

Galvanische Isolation von High-Speed-HDMI-Signalen in medizinischen Industrie-PCs



In diesem Artikel geht es um eine galvanisch isolierte HDMI-Schnittstelle für medizinische Industrie-PCs, die die Sicherheits- und Schutzanforderungen der IEC 60601-1 hinsichtlich MOPP/MOOP erfüllt und 1080p-Videosignale mit 60 Hz überträgt. Aufbauend auf schnellen LVDS-Digitalisolatoren nutzt die vorgestellte Architektur eine AC-Kopplung mit sorgfältig ausgelegten Bias- und Abschlussnetzwerken, um eine Pegelübersetzung zwischen TMDS-CML- und LVDS-Domänen zu ermöglichen, während die Konformität zur HDMI-Physical-Layer-Spezifikation gewahrt bleibt. Die Methodik ist auf andere medizinische und industrielle Bildübertragungsstrecken anwendbar, die Datenraten im Multi-Gbit/s-Bereich sowie einen zweifachen MOPP-Schutz erfordern.

Medizinische Industrie-PCs

Ein Industrie-PC (IPC) ist im Wesentlichen eine Rechnerplattform mit CPU, Arbeits- und Massenspeicher. Im Gegensatz zu Consumer- oder Büro-PCs sind Industrie-PCs jedoch primär für den zuverlässigen Dauerbetrieb unter rauen Umgebungsbedingungen ausgelegt. Sie zeichnen sich ferner durch eine erhöhte Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen aus und müssen üblicherweise umfangreiche Temperatur- und Vibrationstests sowie mechanische Prüfungen bestehen.

Im Medizin- und Gesundheitswesen finden medizinische Industrie-PCs breite Anwendung in bildgebenden Systemen (CT, MRT, Ultraschall), Visitenwagen, OP-Integrationssystemen sowie in der Laborautomatisierung.

Sicherheits- und Isolationsanforderungen für medizinische Industriecomputer

IPC-Systeme müssen zudem die Sicherheitsanforderungen für medizinische elektrische Geräte gemäß IEC/EN 60601-1 sowie die Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) gemäß IEC/EN 60601-1-2 erfüllen. Gleichzeitig müssen die Systeme über leicht zu reinigende, antimikrobielle Gehäuse verfügen und auf lüfterlosen, geräuscharmen Thermalkonzepten basieren, um die Anforderungen der Krankenhaushygiene und der Geräuschkentwicklung im Krankenhausumfeld zu erfüllen.

Der wesentliche Unterschied

zwischen medizinischen Industriecomputern und Standard-Industrie-PCs besteht in den medizinischen Sicherheitsanforderungen, insbesondere hinsichtlich der elektrischen Sicherheit und

der elektromagnetischen Verträglichkeit bei Patientenkontakt. International gelten als relevante Normen die IEC 60601-1, die grundlegende Sicherheits- und essenzielle Leistungsanforderungen für medizinische elektrische Geräte definiert, sowie die IEC 60601-1-2, die Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) spezifiziert. Diese Normen definieren die zulässigen Ableitströme sowohl zum Patienten als auch zum Bediener sowie die Anforderungen an Isolationsart, Luft- und Kriechstrecken und dielektrische Festigkeit.

MOPP und MOOP

Die IEC 60601-1 definiert die Konzepte der Maßnahmen zum Schutz des Bedieners (MOPP) und der Maßnahmen zum Schutz des Patienten (MOOP). Medizinische Geräte müssen durch ihr mechanisches Design und ihr Isolationssystem eine oder zwei unabhängige Schutzmaßnahmen gewährleisten. Ziel ist es, sicherzustellen, dass keine I/O-Schnittstelle – etwa USB, HDMI, Ethernet oder die Stromversorgung – Patienten über Masse oder andere gemeinsame Bezugspotenziale potentiell gefährlichen Berührungsströmen aussetzt.

Ein kompakter, leistungsstarker medizinischer IPC erfordert sorgfältig segmentierte galvanische Isolationsbarrieren sowie medizinisch zertifizierte isolierte Versorgungsbereiche (Tabelle 1).

Realisierung der galvanischen Isolation

Herausforderungen bei der Realisierung der galvanischen Isolation für die Übertragung von Signalen mit hoher Geschwindigkeit: Bei der Umsetzung der genannten Sicherheits- und Isolationsanforderungen in Systemen mit Hochgeschwindigkeitsschnittstellen gibt es mehrere praktische Herausforderungen. Standard-Isolationsbauteile unterstützen typischerweise Datenraten in der Größenordnung von 100 Mbit/s.

Für Schnittstellen wie USB 2.0, USB 3.0 oder Videolinks mit hoher Bandbreite (HDMI, MIPI CSI), die eine galvanische Isolation erfordern, sind Standard-Isolationsbauteile nicht mehr ausreichend.

IEC 60601-1: Spezifikation der Schutzmaßnahmen MOOP und MOPP.

Level	Isolationsbarriere	Isolationsspannung (VAC)	Minimale Kriechstrecke (mm)	Minimale Luftstrecke (mm)
1x MOOP	Basis	~1500	~2,5	~2,0
2x MOOP	Verstärkt	~3000	~5,0	~4,0
1x MOPP	Basis	~1500	~4,0	~2,5
2x MOPP	Verstärkt	~4000	~8,0	~5,0

Tabelle 1: Spezifikationen

Autor:
Cindy Chang
Field Applications Engineer
Analog Devices Inc.
www.analog.com

Entwickler müssen sich mindestens mit den folgenden drei Aspekten auseinandersetzen.

- Isolationsbandbreite:** Der Isolator muss die erforderlichen hohen Datenraten der Schnittstelle unterstützen.
- Protokollkonforme Konvertierung** auf der physikalischen Schicht: Die Vorder- und Rückseite des Isolators müssen elektrische Eigenschaften aufweisen, die mit den jeweiligen Schnittstellenstandards kompatibel sind.
- Signalintegrität:** Augendiagramm-Öffnung, Jitter und Skew müssen innerhalb der zulässigen Grenzwerte des Hochgeschwindigkeitsstandards liegen.

Der Artikel konzentriert sich auf ein HDMI als repräsentatives Beispiel und zeigt, wie ADI eine galvanische Isolation für die Übertragung von Daten mit hoher Geschwindigkeit realisiert, die die Anforderungen von 2×MOPP erfüllt. Die gleichen Designkonzepte lassen sich auf andere Hochgeschwindigkeitsschnittstellen übertragen.

Ausgehend von einer HDMI-Isolationslösung

HDMI-Videoverbindungen werden durch Auflösung und Bildwiederholrate beschrieben, beispielsweise 1280 × 720 (720p) bei 60 Hz. HDMI verwendet den Schnittstellenstandard Transition-Minimized Differential Signaling (TMDS). Die TMDS-Bitrate wird durch den Pixeltakt bestimmt, der wiederum durch das Gesamt-timing einschließlich der Blanking-Intervalle definiert wird.

H_{total} und V_{total} bezeichnen die gesamte horizontale bzw. vertikale Pixelanzahl einschließlich aktivem Bildinhalt und Blanking-Intervallen, während f_{frame} die Bildrate angibt. Der Pixeltakt berechnet sich dann zu

$$f_{pixel} = H_{total} \times V_{total} \times f_{frame} \quad 1)$$

- $H_{total} = H_{active} + H_{blanking}$
- $V_{total} = V_{active} + V_{blanking}$
- f_{frame} : Bildwiederholrate (Hz); zum Beispiel 60 Hz

TMDS verwendet eine 8b/10b-Codierung. Daher ergibt sich die Bitrate pro TMDS-Daten-lane zu

$$R_{TMDS, lane} = f_{pixel} \times \frac{10}{8} \quad 2)$$

und die gesamte TMDS-Bitrate über alle drei Datenkanäle beträgt

$$R_{TMDS, total} = 3 \times R_{TMDS, lane} = 3 \times f_{pixel} \times \frac{10}{8} \quad 3)$$

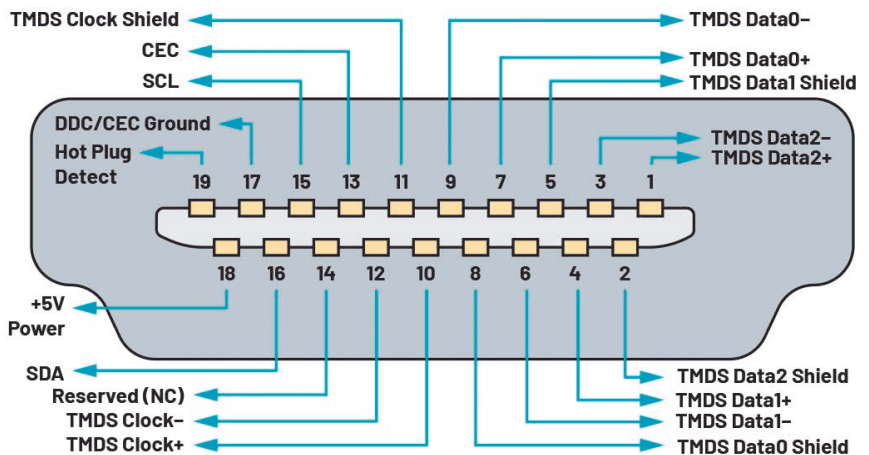


Bild 1: Pinbelegung des HDMI

In der Praxis verwenden Entwickler für gängige Videomodi wie 720p mit 60 Hz und 1080p mit 60 Hz üblicherweise die standardisierten Pixeltaktfrequenzen. Beispielsweise nutzt 720p mit 60 Hz eine Pixeltaktfrequenz von 74,25 MHz. Bei 1080p mit 60 Hz beträgt die Pixeltaktfrequenz 148,5 MHz. Die TMDS-Bitrate lässt sich wie folgt berechnen:

$$R_{TMDS, lane} = f_{pixel} \times 10 \quad 4)$$

$$R_{TMDS, total} = 3 \times f_{pixel} \times 10 \quad 5)$$

Daher muss ein zur galvanischen Isolation einer HDMI-Schnittstelle mit 720p bei 60 Hz eingesetzter Isolationskanal mindestens 742,5 Mbit/s pro Leitung übertragen können; für 1080p bei 60 Hz sind es mindestens 1,485 Gbit/s pro Lane.

ADI hat Hochgeschwindigkeits-LVDS-Digitalisolatoren wie den ADN4624 im Programm. Das Bauteil verfügt über vier Kanäle mit je 2,5 Gbit/s und bietet eine Isolationsspannung von 5,7 kV_{eff}. Es erfüllt damit die Anforderungen für 2× MOPP. Die Bandbreite und Isolationsklasse sind ausreichend, um die drei TMDS-Datenkanäle einer HDMI-Schnittstelle zu übertragen und zugleich die Anforderungen der medizinischen Sicherheit zu erfüllen.

HDMI-Signalstruktur und Isolationsstrategie

Um die vollständige Konformität der isolierten Schnittstelle mit der HDMI-Spezifikation sicherzustellen, ist es erforderlich, die Struktur der HDMI-Schnittstelle zu verstehen (Bild 1).

- TMDS-Hochgeschwindigkeits-Daten- und Taktkanäle:** HDMI nutzt vier differenzielle Signalkanäle (acht Pins) für die Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung.

- Drei TMDS-Datenkanäle (Data 0–2) übertragen RGB-Videodaten, Audioinformationen und Steuerdaten.

- Ein TMDS-Taktkanal liefert den Referenztakt, den der Empfänger (Sink) zum Abtasten der Datenkanäle nutzt.

Die Daten werden mittels 8b/10b-Codierung codiert, um die Signalübergangsdichte zu steuern und die DC-Balance sicherzustellen.

- Display Data Channel (DDC):** Der DDC besteht aus zwei Leitungen (SCL-Taktleitung und SDA-Datenleitung). Er wird von der Quelle (z. B. einem PC) genutzt, um die erweiterten Display Identification Data (EDID) des Displays auszulesen, welche die unterstützten Auflösungen und Formate enthalten.

- Consumer Electronics Control (CEC):** CEC ermöglicht die Steuerung von Geräten über die HDMI-Schnittstelle mit einer einzigen Fernbedienung. Etwa die Bedienung einer Set-Top-Box über die Fernbedienung des Fernsehers.

- Hot-Plug-Erkennung (HPD):** Die HPD-Funktion zeigt den Verbindungsstatus des Empfängers (Sink) an. Wird ein Display angeschlossen oder eingeschaltet, wechselt die HPD-Funktion ihren Zustand und benachrichtigt die Quelle, damit diese den Videolink initialisiert oder neu konfiguriert.

- Stromversorgung und Masse.** Der HDMI-Anschluss stellt eine 5-V-Versorgungsspannung bereit, die das Auslesen der erweiterten Display-Identifikationsdaten (EDID) auch bei ausgeschaltetem Hauptnetzteil des Displays ermöglicht. Abschirmung und Masseverbindungen sorgen für eine stabile Referenz und unterdrücken Störungen.

- Zusätzliche Kanäle (HEAC = HDMI-Ethernet- und Audio-Rückkanal):** Bei Kabeln und Geräten, die erweiterte Funktionen unterstützen, können bestimmte Pins für Ethernet-Daten und den Audio Return Channel (ARC/eARC) neu verwendet werden, wodurch Audiodaten vom Fernseher an einen AV-Receiver zurückgesendet werden können.

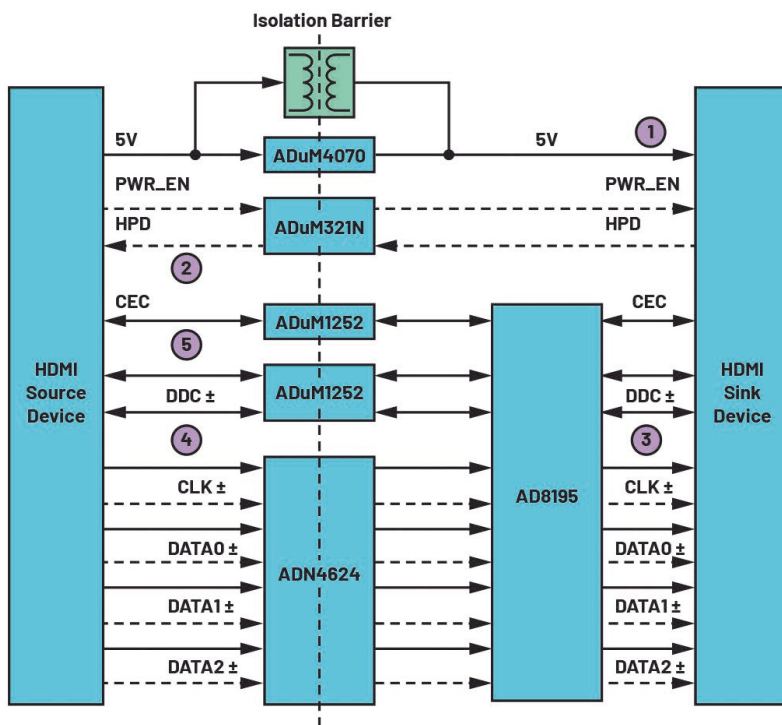


Bild 2: Blockschaltung eines isolierten HDMI-Designs mit den Bauteilen ADuM4070, ADuM321N, ADuM1252, ADN4624 und AD8195

Aus Sicht der Isolation lässt sich die HDMI-Schnittstelle in folgende Bereiche unterteilen:

- Vier Hochgeschwindigkeits-TMDS-Differenzsignalepaare (drei Datenpaare und ein Taktpaar)
- Mehrere Steuer- und Statussignale mit geringer Datenrate (DDC, CEC, HPD, HEAC sowie 5-V-Versorgung)

DDC und CEC sind bidirektionale Open-Drain-Signale mit geringer Datenrate. Ihre Isolation muss das I²C-ähnliche Verhalten (für EDID-Lesezugriffe und CEC-Arbitration) sowie die Spannungspegel beibehalten. Daher sind für diese Leitungen bidirektionale Digitalisolatoren erforderlich. HPD ist ein unidirektionales Statussignal, das mit einem unidirektionalen Isolator isoliert werden kann.

Eine typische Vorgehensweise zur Auswahl von Isolatoren für ein isoliertes HDMI-Design ist wie folgt (Bild 2):

- **High-Speed-TMDS-Leitungen:** LVDS-Gigabit-Isolatoren zur Übertragung der serialisierten High-Speed-Daten und des Taktsignals.
- **DDC und CEC:** Bidirektionale I²C- bzw. Low-Speed-Isolatoren mit Open-Drain-Verhalten.
- **HPD und andere unidirektionale Signale:** Einfache unidirektionale Digitalisolatoren.

TMDS-CML- zu LVDS-Konvertierung

mit AC-Kopplung und Bias-Netzwerken: Ein zentraler Aspekt des Designs ist die Schnittstelle

zwischen dem HDMI-TMDS-Physical-Layer und dem LVDS-Isolator. TMDS verwendet Current-Mode-Logic (CML).

- CML verwendet eine Konstantstromquelle sowie externe 50-Ω-Pull-up-Widerstände auf 3,3 V an jeder Leitung zur Realisierung des Differenzsignalepaars.
- Der Empfänger erwartet eine differenzielle 100-Ω-Last (zwei 50-Ω-Abschlusswiderstände) gegen 3,3 V, mit einem typischen differentiellen Spannungshub von wenigen hundert Millivolt.
- Im Gegensatz dazu handelt es sich bei den Bauteilen ADN4624/ADN4654 um LVDS-Transceiver - spannungsgesteuerte Differenzialtreiber und -empfänger mit einer charakteristischen differentiellen Impedanz von 100 Ω.
- Die zulässige Gleichtaktspannung liegt typischerweise bei etwa 1 bis 1,5 V und damit deutlich unter dem 3,3-V-Pegel von TMDS.

Die wesentlichen Schritte auf der TMDS-zu-LVDS-Seite sind wie folgt:

- Schritt 1: Korrekte TMDS-Terminierung für die HDMI-Quelle bereitstellen.

Jede TMDS-Leitung wird mit einem effektiven 100-Ω-Abschluss gegen 3,3 V terminiert (z. B. realisiert durch zwei 50-Ω-Widerstände), wodurch die korrekte Last bereitgestellt und die differentielle 100-Ω-Impedanz für den HDMI-Quellentreiber sichergestellt wird.

- **Schritt 2:** Das differentielle Leitungspaar AC-koppeln.

Serienkondensatoren (typischerweise in der Größenordnung von 10 nF pro Leitung) unterdrücken die DC-Gleichtaktspannung auf der TMDS-Seite und lassen nur die AC-Komponente des differentiellen Signals durch.

- **Schritt 3:** Eine geeignete LVDS-Gleichtaktspannung sowie die Terminierung wiederherstellen.

Auf der LVDS-Eingangsseite des Isolators wird eine 200-Ω-Differenzterminierung zwischen den beiden Eingangspins implementiert. Zusammen mit einem möglichen internen Abschluss stellt dies die korrekte effektive Last für das eingehende Signal sicher.

Zusätzlich legt ein Bias-Netzwerk, beispielsweise ein Spannungsteiler (z. B. 10-kΩ-Pull-up nach 3,3 V und 10-kΩ-Pull-down nach Masse pro Eingangsleitung), die Gleichtaktspannung auf etwa 1 V fest. Über dieses Netzwerk legen die beiden Leitungen die für LVDS geeignete Gleichtaktspannung fest, während die AC-gekoppelten differentiellen Signalanteile darauf überlagert werden.

Mit diesem Ansatz wird das ursprüngliche TMDS-CML-Signal effektiv in ein LVDS-kompatibles differentielles Signal überführt, ohne die DC-Betriebsbedingungen beider Seiten zu beeinträchtigen. Nach der Isolationsbarriere kann eine symmetrische Struktur eingesetzt werden, um LVDS wieder in ein TMDS-kompatibles CML-Signal für den HDMI-Empfänger zu überführen (Bild 3).

Die HDMI-Signalintegrität

über die Isolationsstrecke aufrechterhalten: Über die Protokollkompatibilität hinaus muss die HDMI-Verbindung auch nach der Isolation weiterhin die standardmäßigen Konformitätstests bestehen. Diese beinhalten strenge Grenzwerte für:

- Takt- und Daten-Jitter
- Maskenreserve im Augendiagramm
- Anstiegs- und Abfallzeiten
- Zeitlicher Signalversatz zwischen und innerhalb eines differentiellen Paares (Inter- und Intra-Pair-Skew)

Eine galvanische Isolationsstufe kann diese Kenngrößen leicht durch zusätzliches Jitter, Amplitudenverluste und Impedanzunterschiede herabsetzen. Zur Sicherstellung der Signalqualität werden folgende Maßnahmen empfohlen:

1. Dämpfungs- und Entzerrungsmanagement

Die kumulative Dämpfung durch Leiterbahnen auf der Leiterplatte, Steckverbinder und Isolationsbauteile sollte minimiert werden, indem die Leitungsimpedanz eingehalten und die differentiellen Paare so kurz und direkt wie möglich geführt werden.

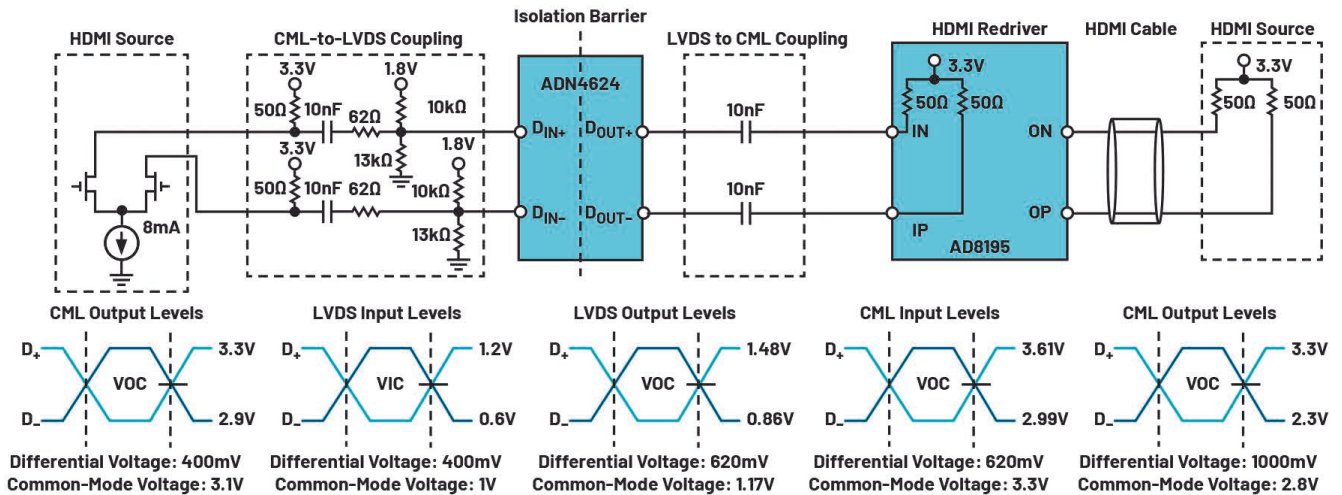


Bild 3: Signalspannungswandlung zwischen HDMI und LVDS

Für längere Verbindungen oder höhere Auflösungen können HDMI-Puffer und -Equalizer eingesetzt werden, um Hochfrequenzdämpfung und Flankenabflachung zu kompensieren.

2. Amplituden- und Terminierungssteuerung

Eine zu niedrige TMDS-Amplitude oder ausgeprägtes Über- und Unterschwingen deutet häufig auf Probleme bei der CML-zu-LVDS-Bias- oder Terminierungsanpassung hin. Zusätzlich kann übermäßige Einfügedämpfung durch AC-Koppelkondensatoren und ESD-Schutzbauelemente zu solchen Effekten beitragen.

3. Skew-Management

Die vier TMDS-Differentialpaare (Takt- und drei Datenkanäle) müssen hinsichtlich der Leiterbahnlängen gut aufeinander abgestimmt werden, sowohl innerhalb jedes Paares (Intra-Pair-Skew) als auch zwischen den Paaren (Inter-Pair-Skew). Zusätzliche Leiterbahnlängen, etwa durch Umwege oder mehrere Leiterplattenübergänge, können zu Abtastfehlern im Empfänger führen.

4. Isolationsabstand und Referenzflächenstrategie

Um die Anforderungen an die Kriech- und Luftstrecken gemäß MOPP/MOOP einzuhalten, müssen Masse- und Versorgungsebenen an der Isolationsgrenze physisch voneinander getrennt werden. Hinsichtlich der Signalintegrität sollte auf beiden Seiten der Isolationsbarriere eine durchgehende Referenzfläche bis unmittelbar an die Pins des Isolators geführt werden.

Nur der minimal notwendige Bereich unter und um das Isolatorgehäuse sollte ausgespart werden, um den erforderlichen Isolationsabstand zu gewährleisten. Hochgeschwindigkeits-Differenzialpaare sollten nicht über längere Strecken über Unterbrechungen der Referenzfläche oder große Aussparungen geführt werden, da dies Impedanzsprünge und elektromagnetische Störungen (EMI) verstärkt.

5. Isolierte Stromversorgung und EMI-Optimierung

Isolierte Stromversorgungen müssen mit geeigneter LC-Filterung und sorgfältigem Layout ausgelegt werden. Kurze Stromschleifen und eine geeignete Aufteilung getrennter Massebereiche verhindern, dass Störungen durch schnelle Schaltvorgänge in die TMDS-Leitungen einkoppeln.

Erweiterungen und andere Anwendungen

Die beschriebene Methodik ist nicht auf HDMI beschränkt. Sie lässt sich auf viele andere Hochgeschwindigkeitsanwendungen mit hohen Sicherheitsanforderungen übertragen, beispielsweise auf:

- Machine-Vision- und industrielle Kamera-schnittstellen: Schnittstellen wie Camera Link, GigE Vision und kundenspezifische LVDS-Streaming-Verbindungen weisen dieselben grundlegenden Merkmale auf: High-Speed-Differentialpaare und die Notwendigkeit galvanischer Isolation. Die LVDS-Isolatoren der ADN46xx-Familie lassen sich für diese Verbindungen mithilfe ähnlicher AC-Kopplungs- und Bias-Netzwerke adaptieren.
- Medizinische und industrielle Systeme mit Mensch/Maschine-Schnittstellen (HMI) sowie Displays für Operationssäle. Unabhängig davon, ob es sich bei der Videoschnittstelle um HDMI, DisplayPort oder ein proprietäres LVDS-Interface handelt, können alle Topologien, bei denen Bilddaten von der Patientenseite an ein Display im Operationssaal oder von einer Feldkamera an einen entfernten Kontrollraum übertragen werden, dieselbe Isolationsstrategie nutzen. Die Anforderungen an die Signalintegrität und Sicherheit sind dabei analog zum HDMI-Anwendungsfall.

Zusammenfassung

Die wesentliche Herausforderung bei der Isolation von Hochgeschwindigkeitsschnittstellen wie HDMI besteht darin, sowohl die Signalintegrität bei Datenraten im Multi-Gigabit-Bereich zu erhalten als auch strenge medizinische und industrielle Sicherheitsanforderungen zu erfüllen. In Kombination mit Hochgeschwindigkeits-Digitalisatoren und medizinisch zertifizierten isolierten Leistungsmodulen erfüllen solche Designs die Anforderungen an Augendiagramm, Jitter und Schutzmaßnahmen (MOPP/MOOP).

Auf Leiterplattebene ermöglichen kontinuierliche Referenzflächen auf beiden Seiten der Isolationsbarriere sowie lokal begrenzte Unterbrechungen im Bereich der Isolatorpins ein wirksames Management von EMV und Signalreflexionen. Insgesamt bietet der Ansatz eine robuste und sichere Grundlage für die Übertragung von Videodaten mit galvanischer Isolation in medizinischen Bildgebungssystemen wie Endoskopen sowie in Industrie- und Machine-Vision-Anwendungen.

Literatur

- "CN-0571: Galvanically Isolated Full HD 1080p/60Hz HDMI PHY Using iCoupler® Isolation Technology." Analog Devices, Dezember 2024.
- Patrick, Mark. "Emerging Power Standards in the Medical Industry." SmartAuto Magazine, Juni 2018.

Wer schreibt:

Cindy Chang ist Field Applications Engineer (FAE) bei ADI in Taiwan und auf industrielle Automatisierungsanwendungen spezialisiert. Sie kam 2023 zu ADI und betreut seit 2019 Kunden im Bereich der Industrieautomation. ◀