1

DisplayPort 1.1, auch bekannt unter den Bezeichnungen Dual-mode DisplayPort und DisplayPort++, erlaubt Kompatibilität zu DVI und HDMI, so dass ein Anschluss über preisgünstige Adapter möglich ist, die nur noch eine Anpassung der elektrischen Signalisierungsebene von LVDS auf TMDS vornehmen müssen. Dies erreichen die Grafikchiphersteller Intel, AMD und Nvidia mit einem Trick, der bereits auf der Grafikkarte ansetzt und nicht erst hinter dem eigentlichen Ausgang: Erkennt die Grafikkarte, dass es sich bei dem angeschlossenen Gerät um ein Modell mit DisplayPort handelt, werden die Signale auch in diesem Format ausgegeben. Wird hingegen z. B. ein Adapter auf HDMI verwendet, so signalisiert dies der Karte, intern auf das HDMI-Protokoll umzuschalten. Die Anpassung der unterschiedlichen Signalpegel und Impedanzen der Signalisierungsverfahren LVDS (DisplayPort) und TMDS (DVI/HDMI) auf elektrischer

Ebene erfolgt dann im nachgeschalteten Impedanzwandler/Level-Shifter, der die Signalflanken unverändert durchleitet, jedoch Signalpegel und Impedanz an die Zielschnittstelle anpasst. Diese Unterstützung ist jedoch optional, so dass die Unterstützung der einzelnen Anschlüsse vom Hersteller abhängig ist. Auch Dual-Link DVI und analoges VGA kann man anschließen, technisch funktioniert das genauso wie beim Anschluss eines HDMI-Gerätes. DVI nutzt dabei das gleiche Signal wie HDMI, während die Grafikkarte für VGA ein Analogsignal erzeugen muss. Falls die Grafikkarte dieses Verfahren nicht oder nur für eine begrenzte Anzahl an Anschlüssen unterstützt, ist ein sogenannter aktiver DisplayPort-Adapter nötig (auch als Adapter mit Eyefinity-Unterstützung bezeichnet).

DisplayPort 1.2

DisplayPort 1.2 wurde am 22. Dezember 2009 vorgestellt. Die wesentliche Verbesserung war die Verdopplung der Datenrate von 2,7 Gbit/s auf 5,4 Gbit/s pro Lane für die Darstellung höherer Auflösungen. Neu ist auch die Möglichkeit, mehrere Monitore nach dem Prinzip der Daisy Chain zu verbinden, die unabhängig voneinander ansteuerbar sind. Für diese als Multi-Stream-Transport (MST) bezeichnete Funktion bzgl. der Reihenschaltung von Monitoren benötigt jeder weiterleitende Monitor eine DisplayPort-Out-Buchse. Näher wird auf diese Funktion im Abschnitt Multi-Stream-Transport eingegangen.

DisplayPort 1.3

Gegenüber DisplayPort 1.2 erhöht DisplayPort 1.3, welche am 15. September 2014 freigegeben wurde, die maximale Datenrate um 50 Prozent auf 8,1 Gbit/s pro Lane. Damit können über die verfügbaren vier Lanes nominell bis zu 32,4 Gbit/s übertragen werden (effektiv 25,92 Gbit/s), was ohne Kompression eine maximale Auflösung von 5K (5120×2880) bei 60 fps und 8 bit Farbtiefe erlaubt. Daneben beinhaltet der DisplayPort-Standard in Version 1.3 erstmals eine Kompression durch 4:2:0-Farbunterabtastung, so dass zukünftige UHD-2-Displays mit einer Auflösung von 8K (7680×4320) bei 60 fps und 8 bit Farbtiefe unterstützt werden.

DisplayPort 1.4

DisplayPort 1.4 wurde am 1. März 2016 veröffentlicht. HBR3 mit nominell 32,4 Gbit/s bleibt unverändert die schnellstmögliche Übertragungsrate. Allerdings wurde mit der Unterstützung für Display Stream Compression 1.2 (DSC), Vorwärtsfehlerkorrektur, HDR10, dem Rec. 2020 Farbraum und die Erweiterung der Audiokanäle auf 32 ein Feature-Update durchgeführt.

DisplayPort 2.0

DisplayPort 2.0 wurde am 26. Juni 2019 veröffentlicht. Es wurden drei neue Übertragungs-Modi definiert, die Übertragungsraten bis nominell 80 Gbit/s (effektiv 77,37 Gbit/s) unterstützen, was eine Übertragung von 8192 × 4320 mit 60 Hz und 12 bit pro Farbkanal ohne Kompression erlaubt. Es wurde von der 8b10b-Kodierung auf eine ca. 20 % effizientere 128b/132b-Kodierung gewechselt.

Es werden folgende drei Übertragungsraten definiert, die unterschiedliche Anforderungen an Grafikkarte, Monitor und insbesondere an die verwendeten Kabel stellen:

- UHBR 10: mit einer Baudrate von 10 Gbit/s pro Lane und 40 Gbit/s unkomprimierter Datenrate bei Nutzung von 4 Lanes (effektiv 38,69 Gbit/s)
- UHBR 13.5: mit einer Baudrate von 13,5 Gbit/s pro Lane und 54 Gbit/s unkomprimierter Datenrate bei Nutzung von 4 Lanes (effektiv 52,22 Gbit/s)
- UHBR 20: mit einer Baudrate von 20 Gbit/s pro Lane und 80 Gbit/s unkomprimierter Datenrate bei Nutzung von 4 Lanes (effektiv 77,37 Gbit/s)

DisplayPort 2.1

DisplayPort 2.1 wurde am 18. Oktober 2022 veröffentlicht. Als Neuerungen werden angegeben:

- Es gibt kompatible Anpassungen des Protokolls an USB 4.0.
- Weiterhin wird ein Panel-Replay-Modus unterstützt.

Letzteres gab es schon bei DisplayPort 2.0, Neuerungen werden zunehmend mehrfach als Neuerungen verkauft.

Integrierte Standards

Display Stream Compression

Bei DSC handelt es sich um eine verlustbehaftete Kodierung mit einer maximalen Kompressionsrate von 1:3. Die Kompression soll visuell nicht sichtbar sein. Durch DSC ist DisplayPort 1.4 in der Lage, 8K UHD (7680 × 4320 Pixel) mit 60 Hz und mit 10 Bit HDR Video bzw. 12 bit wiederzugeben. Für 4K UHD (3840 × 2160 Pixel) und 12 Bit-HDR sind Bildwiederholungsraten bis 240 Hz möglich.

Multi-Stream-Transport

Multi-Stream-Transport (MST) wurde mit dem DisplayPort 1.2-Standard eingeführt. Er ermöglicht mit einem DP-Port-Ausgang mehrere unabhängige Displays anzusteuern. Im ausgegebenen Datenstrom sind mehrere Videoströme multiplext. MST-Hubs können diesen Datenstrom auf mehrere Displays aufteilen. Häufig sind diese in Monitoren selbst enthalten – zu erkennen an einem DP-Out-Anschluss, an dem ein weiterer DP-Monitor angeschlossen werden kann. Das Protokoll unterstützt bis zu 63 Displays, allerdings steht als kumulative Übertragungsrate max. die des verwendeten Standards (DP 1.2: 17,28 Gbit/s, DP 1.3/1.4: 25,92 Gbit/s) zur Verfügung. Darüber hinaus beträgt die maximale Anzahl von Verbindungen zwischen der Quelle und einem Gerät (d. h. die maximale Länge einer Verkettung) 7. Rückwirkend wurde mit der Veröffentlichung des neuen MST der Standard-Single-Display-Betrieb als „SST“-Modus (Single-Stream-Transport) bezeichnet.

Daisy-Chaining ist eine Funktion, die von jeder Zwischenanzeige speziell unterstützt werden muss. Nicht alle DisplayPort 1.2-Geräte unterstützen dies. Daisy-Chaining erfordert einen dedizierten DisplayPort-Ausgangsanschluss auf dem Display. Standard-DisplayPort-Eingangsanschlüsse der meisten Displays können nicht als Daisy-Chain-Ausgang verwendet werden. Nur die letzte Anzeige in der Daisy Chain muss die Funktion nicht speziell unterstützen oder über einen DP-Ausgangsanschluss verfügen. DisplayPort 1.1-Anzeigen können auch an MST-Hubs angeschlossen werden und Teil einer DisplayPort-Verkettung sein, wenn es sich um die letzte Anzeige in der Kette handelt.

Die Software des Hostsystems muss auch MST unterstützen, damit Hubs oder Daisy Chains funktionieren. Während Microsoft-Windows-Umgebungen dies vollständig unterstützen, unterstützen Apple-Betriebssysteme keine MST-Hubs oder DisplayPort-Verkettung (Stand macOS 10.15 („Catalina“)).

DisplayPort-zu-DVI- und DisplayPort-zu-HDMI-Adapter/-Kabel funktionieren möglicherweise über einen MST-Ausgangsport. Die Unterstützung hierfür hängt vom jeweiligen Gerät ab.

MST wird vom alternativen USB-DisplayPort-Typ-C-Modus unterstützt, sodass Standard-DisplayPort-Daisy-Chains und MST-Hubs von Typ-C-Quellen mit einem einfachen Typ-C-zu-DisplayPort-Adapter funktionieren.

Mini DisplayPort und Thunderbolt

Im Oktober 2008 führte Apple eine kleinere, proprietäre Variante ein, den Mini DisplayPort, dessen Spezifikationen der Hersteller im November 2008 unter kostenloser Lizenz veröffentlichte, um seine Verbreitung zu fördern. Dieser Mini DisplayPort wurde im November 2009 in die VESA-Spezifikation 1.1a übernommen.

Im Februar 2011 stellten Intel und Apple eine mechanisch und elektrisch mit Mini DisplayPort abwärtskompatible Anschlussbauform namens Thunderbolt vor. Dies ist kein reiner Monitoranschluss mehr, sondern eine universelle Datenschnittstelle in der Art von USB oder FireWire.

Thunderbolt

Thunderbolt (englisch für Donnerkeil oder Blitz) ist ein besonders vielseitiges Schnittstellen-Protokoll um die Übertragung von Strom, Daten, Bild und Ton an Peripheriegeräte wie Monitore und Festplatten in einem Kabel zu vereinen. Thunderbolt wurde von Intel in Zusammenarbeit mit Apple zunächst unter dem Codenamen Light Peak entwickelt. Technisch handelt es sich um eine Kombination aus DisplayPort und einer auf PCI Express basierenden Schnittstelle, USB-C wird als Stecker verwendet.



Vorangegangen war die Übergabe der Lizenzen vom Erfinder Intel an USB-IF, so dass alle Hersteller zukünftig lizenzfrei Thunderbolt einsetzen können.

USB4 Gen 3x2 wurde auf der Basis von Thunderbolt 3 entwickelt. Nach der Version 4 wird USB4 Gen 4x2 bzw. Thunderbolt 5 entwickelt, das 80 Gbps bidirektional bzw. 120 Gbps uni-directional unterstützen soll.

Entwicklung

Thunderbolt 1

Die Thunderbolt-Schnittstelle wurde auf der Hausmesse IDF 2009 erstmals intern und am 24. Februar 2011 offiziell vorgestellt. Aus Kostengründen wurde zunächst auf eine optische Übertragung verzichtet, stattdessen wird eine elektrische Übertragung über Kupferkabel verwendet. Da Thunderbolt aber aktive Kabel verwendet – das heißt, in den Steckern der Kabel befindet sich Elektronik, die die physische Ebene der Übertragungsstrecke (das Übertragungsmedium) vor dem Gerät verbirgt – wären alle Geräte auch mit optischen Kabeln kompatibel, falls diese eingeführt werden sollten. Mechanisch und elektrisch ist Thunderbolt abwärtskompatibel mit dem DisplayPort mit Mini-DisplayPort-Steckern.

Die ersten mit dieser Technologie ausgestatteten Geräte waren Notebooks der Reihe MacBook Pro von Apple, die im Februar 2011 auf den Markt kamen. Thunderbolt hätte sich nach den Plänen von Intel als universeller Anschluss durchsetzen sollen, das gelang jedoch nicht. Stattdessen wurde USB zur Standard-Schnittstelle. Thunderbolt basiert auf mehreren parallelen bidirektionalen Kanälen, auf denen seriell Daten übertragen werden. Dabei werden existierende Protokolle wie DisplayPort und PCI Express verwendet. Zunächst (das heißt, nicht bei Thunderbolt 2) gibt es zwei bidirektionale Kanäle mit Transferraten von 10 Gbit/s, die Technik bietet aber Potenzial für weit höhere Datenraten; Intel nannte im Jahre 2009 das Ziel, 100 Gbit/s innerhalb von zehn Jahren zu erreichen. Außerdem kann die Technik unterschiedliche Protokolle gleichzeitig unterstützen, wodurch sie flexibler einsetzbar wird. Elektrische Kabel werden von Intel auf bis zu drei Meter spezifiziert, optische Kabel würden, so sie existierten, größere Leitungslängen von über 10 Metern ermöglichen.

Thunderbolt-Dockingstationen sollen USB-Dockingstationen ersetzen und die bisherigen Nutzungseinschränkungen eines generischen Portreplikators nicht mehr aufweisen.

Seit dem Jahr 2012 ist Thunderbolt auch auf Windows-Systemen verfügbar. Die Thunderbolt-Schnittstelle ist eine Alternative zum (brutto) etwa halb so schnellen USB-3.0-Bus. USB hat aber die Vorteile, kompatibel zu den weit verbreiteten älteren USB-Schnittstellen zu sein sowie eine optional höhere Betriebsspannung bzw. Leistung zu bieten. Darüber hinaus kostet USB auf dem Zubehörmarkt deutlich weniger.

Thunderbolt 2

Im Juni 2013 stellte Intel die nächste Thunderbolt-Generation namens Thunderbolt 2 vor, basierend auf dem Falcon Ridge genannten Controller. Der Produktionsbeginn war Ende 2013. Sie bietet eine Datenrate von 20 Gbit/s, was durch Zusammenlegung der beiden bisher bereits 10 Gbit/s schnellen Daten- und Display-Kanäle ohne Änderungen an der Geschwindigkeit möglich wird. Die verfügbare Bandbreite kann so flexibler genutzt werden. Thunderbolt 2 wurde im Juni 2013 durch Apple erstmals auf der WWDC für den neuen Mac Pro angekündigt.

Thunderbolt 3

Mitte 2015 wurde vom Thunderbolt-Konsortium die dritte Version vorgestellt. Sie besitzt einen drehbaren USB-C-Stecker mit einer USB-3.1 Gen2x1 (10 Gbit/s) Spezifikation und einer gesamten Übertragungsrate von bis zu 40 Gbit/s durch die Implementierung von PCI-Express 3.0 über 4 Lanes. USB-3.1 Gen2x2 wird nicht unterstützt. Dabei wurde als Anforderung die reine Datenübertragung auf 16 Gbit/s festgelegt.

Thunderbolt 4

Im Januar 2020 kündigte Intel Thunderbolt 4 auf der US-Messe Consumer Electronics Show (CES) an. Für den Markt war diese Meldung überraschend, weil Intel den Thunderbolt-Standard seit dem 4. März 2019 der Standardisierungsorganisation USB Implementers Forum (USB-IF) übergeben hat, welche USB-Standards herausbringt und Thunderbolt als technische Basis für die Version USB 4 benutzt. Allerdings sind im Standard USB4 viele Bestandteile optional, und für den Kunden ist nicht eindeutig zu erkennen, welche Variante verwendet wurde. Hingegen ist die Erfüllung der folgend genannten Bestandteile zwingend, zu denen sich die Hersteller zur Zertifizierung verpflichten müssen, um dem Standard Thunderbolt 4 zu genügen:

- Mindest-Übertragungsgeschwindigkeit von 40 Gbit/s (wie Thunderbolt 3)
- Thunderbolt 4 Anschlüsse müssen mindestens in der Lage sein, ein 8K-Signal oder zwei 4K-Signale gleichzeitig zu übertragen
- Die Möglichkeit, das Aufladen des Laptops über den Anschluss zu ermöglichen, sofern dieses darauf ausgelegt ist, dass sein Netzteil nicht mehr als 100 Watt zu liefern benötigt
- Ein Peripheriegerät, das an einem Thunderbolt-4-Anschluss angeschlossen ist, muss in der Lage sein, den Computer aus dem Ruhezustand zu wecken
- Die Bandbreite für reine Datenübertragungen per PCIe liegt verbindlich bei vier PCIe-Lanes mit 32 Gbit/s

Thunderbolt 5

Die Thunderbolt-5-Generation hat die Fähigkeit, durch Nutzung von USB-C 120 Gbit/s zu übertragen. Darüber hinaus ist sie in der Lage, TB5-kompatible Geräte mit einer Leistung von 140 bis 240 Watt zu laden. Thunderbolt 5 nutzt die gleiche Technologie wie USB4 Version 2.0. Über einen Thunderbolt-5-Anschluss können beispielsweise zwei in Reihe geschaltete 6K-Displays mithilfe von Displayport 2.1 betrieben werden.

Die Zertifizierung Thunderbolt 5 verpflichtet Hersteller zu folgenden Standards:

- PAM-3 sorgt für eine gesteigerte Datenübertragung:
 - bidirektionale Übertragungsrate bis zu 80 Gbit/s.
 - asymmetrischer Modus mit bis zu 120 Gbit/s Übertragungsrate in eine Richtung bei bis zu 40 Gbit/s in Gegenrichtung
- min. 140 Watt bis zu 240 Watt Leistung

Zukünftige Versionen

Intel arbeitet bereits an einer neuen Version von Thunderbolt, die aber noch nicht finalisiert ist. Jedoch soll auch zukünftig ein wesentlicher Teil der Funktionen verpflichtend sein, der bei USB nur optional ist. Unter anderem soll eine nochmals höhere Übertragungskapazität garantiert werden, sowie Displayport in Version 2.1.

Kompatibilität

Thunderbolt 1/2

Thunderbolt ist nicht kompatibel mit Mini DisplayPort, obwohl sie dieselben Stecker/Buchsen verwenden. Wenn die Quelle Mini DisplayPort ist, funktionieren Thunderbolt-Kabel nicht, sowie bei einem Thunderbolt-Display funktionieren Mini-DisplayPort-Kabel nicht.

Thunderbolt 3/4

Thunderbolt 3/4 ist im Gegensatz zu USB 4.0 nicht abwärtskompatibel mit USB 3.2 Gen2x2 (20Gbps) und kann via USB 3.2 nur eine maximale Übertragungsrate von 10Gbps (USB 3.1 Gen2x1) nutzen. USB 4.0 ist abwärtskompatibel mit Thunderbolt 3, jedoch sind einige Features bei USB 4.0 nur optional. Um gewünschte Features nutzen zu können, wird entsprechende Hardware und Betriebssystemsoftware bei Sender, Kabel und Empfänger benötigt.

Adapter

Apple ist der einzige Anbieter eines bidirektionalen Adapters für Thunderbolt-2-Geräte zu USB-C-Buchsen, der beispielsweise auch für Festplatten funktioniert, hingegen werden Mini Display Port zu USB-C-Adapter (zur Bildschirmübertragung) ausschließlich von anderen Herstellern, wie InLine, DeLOCK, Club 3D oder StarTech hergestellt.

Funktionsweise

Thunderbolt wird als Controller in Geräte integriert. Die erste Version basierte auf Kupferleitungen, in späteren Versionen kam ein Modul zur Umwandlung optischer und elektrischer Signale hinzu. Reihenschaltungen von bis zu sechs Peripheriegeräten ohne Leistungsverlust sind ebenfalls möglich. Miteinander verbundene Thunderbolt-Chips arbeiten mit einem synchronen Taktsignal. Um Laufzeitprobleme zu vermeiden, sollen die Timer bei maximal sieben Hops einer Thunderbolt-Gerätekette nur bis zu acht Nanosekunden voneinander abweichen.

Ein Thunderbolt-Kabel ist technisch sehr aufwendig. In den zwei Steckern eines Kabels sind zwölf Chips verbaut (Stand 2012). Dies erklärt das längliche und klobige Design der Stecker sowie die Erhitzung im Betrieb.

Sicherheitsproblem

Steckt man ein Gerät an, besteht die Möglichkeit des Speicherdirektzugriffs (DMA) – lesend und schreibend. Dieses Einfallstor soll durch IOMMU auf Host-Seite begrenzt werden, jedoch unterstützen unter Windows nur Windows 10 Enterprise und Windows 11 Enterprise IOMMU. Aktiv ist es normalerweise ohnehin nicht. Unter Linux ist IOMMU im Kernel unterstützt, aber in allen gängigen Distributionen inaktiv.

Spezifikationen

Thunderbolt 3

- Thunderbolt
 - 40-Gbit/s-Thunderbolt-3 – verdoppelte Geschwindigkeit gegenüber Thunderbolt 2
 - 4 PCI-Express-3.0-Lanes (= 32 Gbit/s), beispielsweise für externe Grafikkarte (eGPU)
 - Thunderbolt-Netzwerk – 10-Gbit/s-Ethernet zwischen Computern
- USB – kompatibel mit vorhandenen USB-Geräten und -Kabeln
 - USB 3.1 Gen 2x1 (10 Gbit/s)
 - USB-C-Steckverbinder und Kabel (klein, verpolungsgeschützt durch 2-fache Rotationssymmetrie)
- DisplayPort – kompatibel mit vorhandenen DisplayPort-Geräten und -Kabeln
 - 8 DisplayPort-1.2-Lanes (HBR2 (High Bitrate) und MST (Multi-Stream Transport))
 - unterstützt zwei 4K-Displays (4096 × 2160 30bpp @ 60 Hz)
 - verbindet DVI-, HDMI- und VGA-Displays über Adapter
- Stromversorgung (basiert auf USB Power Delivery)
 - bis zu einer Leistung von 100 Watt
 - 15 Watt für vom Bus versorgte Geräte
- Daisy Chain (Durchschleifen) von bis zu sechs Geräten
- geringste Latenz für PCI-Express-Audioaufnahme

Thunderbolt 4

- Thunderbolt
 - 40-Gbit/s-Thunderbolt-4 – gleiche Geschwindigkeit wie Thunderbolt 3
 - 4 PCI-Express-3.0-Lanes (= 32 Gbit/s), beispielsweise für externe Grafikkarte (eGPU)
 - Thunderbolt-Netzwerk – 10-Gbit/s-Ethernet zwischen Computern
- USB – kompatibel mit vorhandenen USB-Geräten und -Kabeln
 - Basierend auf USB 4 mit allen Funktionen Pflicht
 - USB-C-Steckverbinder und Kabel (klein, verpolungsgeschützt durch 2-fache Rotationssymmetrie)
- DisplayPort – kompatibel mit vorhandenen DisplayPort-Geräten und -Kabeln
 - 8 DisplayPort-Lanes (HBR2 (High Bitrate) und MST (Multi-Stream Transport))
 - unterstützt zwei 4K-Displays (4096 × 2160 30bpp @ 60 Hz) und neu nun ein 8K-Display (7680 × 4320).
 - verbindet DVI-, HDMI- und VGA-Displays über Adapter
- Stromversorgung (basiert auf USB Power Delivery)

- bis zu einer Leistung von 100 Watt
- 15 Watt für vom Bus versorgte Geräte
- Hub-Support statt nur Daisy Chain (Durchschleifen). Rückwärtskompatibel.
- geringste Latenz für PCI-Express-Audioaufnahme

Firewire

FireWire, i.LINK oder 1394 ist ein historischer Bus für serielle Datenübertragung.

1394 ist die Bezeichnung des Institute of Electrical and Electronics Engineers und seit der Spezifikation von 1995 ein Standard. FireWire ist die entsprechende Marke von Apple, dessen Entwicklung 1986 begann. i.LINK ist eine zusätzliche Marke von Sony. Nutzungsrechte beider Marken vergab bis zu ihrer Auflösung 2015 die 1394 Trade Association.



Nutzungsrechte grundlegender Patente vergibt die MPEG Licensing Administration. Die Zusammenlegung wurde 1999 von Apple, Compaq, Panasonic, Philips, Sony, STMicroelectronics und Toshiba vereinbart. Die Patente sind im Jahr 2020 abgelaufen.

Erst Ende der 1990er Jahre wurden Apple Macintosh und wenige andere Computer mit FireWire ausgeliefert, als Apple mit 1 Dollar Lizenzgebühr pro Anschluss überraschte. Zuvor erhielten Hersteller für 7500 Dollar eine pauschale Lizenz. Vollständige Marktdurchdringung hatte FireWire damals bereits bei DV-Camcordern erreicht, es folgte eine Kampfansage durch die einsetzende Weiterentwicklung des Universal Serial Bus. Nachdem auch Apple sich ab 2008, zugunsten von USB und Thunderbolt, schrittweise von der Schnittstelle verabschiedet hat, spielt FireWire am Markt keine Rolle mehr.

Im Frühjahr 2004 wurde die Spezifikation für Wireless FireWire verabschiedet. Sie sah eine zusätzliche Schicht, den Protocol Adaptation Layer (PAL), für FireWire über IEEE 802.15.3 vor (das ist ein Standard für Wireless Personal Area Network, WPAN). Geplant war, zum Beispiel DVD-Spieler und Soundsysteme kabellos miteinander und auch mit einem kabelgebundenen Netzwerk zu verbinden.

Entwicklung

Die zugrundeliegende Idee für FireWire geht bei Apple bis 1986 zurück; es dauerte jedoch fast ein Jahrzehnt, bis ein Standard verabschiedet wurde. Ursprünglich (1995) gab es die drei Geschwindigkeitsklassen S100, S200 und S400 für Kabelverbindungen mit den bekannten sechspoligen Steckern, außerdem S25 und S50 für FireWire-Backplanes. Im Jahre 2000 kam mit IEEE 1394a der von Sony „i.Link“ genannte vierpolige Stecker hinzu. Ferner beinhaltet IEEE 1394a verschiedene Korrekturen und Leistungsverbesserungen bei weiterhin maximal S400. Seit 2002 gibt es den Nachfolger IEEE 1394b mit S800, S1600 und S3200. Er führt eine neue Art der Signalisierung und neue Kabel mit neunpoligen Steckern ein. Seit 2003 ist S800-Hardware verfügbar, die in der Regel als „FireWire 800“ vermarktet wird. Auch die maximale Kabellänge ist mit 100 m dank des neuen Kodierverfahrens 8b10b deutlich erhöht

worden. Ab 2007 stand die Einführung von S3200 mit einer Übertragungsrate von 3,2 Gbit/s über die bisherigen S800-Kabel an.

Architektur

Maximal sind 63 Geräte pro Bus möglich. FireWire IEEE 1394b unterstützt Ringtopologie. Bis zu 1023 Busse können mit Brücken verbunden werden, so dass insgesamt $63 \cdot 1023 = 64\,449$ Geräte verbunden werden können. Die maximale Länge einer S400-Verbindung zwischen zwei Geräten beträgt 4,5 Meter. Bei der Verwendung von S200 erhöht sich der Maximalabstand auf 14 Meter. Bei FireWire nach IEEE 1394b sind als weitere Verbindungsarten Netzkabel, Plastik- und Glasfaser definiert worden, die eine Kabellänge zwischen Geräten von bis zu 72 Meter gestatten. Anders als der Universal Serial Bus (USB) erlaubt FireWire die direkte Kommunikation aller Geräte untereinander (Peer-to-Peer) ohne einen Host.

Übertragungsrate

Die Zahlen hinter dem S bzw. „FireWire“ geben die gerundete Transferrate in Megabit pro Sekunde wieder. Die exakte Datenrate der Basisversion (S100) beträgt $98.304.000 \text{ Bit/s} = 96.000 \times 1024 \text{ Bit/s} = 12.000 \times 1024 \text{ Byte/s}$.

Einsatzgebiete

Haupteinsatzgebiete

Eingesetzt wurde FireWire in den 2000er-Jahren vor allem in der Tontechnik und Videotechnik (professionelle Audio- und Videokarten), aber auch zum Anschluss externer Massenspeicher wie DVD-Brenner, Festplatten oder zur Verbindung von Unterhaltungselektronik-Komponenten. Beispielsweise bei Sony unter dem Namen „i.LINK“ und Yamaha mit „mLAN“. Auch sehr viele Audio-Interfaces für den Einsatz in der Musikproduktion wurden für den FireWire-Anschluss angeboten.

FireWire 400 (1394a) ist auf 400 Mbit/s beschränkt. Das neunpolige FireWire 800 (1394b) ist auf 800 Mbit/s beschränkt. USB 2.0 ist mit 480 Mbit/s nominell schneller als FireWire 400. Diese bei FireWire 400 und USB 2.0 theoretisch möglichen Transferraten werden durch den Protokoll-Overhead beispielsweise bei einer externen Festplatte nicht erreicht. Die Bridge-Chips in den externen Gehäusen beschränkten anfangs sowohl FireWire als auch USB. Bei FireWire 800 können 720 Mbit/s und mehr erreicht werden. Eine schnellere Alternative zu FireWire 800 waren zu jenem Zeitpunkt externe SATA-Gehäuse, die dann ohne Bridge-Chips auskamen und somit direkt auf die Hardware zugreifen konnten.

Die Stromversorgung über FireWire ist mit 1,5 Ampere bei 8 bis 33 Volt spezifiziert. Externe Festplatten können daher problemlos ohne eigenes Netzteil an einem sechs- oder neunpoligen FireWire-Port betrieben werden. USB bis 2.0 ist mit maximal 0,5 Ampere bei 5 Volt hingegen nicht auf den hohen Einschaltstrom von Festplatten ausgelegt und macht deshalb zumindest eine präzise technische Vorbereitung erforderlich.

Mit der Vorstellung von USB 3.0 im Jahr 2008 galt FireWire als veraltet. Die Bruttodatenrate von 5 GBit/s übertraf auch die von FireWire S3200. USB 3.1, welches im Jahr 2015 spezifiziert wurde, erreicht bereits 10 GBit/s. Dabei stellt es elektrische Leistungen im Bereich von 10 Watt ($5 \text{ V} \times 2 \text{ A}$) bis 100 Watt ($20 \text{ V} \times 5 \text{ A}$) bereit.

Automobilindustrie

Die Industrievereinigung IDB-Forum setzte sich für die Verwendung von FireWire-Schnittstellen für Multimediasysteme im Automobil ein. Die Verwendung sollte die bereits etablierten Schnittstellen wie

MOST-Bus ergänzen und es dem Benutzer erlauben, Standardgeräte wie zum Beispiel Videokameras im Auto anzuschließen.

Da im Automobil die Steckverbinder besondere Anforderungen erfüllen müssen, wurden vom IDB-Forum spezielle Verbinder definiert. Der IDB-1394b-Stecker basierte auf dem neunpoligen IEEE-1394b, erweiterte diesen aber um eine Rast-Arretierung gegen Kabelabfall. Des Weiteren wurde ein Führungsrahmen definiert, der die mechanische Stabilität der Buchse garantierte.

Geräteadressierung und Bus-Management

FireWire kennt keinen definierten zentralen Host. Im Gegensatz zu USB hat jedes Gerät die technischen Voraussetzungen, Controller zu werden. Knoten-IDs und Aufgabenverteilung im Bus-Management werden jedes Mal, wenn ein Gerät zum Bus hinzugefügt oder entfernt wird, automatisch zwischen allen Geräten ausgehandelt.

Die Adressierung besteht aus insgesamt 64 bit und ist der Norm ISO/IEC 13213 (ANSI/IEEE 1212) entlehnt. Davon werden 10 bit für Netzwerk-IDs (Segment-IDs) und 6 bit für Knoten-IDs belegt. Die übrigen 48 bit werden zur Adressierung der Geräte-Ressourcen (Speicher, Register) verwendet.

Der Standard IEEE 1394.1 zur Kopplung mehrerer Bussegmente ist bereits seit 2001 verabschiedet. Die konkrete Umsetzung in sogenannten Bus Bridges verlangt, aber spezielle FireWire-Chipsätze, die im Gegensatz zur bislang verwendeten Hardware mehr als nur ein lokales Bussegment adressieren können. Mangels Bedarfs an derart großen FireWire-Netzwerken sind diese speziellen ICs aktuell (Januar 2010) nicht am Markt verfügbar, so dass IEEE 1394.1 zurzeit nicht genutzt werden kann.

Das Gerät mit der höchsten Knoten-ID eines Segments ist dessen Root-Knoten. Es ist verantwortlich für asynchrone Arbitrierung und, als sogenannter Cycle Master, für die Synchronisierung aller Geräte für isochrone Übertragungen. Falls ein Gerät mit entsprechenden Fähigkeiten am Bus vorhanden ist, gibt es ferner den Isochronous Resource Manager zur Verwaltung von Kanälen und Datenraten, den Bus Manager unter anderem für Optimierung der Datenrate sowie den Power Manager zur Steuerung von Stromspar-Funktionen.

Hauptmerkmale

IEEE 1394a („FireWire 400“)

- 100, 200 oder 400 Mbit/s Übertragungsrate
- Geräte können bei laufendem Betrieb angeschlossen werden und werden automatisch erkannt: „hot plug“ und „hot unplug“
- integrierte Stromversorgung für Geräte (8 bis 33 V DC, 1,5 A, max. 48 W), außer der vierpoligen Variante, die keinen Strom liefert
- Anschluss über Shielded Twisted Pair (STP)
 - dünnes und damit flexibles sechsadriges Kabel (vier Adern für Datentransfer, zwei für Stromversorgung) oder
 - vieradriges Kabel (vier Adern für Datentransfer, keine Stromversorgungsleitungen)
- keine Terminatoren an den Kabelenden erforderlich
- Datenübertragung im Halbduplex-Verfahren
- 4,5 Meter max. Entfernung zwischen zwei Geräten (bei 400 Mbit/s)
- Gesamtlänge eines „Daisy-Chain“-Strangs maximal 72 Meter
- bis 63 Geräte anschließbar je Bus (bis zu 16 pro „daisy chain“-Strang)

- bis zu 1023 Busse über Brücken zusammenschließbar
- paketorientierte Datenübertragung
- schneller isochroner Modus
- Geräteadressierung automatisch (keine Jumpereinstellungen an den Geräten oder ID-Schalter notwendig)

IEEE 1394b („FireWire 800“)

Merkmale wie 1394a mit folgenden Erweiterungen und Änderungen:

- 800 Mbit/s Übertragungsrate
- neues, neunadriges Kabel und neue Stecker
- neues Arbitrierungsverfahren (Protokoll) BOSS (Bus Ownership / Supervisor / Selector)
- andere Signalkodierung und Signalpegel, „beta-Mode“
- Abwärtskompatibilität zu 1394a durch bilinguale Chips (auch Betrieb ausschließlich im neuen „beta-Mode“ möglich, dadurch allerdings keine Abwärtskompatibilität mehr)
- erlaubt den Einsatz verschiedener Kabelmaterialien (zum Beispiel Lichtwellenleiter aus Glasfaser, UTP)
- erlaubt längere Kabelverbindungen (in Abhängigkeit vom Kabelmedium, zum Beispiel 100 m bei Verwendung von UTP-Kabeln bis S100)

IEEE 1394–2008 („FireWire S1600 und S3200“)

Im Oktober 2008 wurde unter der Bezeichnung IEEE 1394–2008 eine vollständig überarbeitete Version des Standards veröffentlicht. Sie fasst den Basisstandard IEEE1394-1995 sowie die beiden Erweiterungen IEEE1394a-2000 und IEEE1394b-2002 in einem konsistenten Dokument zusammen. Zudem wurden von den Mitgliedern der 1394 Trade Association in den ursprünglichen Standards zahlreiche Fehler entdeckt und beseitigt. Als wesentliche Neuerung wurde die elektrische Spezifikation für eine Übertragungsrate von 3,2 Gbit/s hinzugefügt. IEEE1394-2008 ist die nun gültige Version des FireWire-Standards, die älteren Dokumente des IEEE sollen zukünftig nicht mehr verwendet werden. Im Jahr 2012 wurde FireWire S3200 eingestellt.

Sicherheitsprobleme

Die OHCI-Spezifikation (Open Host Controller Interface) beinhaltet eine Betriebsart für FireWire-Controller, in der FireWire-Geräte den Hauptspeicher eines Rechners auslesen oder überschreiben können (Direct Memory Access, DMA). Wird diese Betriebsart von einem Treiber konfiguriert, werden Lese- und Schreibanfragen autonom von der Hardware ausgeführt, ohne Software auf diesem Rechner zu involvieren. Dies ermöglicht weitgehende Kontrolle des Rechners durch andere am FireWire-Bus angeschlossene Teilnehmer. Zumindest in der voreingestellten Konfiguration sind unter anderem Windows, FreeBSD, macOS und Linux anfällig; da aber ein Hardware-Mechanismus zum Tragen kommt, muss im eigentlichen Sinne gar kein Betriebssystem gestartet sein – es reicht ein Bildschirm des BIOS.

Pinbelegung

Zu beachten ist, dass bei Kabeln mit zwei Steckern die Datenleitungen TPA und TPB gekreuzt sind, das heißt TPA+ geht an TPB+ und TPA- geht an TPB-.

Die Pin-Belegung von IEEE-1394-Pfostensteckern auf Hauptplatinen ist nicht herstellerübergreifend standardisiert und weicht daher in der Regel von dieser Tabelle ab. Üblich sind sowohl 2×5-Pin- als auch 2×8-Pin-Pfostenstecker. Kanal A lässt sich anhand der (positiven) Leerlaufspannung identifizieren: sowohl TPA+ als auch TPA- werden mit TPBIAS beaufschlagt. TPB ist passiv terminiert. VP/GND kann nach Spezifikation mit 1,5 Ampere belastet werden, je nach realisierter VP also bis zu 45 Watt. Korrekt sind die Abschirmung des Twisted-Pairs A und die Abschirmung des Twisted-Pairs B im Kabel voneinander isoliert, erst im Anschluss sternförmig miteinander und mit GND verbunden, nicht aber mit der äußeren Kabelabschirmung. Diese Verbindung kommt nur im vierpoligen i.Link-Stecker zustande.

Auch bei den nicht standardkonformen, aber firmenübergreifend gleichen Rundsteckverbindern an hochpreisiger Mess- und Sensortechnik gibt es unterschiedliche Anschlussbelegungen.