

Sicher ist sicher

Die Consumer-Schnittstelle USB 3.0 wurde 2010 eingeführt und erfreut sich großer Beliebtheit nicht nur aufgrund der Rückwärtskompatibilität zu USB 2.0. Die USB 3.0 Schnittstelle unterstützt eine Bruttobandbreite von 5000 MBit/s, wobei nur eine maximale Kabellänge von 3,5 m (bei Consumer-Kabeln), bei gutem Kabelmaterial auf bis zu 8 m, unterstützt wird. Aber es gibt Möglichkeiten, längere Distanzen zu überbrücken. Dieses Whitepaper beleuchtet diesen Aspekt und weitere Punkte zum Thema USB 3.0.

USB3 Vision im Vergleich zu anderen Schnittstellen

Folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die wichtigsten Kameraschnittstellen und deren Eigenschaften (Quelle: Handbook of machine vision, Wiley):

Schnittstelle	IEEE-1394a	USB 2.0	IEEE-1394b	GIGABIT ETHERNET(802.3ab)	CAMERA LINK	USB 3.0
Maximale Bit Rate	400 Mb/s	480 Mb/s	800 Mb/s	1000 Mb/s	>2000 Mb/s	5000 Mb/s
Isochroner (Video) Mode	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja
Bandbreite/Verwendbare Bandbreite	Video: 32 MB/sec (80%) Total: 40MB/s	45 MB/sec (90%)	Video: 64 MB/sec (80%) Total: 80MB/s	120 MB/sec	255 MB/s (BASE) 680 MB/s (FULL)	~400 MB/s
Topologie	Peer-to-Peer	Master-Slave, OTG (On-The-Go)	Peer-to-peer	Netzwerk, P2P	Master-Slave	Erw. Master-Slave
Distanz mit einem Kupferkabel oder anderem Medium	4,5m, Worst Case; 10m, typ. Kameraapplikation; 300m GOF	5m- 8m	8m Kupfer; 300m GOF	25m, 100m (Cat5)	10m	3m Worst Case, 8m Möglich; GOF : >100m
Max. Distanz mit Kupfer und Repeater	70m	30m	70m	n.a	30m	~15m
Bus Power	Bis 1,5A und 36V	Bis 0,5A und 5V	Bis 1,5 A und 36V	Default: Keinen; Power over Ethernet (POE)	Default: Keinen; Power over CL (POCL)	Bis 0,9A und 5V
Motherboard Support	Viele	Virtuell alle	Wenig	Virtuell alle	Keinen	Virtuell alle
CPU-Last	Sehr niedrig	Niedrig	Sehr niedrig	Niedrig bis Mittel	n.a.	Sehr niedrig
OS Unterstützung	Windows, Linux	Windows, Linux	Windows, Linux	Windows, Linux	Je nach Anbieter	Windows, Linux

Hauptanwendungen	Multimedia Elektronik	PC-zentrischer serieller In-/Output	Multimedia Elektronik	Networking	High Speed Kamera-schnittstelle	PC-zentrischer serieller In-/Output
Kamera-standard	IIDC V1.3	Keinen (?)	IIDC V1.31	GigE Vision; GenICam	CL	USB3 Vision (ref. auf GigE Vision/ GenICam)
Geräte per Bus	63; 4 (8) simult. / Karte, je nach DMA Typ 4 (8)	Theoretisch: 127; Praktisch: <64	63; 4 simult. / Karte, je nach DMA Typ 4 (8)	Je nach Software und verfügb. Bandbreite	1 pro Schnittstelle	Theoretisch: 255; Praktisch: <32

Insgesamt weist USB 3.0 beeindruckende Zahlen auf.

Übertragungssicherheit durch Design

USB 3.0 in Verbindung mit USB3 Vision bietet

- bis zu 400 Mbyte/s Schnittstellenbandbreite mit Bulk-Transfer, welche eine nicht zeitkritische Übertragung garantiert,
- eine effiziente Methode, um die CPU-Last bei der Bildübertragung mittels Zero Copy Prinzip zu reduzieren: Nur das erste und das letzte Paket jedes Bildes benötigen CPU, die Daten werden via DMA in den Computerspeicher transferiert
- ein besseres Protokoll (weniger Polling wird benötigt),
- mehr Strom über den Bus (4,5W; 2,5W@USB 2.0).

Dies sind ideale Voraussetzungen, um die Schnittstelle für Machine Vision Kameras zu verwenden.

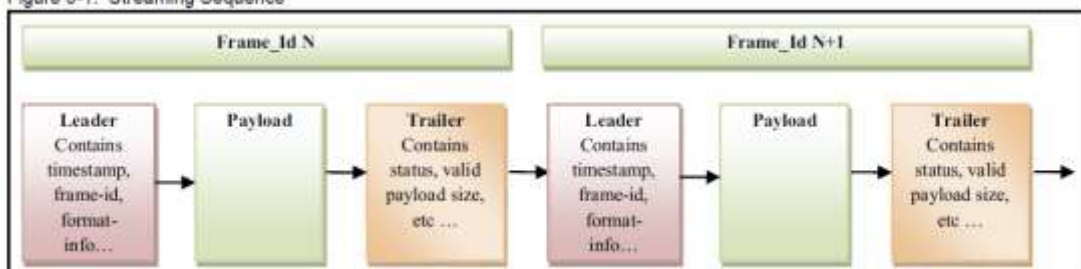
Bulk-Transfer wurde gewählt, da es zum einen die höchste Bandbreite bietet und zum anderen das Gerät und der Host den Transport der einzelnen und multiplen 1024 Byte (innerhalb 125 µs) Bulk-Pakete inklusive hardware-berechneten CRC-Checksummen und Resendalgorithmen organisieren. Dies geschieht unsichtbar für das Betriebssystem und erfordert keine Interaktion durch den Treiber - ein klarer Vorteil im Vergleich zum isochronen Transport bei FireWire (fire and forget → CRC-Prüfung, aber kein Resend möglich!) und GigE, wo optional Resendmechanismen auf Treiberebene zeitkritische CPU-Interventionen erfordern. Bulk-Transfer bietet weit mehr Bandbreite, als eine getriggerte Applikation normalerweise benötigt, um eine sichere Übertragung durch Bandbreitenoverhead zu gewährleisten.

Jedoch erfordert der Bulk-Transfer, dass die Kamera einen FIFO-Speicher besitzt. Benötigt wird dieser, sobald die Kamera mit der Belichtung fertig ist und auf das Auslesen wartet, jedoch die Übertragung der Bulk-Daten nicht gestartet werden kann, falls USB 3.0 bereits

mit priorisierter Datenübertragung beschäftigt ist. Infolgedessen verfügen die mvBlueFOX3 Kameras von MATRIX VISION über einen internen 256 Mbyte großen Bildspeicher. Das Zero Copy Prinzip beinhaltet einen weiteren wichtigen Aspekt bezüglich Übertragungseffizienz: Während Leader und Trailer die Start- und Stoppeigenschaften der Bilder definieren und so Interrupts für das Betriebssystem erzeugen damit durch die CPU untersucht werden, wird der Payload im Gegensatz dazu via DMA (Direct Memory Access) in den Hostspeicher transferiert, meist in Paketgrößen von 128 kByte. Dies setzt nur wenig Interaktion zwischen CPU und Betriebssystem voraus. Der Hostspeicher ist normalerweise der Speicher der Applikation, sodass kein Kopieren zwischen den Speichern (also einem, der das Bild zusammensetzt und einem der das Bild für die Applikation vorhält) nötig ist.

Im Dokument des USB3 Vision Standards wird dies wie folgt illustriert.

Figure 5-1: Streaming Sequence



Das Zero Buffer Kopieren macht den Bildtransfer sehr effizient, da weder das Kopieren des Payloads (im Gegensatz zum typischen GigE Netzwerkstack) noch hohe CPU-Last erforderlich sind. Die nachfolgende Tabelle stellt eine GigE und eine USB 3.0 Kamera mit gleichem Sensor und gleicher Framerate gegenüber. Selbst wenn mit den besten Settings eines Intel-Netzwerkadapters gearbeitet wird (Jumbo Pakete mit 9044 Byte und Interrupt Moderation = Extrem) werden mit GigE Kameras mehr Interrupts und CPU-Last benötigt als mit USB 3.0 Kameras.

	mvBlueCOUGAR-XD104DG (Single Lane) 1936 x 1216 @ 50 fps	mvBlueFOX3-2014G
Interrupts/s	1900	1500
CPU-Last (wxPropView; kein Display, nur Bild in Speicher)	<2%	<1%

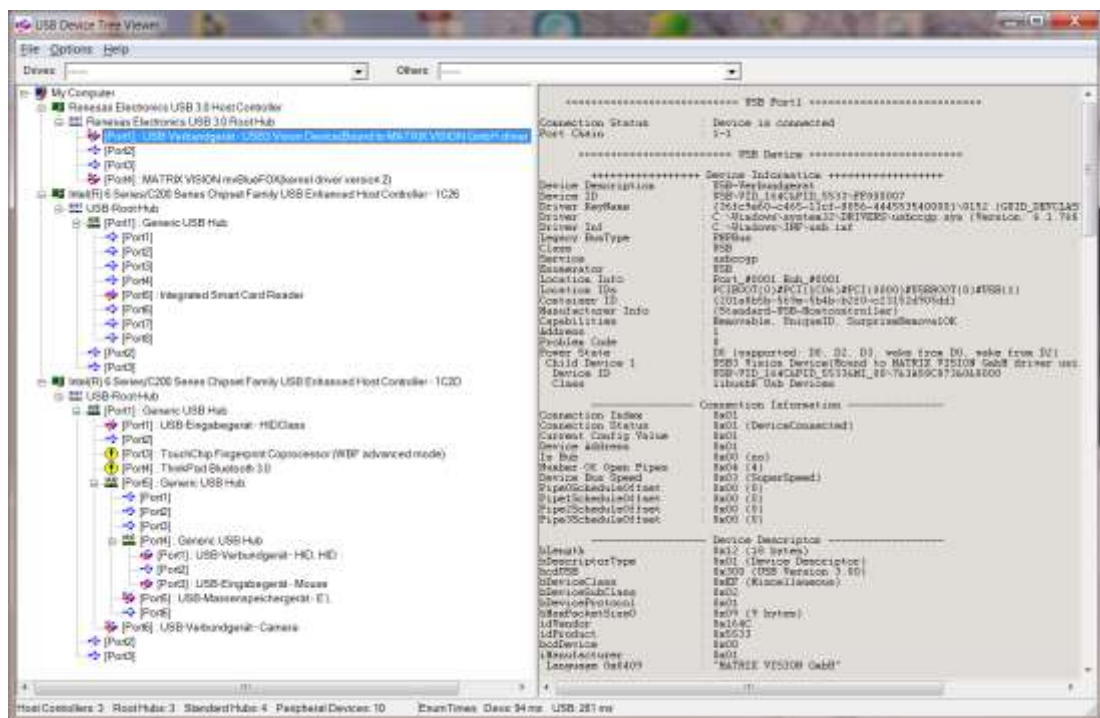
Mit Interrupt Moderation = Aus werden ca. ~15k Interrupts/s nötig, um ein Bild in GigE zuzuführen. MATRIX VISION hat detaillierte Messungen hinsichtlich erreichbarer Bandbreiten auf unterschiedlichen Betriebssystemen und Chipsätzen durchgeführt, welche angefordert werden kann. Je nach Version des Betriebssystems und verwendetem Chipsatz kann die erreichte Bandbreite unterschiedlich sein. Generell kann gesagt werden, dass auf

Intel XHCI basierende USB 3.0 Chipsatz-Boards und Windows 8/10 OS-Treiber oder Intel Treiber für Windows 7 dies höchste Bandbreite liefern.

Aspekte der Übertragungssicherheit aufseiten des Hosts

Um Latenzen beim Bulk-Transfer zu minimieren, wird empfohlen, Kameras an jeweils fest zugeordneten USB 3.0 Ports zu verwenden und andere externe USB 3.0 Geräte (z.B. USB 3.0 Festplatten) an andere Ports. Wie kann aber herausgefunden werden, wie die einzelnen Ports an der Hardware angeschlossen sind oder nicht. Nun, der Geräte-Manager kann hierbei hilfreich sein, mehr Einblick erhält man jedoch durch andere Tools (die meisten sogar kostenlos!)

Die Freeware "USB Tree Viewer" sieht wie folgt aus:



Der Screenshot zeigt ein 3 Jahre altes Laptop, bei dem USB 3.0 über einen Renesas USB 3.0 Host Controller Chip realisiert ist, welcher einen 4 Port Hub eingebaut hat. Zwei Ports sind physikalisch nach außen geführt.

Im Beispiel ist an Port1 eine USB 3.0 Kamera angeschlossen, an Port4 eine USB 2.0 Kamera, beide von MATRIX VISION. Interessanterweise können an diesen Hostcontrollern und Hubs USB 3.0 und USB 2.0 parallel betrieben werden, da beide Schnittstellen jeweils separat im Chip verdrahtet sind. Dadurch beeinträchtigen sich beide Kameras nicht.

Dagegen würden sich zwei USB 3.0 Kameras gegenseitig stören, da sich beide die Bandbreite des USB 3.0 Hostcontrollers teilen müssen. Wir haben die Bandbreite gemessen: 330 Mbyte/s. Neuere Computer haben den USB 3.0 Hostcontroller bereits im

Chipsatz selbst integriert und bieten daher eine noch höhere Bandbreite und noch mehr USB 3.0 Ports an. Auch hier kann es vorkommen, dass die erreichbare Bandbreite auf die Ports aufgeteilt werden muss. USB Tree View kann verwendet werden, um herauszufinden, wie die Ports angeschlossen sind. Falls die volle Bandbreite für jeden USB 3.0 Port erforderlich ist, empfiehlt es sich mit separaten USB 3.0 Karten zu arbeiten. Diese werden meist als PCI Express x4 Schnittstellenkarten angeboten, welche bis zu vier separate USB 3.0 Controller Chips bieten. Es ist möglich, dass solch eine Karte die Transfermöglichkeiten des PCs voll ausschöpft. MATRIX VISION hat eine Reihe von passenden Karten im Portfolio.

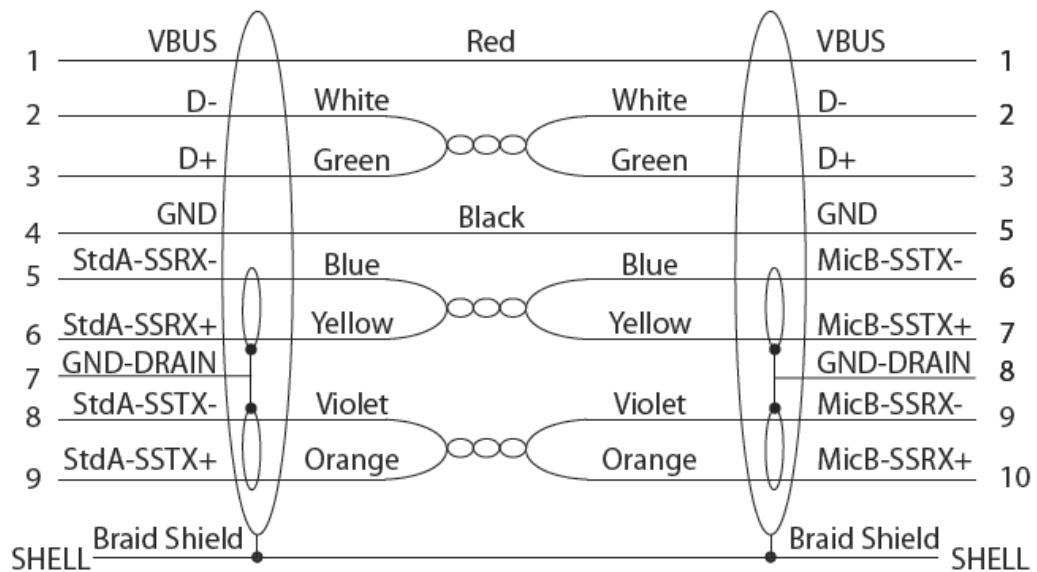
Kabellänge

Die Kabellänge markiert den Hauptunterschied zwischen USB 3.0 und GigE. Während GigE kupferbasierte Kabellängen von bis zu 100m unterstützt, ist die Kabellänge bei USB 3.0 in der Praxis auf 8 Meter beschränkt. Die Spezifikation schränkt die Kabellänge explizit nicht ein, jedoch ist ein Gesamtdämpfungsfaktor von 20dB zwischen zwei USB 3.0 Geräten vorgegeben. Ferner gibt die Spezifikation auch nichts bezüglich Kabel und Stecker vor. Das führt dazu, dass es in der Praxis Situationen gibt, in welchen die maximale Kabellänge nicht nur vom Kabel selbst abhängt, sondern auch vom Design und Layout des Mainboards und der Stecker des Host-PCs. Daher werden die Kameras am besten direkt an einem Mainboard-Stecker oder USB 3.0 Steckkarte angeschlossen. Falls Kabeladapter nicht vermieden werden können, sollten durch die dadurch verursachte Dämpfung kürzere Kabel verwendet werden. Generell sollten nur qualitativ hochwertige Kabel verwendet werden, vor allem so kurz wie möglich und direkt vom Hersteller der Kamera. Des Weiteren kann gesagt werden, umso länger das Kabel, desto dicker ist es. Dies berücksichtigt auch die fallende Spannung, falls die Kamera vom Computer versorgt wird. MATRIX VISION bietet eine Vielzahl an Qualitätskabeln an und testen diese in Verbindung mit Kameras an einer 24/7 Testumgebung. So wissen wir, dass diese Kabel gut sind.

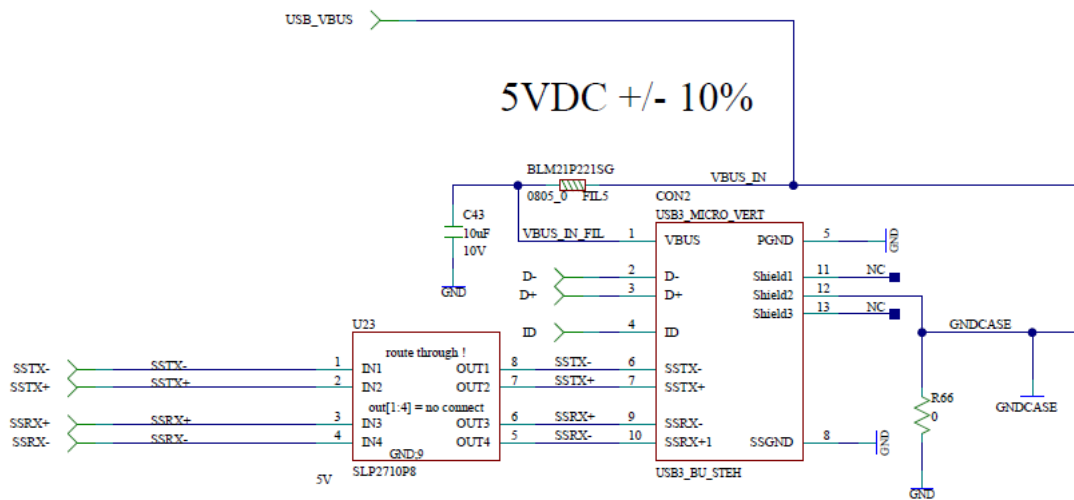
Erdung und Abschirmung

Die USB-Spezifikation geht mehr oder weniger davon aus, dass aufgrund der limitierten Kabellängen, die Geräte nah beieinander angeschlossen sind. Computer und die angeschlossenen Kameras teilen sich einen Anschluss und einen gemeinsame Masse. USB 3.0 Kabel (Beispiel: Alysium) haben typischerweise folgende Verdrahtung:

WIRING DIAGRAM



Zwei Drähte sind für den VBUS-Strom und die damit verbundene Masse, die Abschirmung ist mit der Metallschale verbunden und eine separate USB 3.0 Abschirmung geht zu separaten Pins auf den Stecker. USB 3.0 Signale und Erdung in der USB 3.0 Kameraserie mvBlueFOX3 ist wie folgt:



Abschirmung, USB3 Masse (SSGND), USB2 Masse (PGND) und GNDCASE (Masse/Gehäuse oder Schutzleiter) sind in der Kamera miteinander verbunden. Normalerweise sind Industriekameras direkt mit Metallteilen in Maschinen verschraubt, welche aufgrund von Sicherheitsstandards geerdet sind (Schutzleiter). Kameras können über den Bus mit Strom versorgt werden, jedoch gibt es auch Kameras, die Strom über einen Hirosestecker akzeptieren. Auf der Seite des Hosts hängt die Abschirmung vom Computer ab:

Während ein Laptop oder ein Industrie-PC die USB-Masse über einen 1 M Ω Widerstand mit dem Schutzleiter verbunden hat, kann ein handelsüblicher PC alle Massen in einem Signal verbunden haben.

Je weiter eine extern versorgte Kamera von einer Maschine entfernt ist, desto wahrscheinlicher wird es, dass sie eine andere Massereferenz über die Erdung der Maschine erhält. Falls dies der Fall ist, kann die Erdung des USB-Kabels eine Massenschleife erzeugen. Das kann zu Softwareabstürzen und Bluescreens oder zu durchgebrannten Schaltkreisen und Steckern führen. (Obwohl der Standard die Anschlussreihenfolge Schirm vor Erdung vor Strom als Gegenmaßnahme vorschreibt!). Daher muss dies in Applikationen, die über längere Distanzen gehen, geprüft werden.

Kamera-Lösungen über längere Distanzen

Kabelstanzprobleme können einfach und elegant mit smartem Zubehör wie aktive, optische Kabel (AOC) gelöst werden.

Hybride Kabel

Wir haben bei Tests herausgefunden, dass hybride Kabel (Daten optisch + ungeschirmte Stromkabel) sehr sensible auf unsaubere Spannungsversorgung reagiert, daher empfehlen wir diese Lösung nicht.

Anschluss mehrere USB 3.0 Kameras an einem Host

Reine aktive, optische Kabel können Distanzen von bis zu 100m zwischen Host-PC und einem Hub, um mehrere USB3 Vision Kameras in einen Datenstrom zu bündeln, überbrücken. Diese Kabel übertragen die USB 3.0 Daten optisch, haben aber keine Stromleitungen. Der Strom zur Versorgung der Kameras wird über den Hub eingespeist. Dadurch wird der PC von der Kamera hinsichtlich Erdung und Abschirmung isoliert und schafft so den gleichen Level elektrischer Robustheit, wie sie Netzwerkschnittstellen es haben (Stromwandler zur Isolierung).

Ein AOC-Aufbau könnte wie folgt aussehen:



Entfernungen bis zu 100m können erreicht werden.

Bis zu 4 Kameras können zu einem USB 3.0 Stream zusammengefasst werden, solange die Gesamtbandbreite von ~ 330 Mbyte/s nicht überschritten wird. Die benötigte Bandbreite kann leicht berechnet werden, indem die Bildgröße mit der Bildtiefe (Bytes pro Pixel) und der Bildwiederholrate multipliziert werden. Falls eine einzelne Kamera verwendet wird, empfehlen wir einen Kabeladapter (von bspw. NEWNEX), um die Kamera lokal mit Strom zu versorgen (ohne Hub). MATRIX VISION testet laufend Zubehör und beobachtet den Markt, um eine große Auswahl von zuverlässigen Komponenten anbieten zu können.

Autor: Horst A. Mattfeldt, Senior Consultant MATRIX VISION

<https://www.matrix-vision.com>