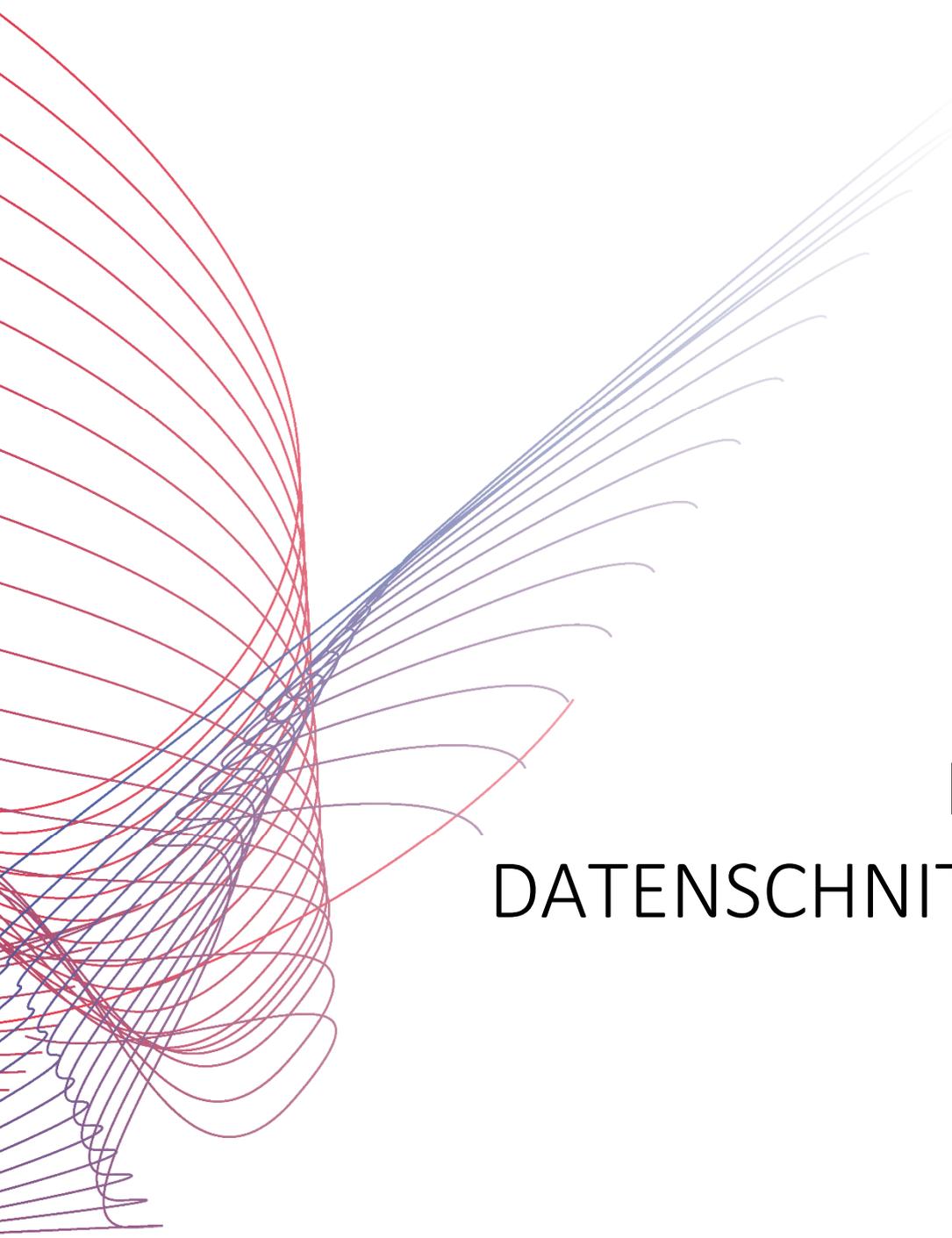




# TECH pedia



## MODERNE DATENSCHNITTSTELLEN

IVAN PRAVDA

**Titel der Arbeit:** Moderne Datenschnittstellen  
**Author:** Ivan Pravda  
**Übersetzt (von):** Alena Dvořáková  
**Veröffentlicht (von):** České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
**Kontaktadresse:** Technická 2, Prague 6, Czech Republic  
**Tel.:** +420 224352084  
**Drucken:** (nur elektronisch)  
**Anzahl der Seiten:** 38  
**Ausgabe:** 1. Ausgabe, 2017  
**ISBN** 978-80-01-06268-5

**TechPedia**

European Virtual Learning Platform for  
Electrical and Information Engineering

<http://www.techpedia.eu>



Dieses Projekt wurde mit Unterstützung der Europäischen Kommission finanziert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung (Mitteilung) trägt allein der Verfasser; die Kommission haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

## ERLÄUTERUNG



Definition(en)



Interessantheit (Interessantes)



Bemerkung



Beispiel



Zusammenfassung



Vorteile



Nachteile

---

## ZUSAMMENFASSUNG

Die neue Version der Schnittstelle USB 3.0, deren Standards im November 2008 veröffentlicht wurden, weist gegenüber der vorigen Version (2.0) erhebliche Verbesserungen auf. Die Hauptvorteile der neuen Schnittstelle sind eine hohe Übertragungsrate von bis zu 5 Gbit/s, ein verbessertes Power Management des Busses und Abwärtskompatibilität mit den vorigen Versionen. Auch die Thunderbolt Technologie ist eine erfolgsversprechende und wettbewerbsfähige Schnittstelle, die die Eigenschaften der Schnittstellen PCI-Express und Display Port kombiniert. Es ist interessant, sie gerade mit der USB 3.0 Schnittstelle zu vergleichen.

## ZIELE

Studenten erfahren Näheres über grundlegende Prinzipien und Eigenschaften der aussichtsreichen Schnittstellen USB 3.0 und Thunderbolt. Sie erlangen Kenntnis über die Funktionsweise der Schnittstellen durch Beschreibung der einzelnen Schichten ihrer Modelle. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Protokollschicht. Das Modul beschreibt auch Unterschiede gegenüber den vorigen Schnittstellenversionen und ihre Abwärtskompatibilität mit ihnen.

## LITERATUR

- [1] HP, Intel, Microsoft, NEC, ST-Ericsson, Texas Instruments. *Universal Serial Bus 3.0 Specification* [online]. 2011, 2011-01-05 [cit. 2012-01-06]. Erhältlich auf: <http://www.usb.org/>. 531 Seiten.
- [2] INTEL CORPORATION. Thunderbolt Technology [online]. Intel corp., 2011. [2013-01-16]. Erhältlich auf: [http://download.intel.com/newsroom/kits/research/2011/pdfs/IntelThunderbolt\\_Overview.pdf](http://download.intel.com/newsroom/kits/research/2011/pdfs/IntelThunderbolt_Overview.pdf)
- [3] Martinek, T.: Architektura sběrnic PCI, PCI-X a PCI Express. [online]. [2013-04-03]. Erhältlich auf: <http://www.europen.cz/Proceedings/35/pci.pdf>
- [4] Thunderbolt Technology Community [online]. Intel corp. (2013) [2013-01-27] Erhältlich auf: <https://thunderbolttechnology.net/>

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Übersicht vielversprechender Hochgeschwindigkeits-Datenschnittstellen .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Schnittstelle USB 3.0 SuperSpeed.....</b>	<b>8</b>
2.1	Einleitung .....	8
2.2	Grundlegende Eigenschaften der Schnittstelle USB 3.0 .....	10
2.3	Die Architektur der Schnittstelle USB 3.0 .....	11
2.4	Modelle der Datenübertragungen .....	14
2.5	Burst-Übertragung.....	16
2.6	Pakete der Schnittstelle USB SuperSpeed.....	18
2.7	Übertragungsmodi .....	19
2.8	Stecker der Schnittstelle USB 3.0 .....	22
2.9	Verkabelung der Schnittstelle USB 3.0.....	24
2.10	Power Management.....	26
2.11	Inventarisierung des Busses .....	28
2.12	Endgeräte USB 3.0 .....	29
2.13	Hub der Schnittstelle USB 3.0 .....	30
2.14	Verwendungsmöglichkeiten der Schnittstelle USB 3.0 .....	31
<b>3</b>	<b>Schnittstelle Thunderbolt .....</b>	<b>32</b>
3.1	Charakteristiken der Schnittstelle.....	32
3.2	Architektur der Schnittstelle.....	34
3.3	Datenübertragung .....	37

# 1 Übersicht vielversprechender Hochgeschwindigkeits-Datenschnittstellen

Datenschnittstellen können gemäß den physikalischen Medien, die die Daten zwischen dem Host und dem angeschlossenen Gerät übertragen, in verschiedene Kategorien eingeteilt werden. Für die Übertragung werden vor allem

- metallische,
- optische oder
- drahtlose

Verbindungen genutzt. Jeder dieser Typen hat seine Vor- und Nachteile, die seine überwiegende Anwendung bestimmen. Im Allgemeinen kann man sagen, dass die Hauptparameter bei der Auswahl des Schnittstellentyps die folgenden sind: **Preis** (Vorteil bei Schnittstellen mit metallischen Leitern), **Datenrate** (Vorteil bei optischen Schnittstellen) und **Mobilität** (Vorteil bei drahtlosen Schnittstellen).

**USB-Schnittstellen** (*universeller serieller Bus*, engl. *Universal Serial Bus*) gehören zu Schnittstellen mit metallischen Leitern und sind die meistverwendeten, hauptsächlich dank ihres niedrigen Preises und ihrer hohen Übertragungsrate. Ihr wichtigster Konkurrent, die Schnittstelle Firewire, erzielte nie eine solche Verbreitung, vor allem wegen des höheren Preises bei einer ähnlichen Datenrate.

Heutzutage ist die größte Konkurrenz für die Schnittstelle USB 3.0 die Schnittstelle Thunderbolt, in der heutigen Version mit metallischen Leitern, höheren Übertragungsraten bei kleineren Gemeinkosten und breiteren Entwicklungsmöglichkeiten in der Zukunft (es wird schon mit einer optischen Version gerechnet). Die Schnittstelle Thunderbolt ist im Wesentlichen eine externe Variante des Busses PCI Express und wurde schon in einigen Produkten der Firma Apple (z. B. zum Anschluss von Monitoren) verwendet.

Die Vorteile der Schnittstelle Bluetooth bestehen vor allem in der Mobilität der angeschlossenen Teilnehmer und in der Dauer ihrer Implementierung. Weil es sich um eine drahtlose Schnittstelle handelt, werden häufig diese beiden Vorteile im Vergleich zu den klassischen fixen Schnittstellen angeführt.

Vergleich der Parameter ausgewählter Typen von gegenwärtigen Schnittstellen

<b>Schnittstelle</b>	<b>Übertragungsrate</b>	<b>Reichweite</b>	<b>Typ der Schnittstelle</b>
USB 3.0	Bis zu 5 Gbit/s	ca. 3 m	Metallische Leiter
USB 2.0	Bis zu 480 Mbit/s	5 m	Metallische Leiter
Firewire 800	Bis zu 3,2 Gbit/s	10 m	Metallische Leiter
Thunderbolt	Bis zu 10 Gbit/s	3 m	Metallische Leiter / optisch
Bluetooth 2.0	Bis zu 3 Gbit/s	10 m (Basis)	Drahtlos
HDMI 1.4	Bis zu 10,2 Gbit/s Video	ca. 10 m	Metallische Leiter
Wi-Fi (802.11n)	Bis zu 600 Mbit/s	Einige hundert m	Drahtlos
PCI Express 3.0	Bis zu 256 Gbit/s für 16xlink	-	Metallische Leiter
eSATA	Bis zu 3 Gbit/s	2 m	Metallische Leiter

## 2 **2** Schnittstelle USB 3.0 SuperSpeed

### 2.1 Einleitung

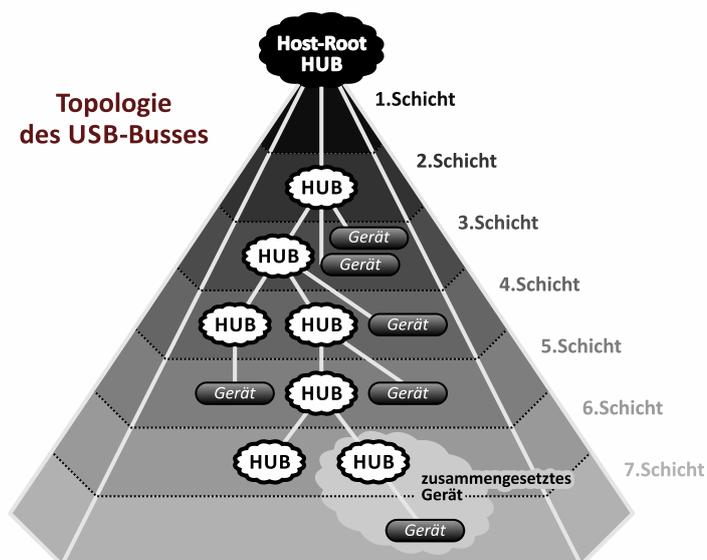
$E=m \cdot c^2$

Die Schnittstelle **USB** ist eine serielle Schnittstelle des Typs Bus. Zu ihren wichtigsten Vorteilen gehören:

- niedriger Preis,
- relativ hohe Übertragungsrate (in Abhängigkeit von der konkreten Spezifikation),
- volle Unterstützung der Audio- und Videodatenübertragung in Echtzeit,
- dynamische Skalierbarkeit (Unterstützung von Plug & Play, d. h. ohne Neustart des Gerätes und Installation von Treibern)
- und Versorgungsübertragung über den Bus (Gleichstromversorgung 5 V, Aufnahme von bis zu 100 mA (max. 500 mA)).



Alle Geräte, die über eine USB-Schnittstelle angeschlossen sind, teilen miteinander die ganze Breite des Übertragungsbandes. Das Bus-System an sich wird dann von einem zentralen Gerät (*Host-Root-Hub*) gesteuert, das Senden und Empfangen von Daten bzw. die Zusammenarbeit weiterer USB-Geräte koordiniert. Zwischen dem steuernden (zentralen) USB-Gerät und einem anderen USB-Gerät dürfen höchstens fünf Hubs sein. Die maximale Länge des Kabels zwischen zwei USB-Geräten wird auf 5 Meter beschränkt.



Topologie des klassischen USB-Bus-Systems



---

Die einzelnen USB-Geräte werden eindeutig mit einer USB-Adresse identifiziert, die gleich nach dem Anschluss des Gerätes an die Schnittstelle zugeordnet wird. An einen Bus können höchstens 127 Geräte angeschlossen werden.

---

### **Modi der Datenübertragungsraten**

---



- Supergeschwindigkeits-Datenübertragung (*Super Speed*) – Datenrate von bis zu 4,8 Gbit/s, Spezifikation USB 3.0
  - Hochgeschwindigkeits-Datenübertragung (*High Speed*) – Datenrate von bis zu 480 Mbit/s, Spezifikation USB 2.0
  - Vollgeschwindigkeits-Datenübertragung (*Full Speed*) – Datenrate von bis zu 12 Mbit/s, Spezifikation USB 1.1
  - Niedergeschwindigkeits-Datenübertragung (*Low Speed*) – Datenrate von bis zu 1,5 Mbit/s, Spezifikation USB 1.1
- 

### **Typen von USB-Geräten**

- USB-Hub – dient zur Erweiterung (Verlängerung) des USB-Systems
- USB-Endgerät – nutzt die Funktionalität der USB-Schnittstelle zur Datenübertragung bzw. zum Informationsaustausch aus.

## 2.2 Grundlegende Eigenschaften der Schnittstelle USB 3.0

Die neue Version der Schnittstelle USB 3.0 wurde mit dem Namen *SuperSpeed* im November 2008 geschaffen. Ihre praktische Einführung dauerte jedoch fast drei Jahre. Die Schnittstelle USB 3.0 ist der Nachfolger der USB-Schnittstelle der Version 2.0 und hat viele gemeinsame Eigenschaften mit den vorigen Versionen, weil eine der grundlegenden Anforderungen bei ihrer Entwicklung ihre Abwärtskompatibilität war. Was sind dann die Vorteile der neuen **USB**-Version gegenüber der vorigen Version?

+

- höhere Übertragungsrate – bis zu 5 Gbit/s
- volle Abwärtskompatibilität (mit Ausnahme einiger Stecker)
- verbessertes Power Management
- bis zu 80%iger Anstieg der möglichen Energieaufnahme vom Bus
- Pakete werden über den Bus geleitet (d. h. es handelt sich um eine selektive Datenweiterleitung an ein konkretes Gerät gemäß seiner Adresse)

Selbstverständlich hat die neue Version der USB-Schnittstelle nicht nur Vorteile, aber sie dominieren gegenüber den Nachteilen. Zu den Nachteilen gehören:

-

- Erhöhung der Anzahl von Leitern im Kabel
- höhere Empfindlichkeit gegen elektromagnetische Störung **EMI** (*Electromagnetic Interference*), die mit dem Ausnutzen von mehr Leitern im Kabel und mit einer höheren Modulationsrate zusammenhängt
- Begrenzung der Abwärtskompatibilität einiger Typen der Stecker

Spricht man über die neue Version des USB-Busses, muss bemerkt werden, dass es sich im Wesentlichen um einen Bus **USB 2.0** und einen neuen Bus **USB Superspeed** nebeneinander handelt. Dieses Phänomen wird weiter unten beschrieben.



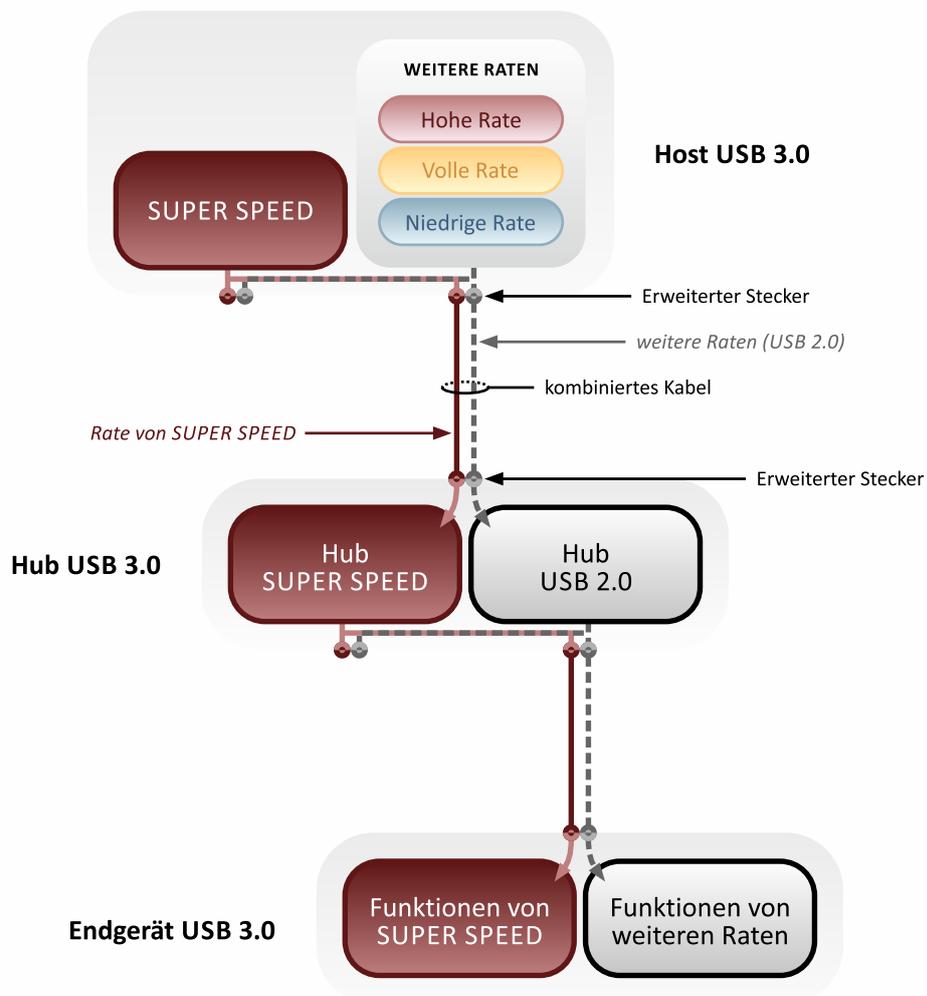
Die USB-Schnittstelle in der Version 3.0 erweitert erheblich Möglichkeiten und Anwendungen der vorigen Versionen der USB-Schnittstellen.

i

Seit Juli 2013 wurde der innovierte USB-Standard in der Version 3.1 (USB 3.1 Gen 2) vorbereitet. Diese Version wird als *SuperSpeed+* bezeichnet. Der Vorteil der neuen Generation der USB-Schnittstelle soll ihre Geschwindigkeit (von bis zu 10 Gbit/s) und die Reduzierung der Gemeinkosten beim Kodieren des Signals sein. Die Schnittstelle soll mit der Schnittstelle USB 3.0 abwärtskompatibel sein, d. h. man kann alle Geräte und Hubs für USB 3.0 und USB 2.0 weiter nutzen.

## 2.3 Die Architektur der Schnittstelle USB 3.0

Ähnlich wie bei der Schnittstelle USB 2.0 sind die grundlegenden Elemente der Architektur Host, Hub und Endgerät. Der Hauptunterschied gegenüber der Version USB 2.0 ist der parallele Anschluss von zwei physikalischen Bussen, konkret des USB 2.0 und des neuen USB SuperSpeed.



**Bemerkung:** Ein gleichzeitiger Betrieb im Modus **SUPER SPEED** und im weiteren Modus wird in Endgeräten nicht erlaubt.

Architektur der Schnittstelle USB 3.0 SuperSpeed



Mit der Wahl dieser Architektur wird die Abwärtskompatibilität gewährleistet, weil Host und Hub den gleichzeitigen Betrieb von beiden physikalischen Bussen mittels kombinierter Kabel und Stecker ermöglichen. Das Endgerät nutzt dann gemäß seinen Möglichkeiten entweder einen Teil des Busses USB 2.0, oder USB Superspeed aus.



Ähnlich wird die physische Topologie des Busses bzw. die Baumstruktur erhalten. Dabei bleibt der Host in der „Wurzel“ dieser Baumstruktur. An den Host kann eine größere Anzahl von Endgeräten oder Hubs angeschlossen werden.

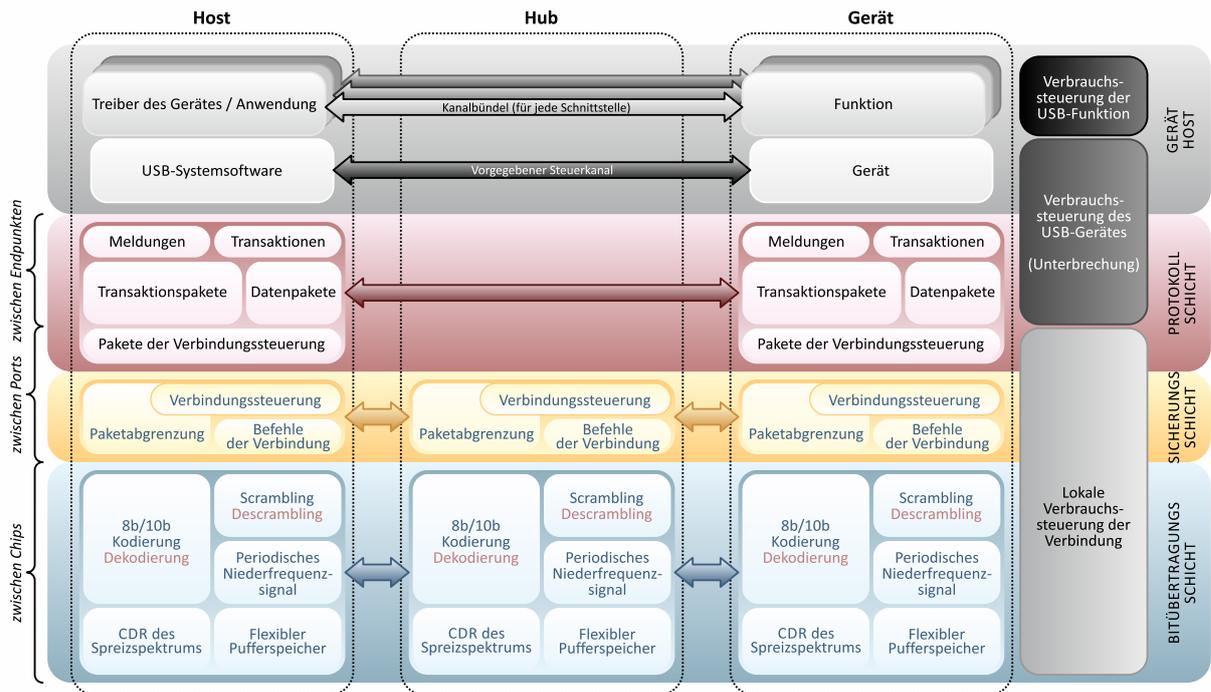


Hubs können dann einen Anschluss für weitere Endgeräte oder Hubs zur Verfügung stellen.

Vergleich von USB SuperSpeed und USB 2.0

Eigenschaft	USB SuperSpeed	USB 2.0
Datenkanäle	zwei Simplexe – gleichzeitiger Datenfluss in beiden Richtungen, zwei Leiter für jede Richtung (insgesamt 4)	Halbduplex – Datenfluss in einer Richtung mit einer verhandelten Richtungsänderung, zwei Leiter
Übertragungsrate	SuperSpeed – 5 Gbit/s	Gemäß Modus 1,5 – 480 Mbit/s
Übertragungsprotokoll	Asynchroner, vom Host gesteuerter Datenfluss, geleitete Pakete	Der Host teilt Datenfluss zu (engl. polling), Pakete werden in allen Richtungen gesendet
Power Management	Auf der Ebene von Verbindung, Gerät und Funktion, einige Zustände	Auf der Ebene von Verbindung und Gerät, nur Zustand Unterbrechung
Versorgung des Busses	Ähnlich wie bei USB 2.0, höhere Grenzen (um 50 % für nicht konfigurierte und um 80 % für konfigurierte Geräte)	Geräte mit einer niedrigen und hohen Leistung, niedrigere Grenzen für nicht konfigurierte Geräte

Jede Verbindung zwischen dem Host und einem Gerät (gegebenenfalls mit Hubs) kann mittels einer sog. Kommunikationsschicht dargestellt werden. Auf dem folgenden Bild sind die einzelnen Schichten der Verbindung (siehe Zeilen), ihre Elemente in den einzelnen Teilen der Topologie (siehe drei linke Spalten) und der Einfluss des Power Managements (siehe rechte Spalte) dargestellt.



Kommunikationsschichten des Busses SuperSpeed



Die Schnittstelle USB 3.0 ist ein Dualbus (*Dual Bus Architecture*), der eine parallele Verbindung von USB 2.0 und des neuen Busses USB SuperSpeed bildet. Dank dieser Konzeption wird es möglich sein, Endgeräte USB 2.0 auf Controllern USB 3.0 zu verwenden. Auf einem Endgerät können beide Busse jedoch nicht zugleich genutzt werden.

## 2.4 Modelle der Datenübertragungen



Die Schnittstelle USB SuperSpeed übernimmt Modelle der Datenübertragungen von der Schnittstelle USB 2.0. Der Datenaustausch zwischen dem Endgerät und dem Host erfolgt mittels sog. Kanäle (engl. *pipe*). Datenübertragungen werden so zwischen dem mit der Funktion assoziierten Endgerät und der Software des Hosts realisiert.

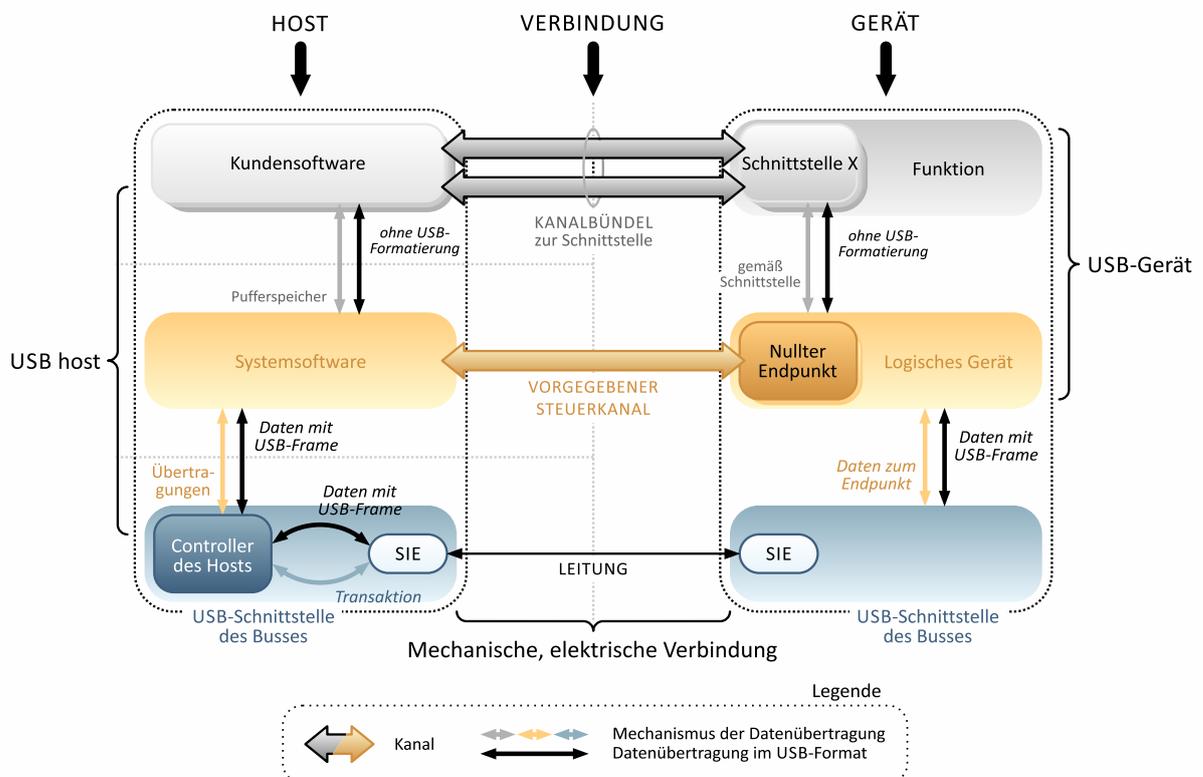


Selbstverständlich spricht man über eine logische Verbindung, die physikalische Verbindung wird immer von einem einzigen Kabel gebildet.

Außer dem vorgegebenen Steuerkanal und Endpunkt werden alle Kanäle und Endpunkte bei der Konfiguration des Gerätes gebildet und unterstützen einen der vier Übertragungsmodi – Übertragung großer Datenmengen (bulk transmission), Steuerungsübertragung (control transmission), synchrone Übertragung und Übertragung mit Unterbrechung.



Wie bei der Schnittstelle USB 2.0 gibt es zwei Typen der Kanäle – Kanäle für Datenströme (sie haben keine von der **USB**-Schnittstelle gegebene Struktur) und Nachrichtenkanäle (ihr Format wird von der **USB**-Schnittstelle definiert).



Modell der Datenübertragungen auf USB



---

Abschließend kann man sagen, dass die Kommunikation auf dem **USB-Bus** zwischen der Host-Software und dem Endgerät über virtuelle Kanäle erfolgt.

---

## 2.5 Burst-Übertragung



Burst-Übertragung ist eine neue Funktion von USB SuperSpeed, die die Effektivität von Übertragungen erhöht, indem auf eine Bestätigung jedes Datenpakets nicht gewartet wird. Jeder Endpunkt des Gerätes SuperSpeed führt in seinem Kennsatz die maximale Anzahl von Paketen an, die er empfangen oder senden kann, ohne dass auf ihre Bestätigung (Zustand) gewartet wird.



Der Host kann die Anzahl von Paketen im Bündel für jede Transaktion gemäß seinen Anforderungen dynamisch ändern (er kann jedoch die maximale Größe des Bündels für den gegebenen Endpunkt nicht überschreiten). Im Fall von OUT-Transaktionen beschränkt dann der Host die Größe des Bündels einfach, bei den IN-Transaktionen wird sie mittels des Felds in den Bestätigungspaketen **ACK** (*ACKnowledge*) eingestellt.



Die Burst-Übertragung ist daher eine Funktion des Busses SuperSpeed, die eine gleichzeitige Sendung von mehr Datenpaketen ermöglicht, ohne dass auf die Bestätigung ihres Empfangs gewartet werden muss.

### 1. IN-ÜBERTRAGUNGEN

Bei einer IN-Übertragung sendet das Endgerät Daten an den Host. Diese Übertragungen werden vom Host durch Sendung eines bestätigenden IN-Pakets dem Endgerät angefangen. Dieses Paket wird mittels der darin beinhalteten Informationen an das Endgerät geleitet. Ein Bestandteil davon ist auch Information über die erwartete Ablaufnummer des Pakets und Anzahl der erwarteten Pakete. Als Antwort sendet das Endgerät dem Host Datenpakete mit entsprechenden Ablaufnummern.



Obwohl der Host mit einem **ACK**-Bestätigungspaket jedes empfangene Datenpaket bestätigen muss, kann das Endgerät alle geforderten Datenpakete ohne Warten auf ihre Bestätigung senden.



Eine IN-Übertragung von SuperSpeed besteht aus einer oder mehr IN-Transaktionen mit einem oder mehr Paketen. Sie wird abgeschlossen, falls alle übertragenen Daten erfolgreich empfangen werden, falls der Endpunkt ein Paket gesendet hat, dessen Größe kleiner als die maximale Größe für den gegebenen Endpunkt ist, oder falls der Endpunkt mit einem Fehler antwortet.

### 2. OUT-ÜBERTRAGUNGEN

Bei einer OUT-Übertragung sendet der Host Daten ans Endgerät. Der Host beginnt die OUT-Übertragung mit der Sendung einer ununterbrochenen Folge von Datenpaketen ans Endgerät. Jedes Datenpaket beinhaltet die für seine Leitung

erforderlichen Informationen und seine Ablaufnummer. Das Endgerät antwortet mit einem **ACK**-Bestätigungspaket, das die Ablaufnummer des nächsten erwarteten Pakets beinhaltet, das zugleich einen erfolgreichen Empfang des vorigen Pakets bestätigt.



---

Ähnlich wie bei einer IN-Übertragung muss das Endgerät ein **ACK**-Bestätigungspaket für jedes empfangene Datenpaket senden, jedoch muss der Host auf diese **ACK**-Bestätigungspakete nicht warten.

---



---

Eine OUT-Übertragung von SuperSpeed besteht aus einer oder mehr OUT-Transaktionen mit einem oder mehr Paketen. Sie wird abgeschlossen, falls alle übertragenen Daten erfolgreich gesendet werden, falls der Host ein Paket gesendet hat, dessen Größe kleiner als die maximale Größe für den gegebenen Endpunkt ist, oder falls der Endpunkt mit einem Fehler antwortet.

---

## 2.6 Pakete der Schnittstelle USB SuperSpeed

---



$E=m \cdot c^2$

Alle Pakete der Schnittstelle USB SuperSpeed fangen mit einem 16-Bit-Header an, der das ganze Paket bilden kann. Der Paketheader beginnt mit der Information über den Pakettyp, der zur Feststellung der Art der Paketverarbeitung verwendet wird. Der Paketheader wird mit einem 16-Bit-Code **CRC** (*zyklische Redundanzprüfung*, engl. *Cyclic Redundancy Check*) geschützt und endet mit einem 2-Byte-Steuerwort. Die meisten Pakettypen beinhalten auch Informationen für die Leitung, die bei der Übertragung des Pakets vom Host verwendet wurden.

---



Die Schnittstelle USB SuperSpeed unterstützt vier Pakettypen:

- Das Paket der Verbindungsverwaltung **LMP** (*Link Management Packet*) wird nur zwischen zwei direkt verbundenen Ports gesendet und ist zur Steuerung dieser Verbindung bestimmt.
  - Das Transaktionspaket **TP** (**Transaction Packet**) geht durch alle Verbindungen auf dem direkten Pfad zwischen dem Gerät und dem Host durch, wird zur Steuerung des Flusses von Datenpaketen, Konfiguration der Geräte und Hubs verwendet und wird nur mit Header gebildet.
  - Das Datenpaket **DP** (*Data Packet*) geht auch durch alle Verbindungen auf dem direkten Pfad zwischen dem Gerät und dem Host durch und hat zwei Teile – Header des Datenpakets (ähnlich wie Transaktionspaket) und Benutzerdaten des Datenpakets (sie beinhalten einen Datenblock und einen 32-Bit-Code **CRC**).
  - Das isochrone Zeitstempelpaket **ITP** (*Isochronous Timestamp Packet*) ist ein Paket, das mit dem Multicast-Verfahren an alle Verbindungen im aktiven Zustand gesendet wird.
- 



Die Schnittstelle USB SuperSpeed nutzt vier Pakettypen: Paket der Verbindungsverwaltung **LMP**, Transaktionspaket **TP**, Datenpaket **DP** und isochrones Zeitstempelpaket **ITP**.

---

## 2.7 Übertragungsmodi

---

$E=m \cdot c^2$

Datenübertragungen bestehen aus einer oder mehr Transaktionen von Paketen. Die einzelnen Übertragungsmodi entsprechen dann den verwendeten Pakettypen.

---

### 1. STEUERUNGSÜBERTRAGUNG (CONTROL TRANSMISSION)

Der Zweck und die Funktion der Steuerungsübertragung sind praktisch identisch mit der Schnittstelle USB 2.0, sie ermöglicht die Kommunikation zwischen der Software des Hosts und dem Endgerät zum Zwecke der Konfiguration, Steuerung und Zustandserkennung.

Die Steuerungsübertragung nutzt die Nachrichtenkanäle und jedes Gerät muss den vorgegebenen Steuerungskanal unterstützen. Steuerungsübertragungen haben die höchste Priorität auf dem Bus. Ähnlich wie bei der Schnittstelle USB 2.0 kann eine konkrete Bandbreite nicht gefordert werden. Die maximale Länge der nutzbaren Daten beträgt 512 Bytes und man kann die Burst-Übertragungen nicht anwenden.

### 2. ÜBERTRAGUNG GROSSER DATENMENGEN (BULK TRANSMISSION)

Wie bei einer Steuerungsübertragung entspricht eine Übertragung großer Datenmengen der Übertragung durch eine USB 2.0-Schnittstelle. Sie ist für die Endgeräte bestimmt, die ein relativ großes Datenvolumen übertragen müssen. Sie nutzt jede verfügbare Bandbreite (niedrige Priorität) aus, zum Beispiel zum Kopieren von Daten auf eine externe Festplatte.

Übertragungen großer Datenmengen garantieren die Zustellung von Daten, jedoch nicht die Bandbreite und Verzögerung. Sie nutzen Kanäle für Datenströme aus, so dass keine Anforderungen an die Datenstrukturen gestellt werden. Die Kanäle für Datenströme haben nur eine Richtung - für den Zweiweg-Datenfluss braucht man zwei Kanäle (IN und OUT). Die Übertragung großer Datenmengen kann in mehrere Transaktionen aufgeteilt werden.

### 3. ÜBERTRAGUNG GROSSER DATENMENGEN MIT DATENSTRÖMEN (BULK TRANSMISSION WITH STREAMS)

Es handelt sich um einen ganz neuen Übertragungsmodus der Schnittstelle USB SuperSpeed. Ein üblicher Kanal für eine Übertragung großer Datenmengen stellt die Fähigkeit dar, einen Datenstrom des Typs **FIFO** (*First In First Out*) zwischen dem Host und dem Endgerät durch Speicherpuffer des Hosts zu verschieben. Die Datenströme SuperSpeed (*SuperSpeed Streams*) unterstützen das Modell mit mehreren Datenströmen auf der Protokollebene. Die Datenströme zwischen dem Host und dem Endgerät werden von einem Protokoll für Datenströme verwaltet. Jedem Datenstrom wird eine **SID** (*Stream ID*) zugeteilt.

$E=m \cdot c^2$

---

Das Protokoll für Datenströme definiert Zustandsnachrichten, die es dem Host oder dem Endgerät ermöglichen, die aktuelle ID **CSID** (*Current Stream ID*) des Endpunktes festzulegen. Der Host verwendet die **CSID** zur Wahl des Pufferspeichers des Endpunktes, der bei den folgenden Übertragungen auf dem

Kanal benutzt wird. Das Endgerät setzt die **CSID** zur Wahl des Pufferspeichers der Daten der Funktion ein.

---



Die Datenströme SuperSpeed ermöglichen es dem Endgerät, mehr Pufferspeicher des Hosts auszunutzen (standardmäßig wird nur ein Speicher benutzt). Im Fall eines Versagens des üblichen Kanals für große Datenmengen, den die Datenströme SuperSpeed anwenden, kommt es zur Unterbrechung der Datenströme. Die Datenströme SuperSpeed erweitern die Möglichkeiten der Übertragungen großer Datenmengen mit einer minimalen Änderung der Hardware. Anwendung finden sie zum Beispiel auch bei USB Mass Storages.

---

#### 4. ÜBERTRAGUNG MIT UNTERBRECHUNG

Ähnlich wie auf der Schnittstelle USB 2.0 ist die Übertragung mit Unterbrechung für die Endgeräte bestimmt, die eine hohe Zuverlässigkeit des Verschiebens eines kleinen Datenvolumens in einem begrenzten Betriebsintervall erfordern, beispielsweise Maus oder Tastatur. Der Host fordert in regelmäßigen Intervallen Daten, die das Endgerät entsprechend seiner Möglichkeiten liefert.

Übertragung mit Unterbrechung garantiert ein maximales Betriebsintervall (Datenverzögerung). Sie verwendet Kanäle für Datenströme, so dass die Daten kein definiertes Format haben müssen und der Kanal in einer Richtung arbeiten kann. Den Übertragungen mit Unterbrechung kann bis zu 90 % der verfügbaren Bandbreite zugeteilt werden. Der Endpunkt kann in seinem Kennsatz ein Betriebsintervall in Vielfachen von 125  $\mu$ s verlangen. Dies ermöglicht eine Sendung von drei Paketen per Betriebsintervall.

#### 5. SYNCHRONE ÜBERTRAGUNG

Die synchrone Übertragung und ihr Zweck wurde gegenüber der Schnittstelle USB 2.0 nicht geändert. Sie dient zum Datenstreaming, d. h. für periodische Übertragungen mit einem begrenzten Betriebsintervall und Fehlertoleranz, was einen kontinuierlichen Datenfluss ermöglicht. Die Schnittstelle USB SuperSpeed nutzt für die Synchronisierung isochrone Zeitstempelpakete **ITP** aus.

Die synchrone Übertragung garantiert eine Bandbreite für Übertragungen mit einer begrenzten Verzögerung und auch wird die geforderte, im Kennsatz angegebene Bandbreite sichergestellt. Synchrone Kanäle sind Kanäle für Datenströme mit einer Richtung des Datenflusses. Wegen einer möglichen Verzögerung der Übertragung, die durch Power Management verursacht wird, sendet der Host vor der Aufnahme der Übertragung ein Transaktionspaket (*PING*) an das Gerät, wobei alle Verbindungen auf dem Pfad in den aktiven Zustand gebracht werden. Die maximale Bandbreite und Betriebsintervalle entsprechen einer Übertragung mit Unterbrechung. Synchrone Übertragung ermöglicht höchstens drei Burst-Übertragungen mit 16 Paketen pro Betriebsintervall.



---

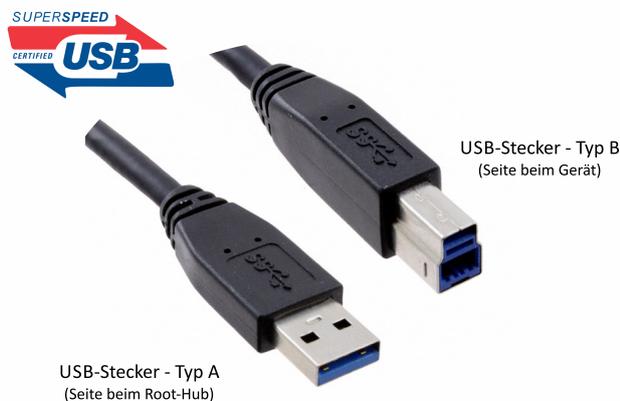
Wie bei der Schnittstelle USB 2.0 gibt es hier vier grundlegende Übertragungsmodi – Steuerungsübertragung, Übertragung großer Datenmengen, Übertragung mit Unterbrechung und synchrone Übertragung. Die Schnittstelle USB SuperSpeed bietet überdies Erweiterung der Übertragung großer Datenmengen um die Datenströme SuperSpeed.

---

## 2.8 Stecker der Schnittstelle USB 3.0

Die Stecker der Schnittstelle USB 3.0 wurden auf der Basis der folgenden Anforderungen entwickelt: höhere Datenrate, Begrenzung des Einflusses der elektromagnetischen Störung, Mobilitätsunterstützung und niedriger Preis. Darüber hinaus soll die maximale Kompatibilität mit der Schnittstelle USB 2.0 erhalten bleiben. Die Spezifikation der Schnittstelle USB 3.0 definiert die gleichen Stecker-Typen wie die Schnittstelle USB 2.0 mit Ausnahme eines neuen Typs: Typ-B-Stecker mit einer zusätzlichen Spannungsversorgung.

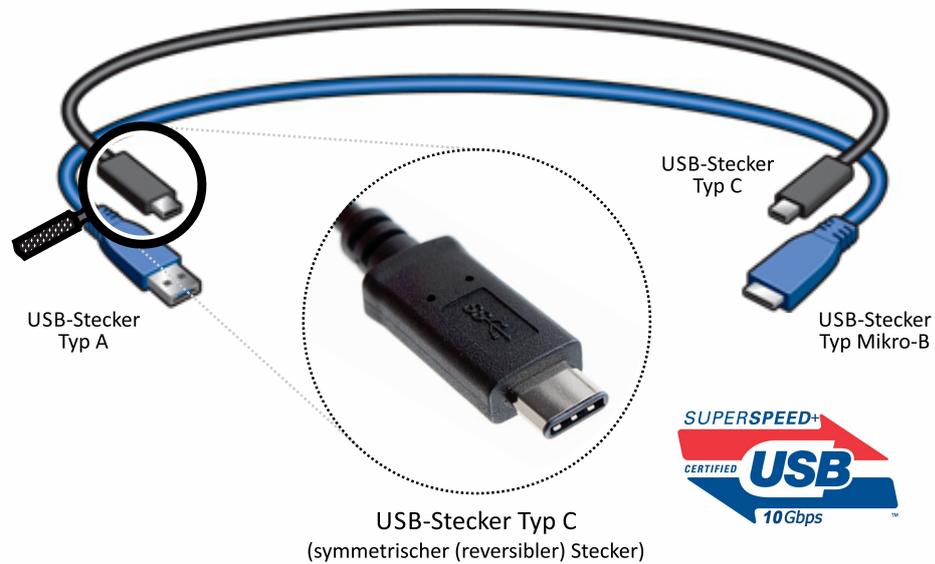
1. Typ-A-Stecker – vielleicht der meistbenutzte Stecker, Stecker des Hosts, Form und Abmessungen entsprechen dem Stecker der USB 2.0-Schnittstelle, jedoch mit ergänzten Kontakten für weitere zwei Datenpaare und Erdung; leistet komplette Abwärtskompatibilität, zur Unterscheidung soll eine entsprechende Farbe eingesetzt werden (siehe folgendes Bild).
2. Typ-B-Stecker – zum Anschluss größerer stationärer Geräte bestimmt, gewährleistet keine komplette Abwärtskompatibilität, durch eine größere Ausführung wegen ergänzter Kontakte, man kann daher den Stecker USB 2.0 in die Steckdose USB 3.0 einstecken, aber umgekehrt gilt das nicht; der Stecker unterscheidet sich nur durch zwei zusätzliche Kontakte für die Spannungsversorgung.



Standardmäßige Typ-A- und -B-Stecker

3. Typ-A- und -B-Mikrostecker – für relativ kleine und leichte Geräte bestimmt, dementsprechende Größe und daher, gleich wie Typ-B-Stecker, bietet keine komplette Abwärtskompatibilität; es gibt Typ-B- und -AB-Steckdosen: in die Typ-AB-Steckdose können sowohl Typ-A- als auch -B-Stecker, in die Typ-B-Steckdose dann nur Typ-A-Stecker eingesteckt werden.
4. Typ-C-Stecker – neuer universeller Stecker für die USB-Schnittstelle, der mechanisch symmetrisch ist (d. h. man muss die Einsteckrichtung nicht

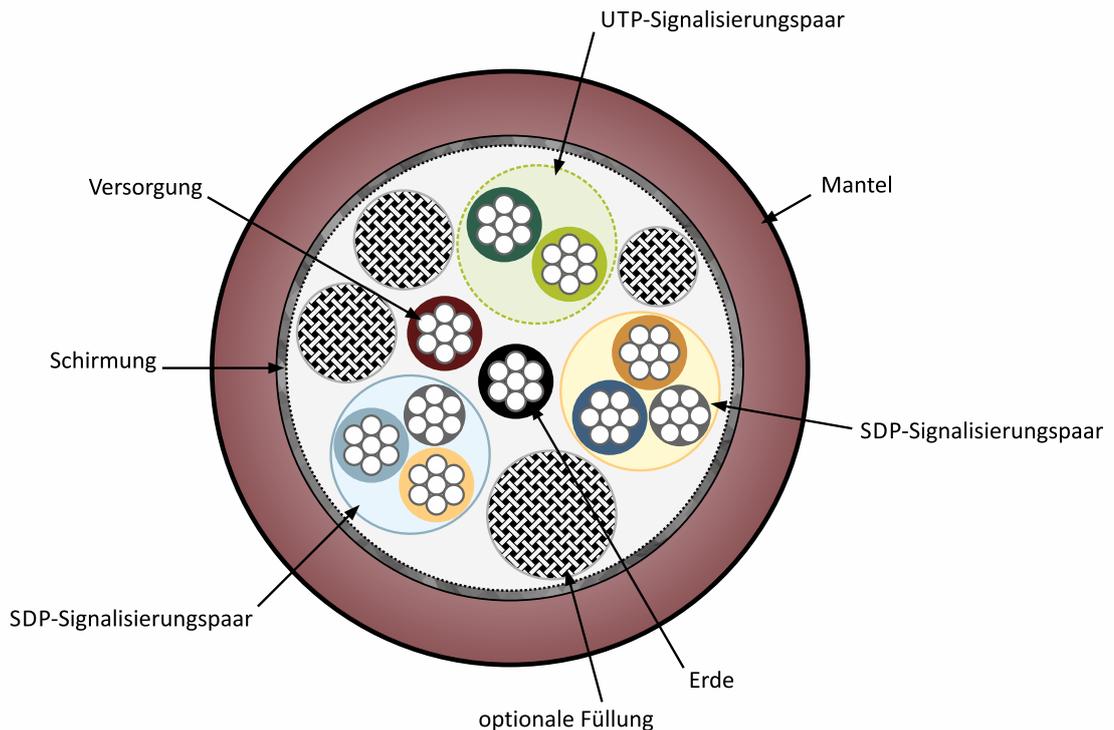
unterscheiden). Im Kabel sind 24 Leiter für Versorgung, Daten USB 2.0, 2× Daten USB 3.0, Konfigurationspole und Pole für weitere Zwecke angeordnet. Eine wählbare Option ist ein sog. aktives Kabel (mit Chip). Die Versorgung erfolgt klassisch - 5 V mit Strom von bis zu 3 A (höchstens 20 V mit Strom von 5 A). Abmessungen des Steckers sind 8,4×2,6 mm. Der neue Stecker unterstützt implizit auch alternative Übertragungsprotokolle.



Symmetrischer USB-Typ-C-Stecker

## 2.9 Verkabelung der Schnittstelle USB 3.0

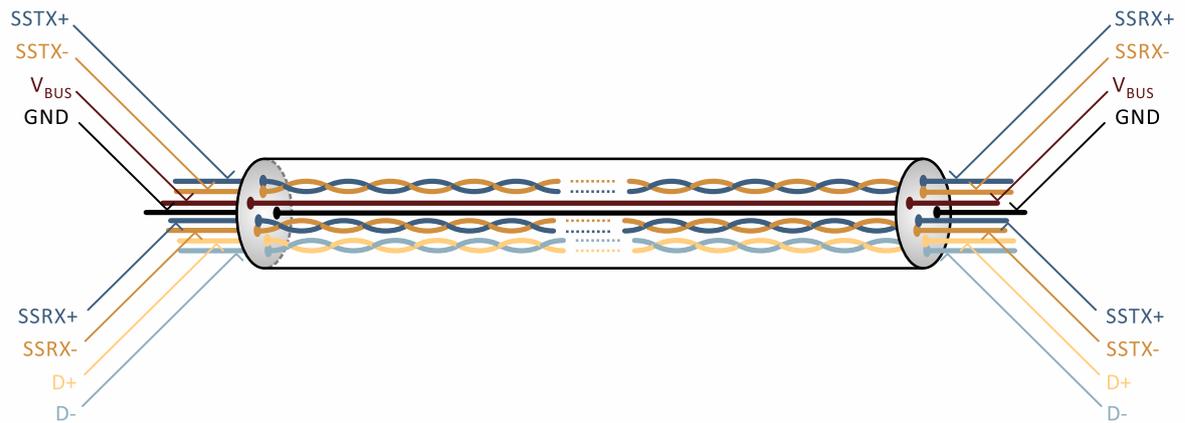
Das folgende Bild stellt den Querschnitt eines Kabels der Spezifikation USB 3.0 dar. Man kann drei Leitergruppen erkennen – Signalisierungspaar **UTP** (*ungeschirmtes verdrilltes Paar*, engl. *Unshielded Twisted Pair*), verdrillte Paare **SDP** (*geschirmtes Differentialpaar*, engl. *Shielded Differential Pair*) und Versorgungs- und Erdungsleiter.



Querschnitt des Kabels der Spezifikation USB 3.0



**UTP** wird zur Übertragung von Signalen des USB 2.0-Standards, **SDP** für die Spezifikation USB SuperSpeed verwendet. Wie der Name schon verrät, haben **SDP** eine eigene Schirmung wegen der Integrität des Signals und der Reduktion der **EMI**-Störung. Überdies wird zu jedem geschirmten Paar ein weiterer Leiter ergänzt, der als *DRAIN* bezeichnet wird und an den geerdeten Pin im Stecker angeschlossen wird (anders als bei der Erdung der Versorgung, *GND\_DRAIN*).



Schema des Kabels der Spezifikation USB 3.0



Die Schirmung, die alle Leiter abschließt, besteht aus einer metallischen Beflechtung, die an den Metallteil des Steckers angeschlossen ist, und dient zum Schutz gegen **EMI**-Störungen. Die Farben auf den Bildern entsprechen den Farben der Leiterisolationen.



Die Kabellänge wird nicht von der Spezifikation, sondern von Verlusten bei der Zusammenstellung und Spannungsabsenkung auf der gegebenen Leiterlänge begrenzt. Diese Verluste pro Kabel dürfen die Grenze von 20 dB nicht überschreiten. Das entspricht der maximalen empfohlenen Kabellänge von 3 m.

## 2.10 Power Management

Die Schnittstelle USB 3.0 leistet Stromversorgung durch zwei Stecker - Typ-A-Stecker und Typ-B-Stecker mit einer zusätzlichen Spannungsversorgung. Die Stromversorgung durch einen Typ-A-Stecker hat ähnliche Eigenschaften wie bei der Schnittstelle USB 2.0, wo wieder Einheitslast einfachheitshalber definiert wird. Bei der Schnittstelle USB SuperSpeed wird jedoch der Strom der Einheit auf 150 mA erhöht. Eine USB-Schnittstelle unterstützt einige Typen für Netzgeräte und Verbraucher:

- Root-Hub – direkt an USB-Controller des Hosts angeschlossen; Ports des an Spannungsquelle angeschlossenen Hosts müssen mindestens 6 Belastungseinheiten leisten; bzw. Ports des Hosts, dessen Spannungsquelle eine Batterie ist, können die Belastung von nur 1 Einheit erlauben.
- Hub mit eigener Stromversorgung – nimmt keine Energie für seinen Betrieb und Downlink-Ports vom Leiter  $V_{BUS}$  auf und trotzdem kann er bis zu 1 Belastungseinheit für Uplink-Ports im Fall des ausgeschalteten Rests des Hubs aufnehmen; jeder Downlink-Port leistet dann bis zu 6 Belastungseinheiten.
- Gerät mit einer niedrigen Leistung – erhält die notwendige Energie vom Leiter  $V_{BUS}$ ; nimmt nicht mehr als 1 Belastungseinheit auf.
- Gerät mit einer hohen Leistung – erhält die Energie vom Leiter  $V_{BUS}$ ; nach der Einschaltung kann es bis zu 1 Belastungseinheit, nach der Konfiguration dann bis zu 6 Einheiten aufnehmen.
- Gerät mit eigener Stromversorgung – kann höchstens 1 Belastungseinheit vom Leiter  $V_{BUS}$  zur Sicherstellung der Funktion des Ports aufnehmen, und zwar auch nach dem Ausschalten des Rests des Gerätes.

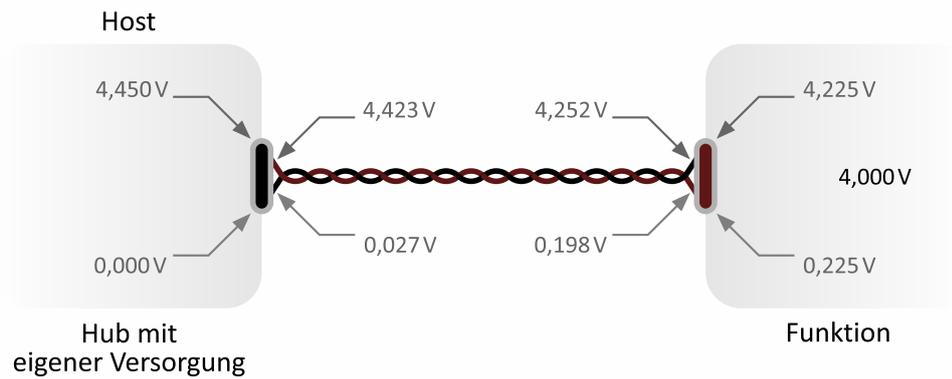


---

Kein Gerät darf Strom zum Leiter  $V_{BUS}$  des Uplink-Ports liefern. Ähnlich wie bei der Schnittstelle USB 2.0 muss bei Host und Hubs mit eigener Versorgung ein Schutz gegen Stromüberlastung vorgenommen werden. Die Wiederherstellung einer normalen Funktion ist ohne Eingriff des Benutzers möglich.

---

Der größte zulässige Spannungsabfall im Rahmen der Bustopologie wird auf dem folgenden Bild gezeigt.



Bustopologie bei dem größten zulässigen Spannungsabfall

Der Typ-B-Stecker mit einer zusätzlichen Spannungsversorgung wurde eingeführt, um weiteren Geräten (z. B. Drucker) Anschluss und Stromversorgung von anderen Geräten (z. B. Adapter eines drahtlosen USB) zu ermöglichen. Das eliminiert den Bedarf an externen Netzgeräten. Der Typ-B-Stecker mit einer zusätzlichen Spannungsversorgung muss imstande sein, die Spannung von 5 V im ganzen Strombereich bis zu 1 A zu halten, Schutz gegen Stromüberlastung sicherzustellen und die maximale Energie ohne Rücksicht auf den Zustand des Endgerätes zu liefern. Das Endgerät, das die Stromversorgung durch diesen Stecker liefert, muss eine niedrige Leistung haben und das Endgerät, das durch diesen Stecker versorgt wird, kann keinen Typ-A-Stecker haben.

## 2.11 Inventarisierung des Busses

Beim Anschluss oder Abschalten des Endgerätes vom USB-Bus verwendet der Host zur Identifikation und Verwaltung des Zustandes des Endgerätes den Prozess der Inventarisierung des Busses. Dieser Prozess besteht aus den folgenden Schritten:



1. Der Hub, an den das Gerät angeschlossen ist, informiert den Host über dieses Ereignis durch einen speziellen Kanal (das Endgerät ist in diesem Moment nach dem Befehl *RESET* im Ausgangszustand, d. h. es kann nicht mehr als 150 mA vom  $V_{BUS}$  aufnehmen und antwortet auf der vorgegebenen Adresse).
2. Der Host bestimmt dann die genaue Art des Ereignisses mit der Abfrage des Hubs; wenn der Host den Port kennt, an den das Endgerät angeschlossen ist, kann er einen erneuten Befehl *RESET* des Endgerätes ausführen.
3. Nachfolgend ordnet der Host dem Gerät eine unikale Adresse zu und informiert es über eine synchrone Verzögerung und weitere Parameter.
4. Dann werden alle Konfigurationen des Endgerätes vom Host gelesen und gegebenenfalls Zeitschalter  $U1/U2$  für Downlink-Port eingestellt, an den das Endgerät angeschlossen ist.
5. Aufgrund der Informationen über Konfigurationen und Anwendung des Endgerätes bestimmt der Host die Werte, die für die Einstellung des Endgerätes notwendig sind. Das Endgerät geht dann in den Zustand *EINGESTELLT* über und wird so zum Einsatz vorbereitet.

---

Wenn das Ereignis die Abschaltung des Gerätes ist, sendet der Hub eine Meldung und der Host kann die lokale Information über Topologie aktualisieren.

## 2.12 Endgeräte USB 3.0

---

$E=m \cdot c^2$

Alle Endgeräte USB 3.0 unterstützen eine gemeinsame Menge von allgemeinen Operationen. Hier sind sie übersichtlich aufgelistet – dynamischer Anschluss und Abschalten, Zuordnung der Adresse, Konfiguration, Datenübertragung, Power Management, Verarbeitung einer Anforderung und Fehler der Anforderung.

---

$E=m \cdot c^2$

Endgeräte melden ihre Eigenschaften mittels sog. Kennsätze. Ein Kennsatz ist eine Datenstruktur eines definierten Formats. Jeder Kennsatz fängt mit einem Feld (1 Byte) an, das die Anzahl von Bytes des Kennsatzes beinhaltet. Danach folgt ein Feld (1 Byte), das den Typ des Kennsatzes bestimmt.

---

Jede Konfiguration kann auch Kennsätze oder ihre Teile von weiteren Konfigurationen verwenden. Endgeräte können auch spezielle Kennsätze gemäß ihrer Klasse oder Hersteller haben.

---



Die Kennsätze können folgende Typen sein – Kennsatz eines Gerätes, Kennsatz einer Konfiguration, Kennsatz der verknüpften Schnittstellen, Kennsatz einer Schnittstelle, Kennsatz eines Endpunktes, Kennsatz eines Endpunktes SuperSpeed, Kennsatz einer Zeichenkette und binärer Speicher der Objekte eines Gerätes **BOS** (*Binary Device Object Store*).

---

Der Kennsatz **BOS** definiert einen Root-Kennsatz, der ähnlich wie Kennsatz einer Konfiguration ist und Ausgangspunkt für Zugriff an Satz der zusammenhängenden Kennsätze darstellt. Diese Kennsätze werden dann in verschiedene Typen unterteilt. *Drahtlose USB* beschreibt die Fähigkeiten des Gerätes für Schnittstelle einer drahtlosen **USB**. *Erweiterung USB 2.0* ist ein Kennsatz, der die Möglichkeit eines verbesserten Power Managements auch im Hochgeschwindigkeitsmodus der USB 2.0 indiziert. *Fähigkeit eines Gerätes SuperSpeed USB* beschreibt zum Beispiel Unterstützung von verschiedenen Geschwindigkeitsmodi oder Dauer der Übergänge vom Zustand  $U_1$  und  $U_2$  in den Zustand  $U_0$ . Der letzte Kennsatz ist *ID des Containers*, die dem Host eine Identifikation des Gerätes ohne Rücksicht auf dem Modus ermöglicht, in dem das Endgerät arbeitet.

## 2.13 Hub der Schnittstelle USB 3.0

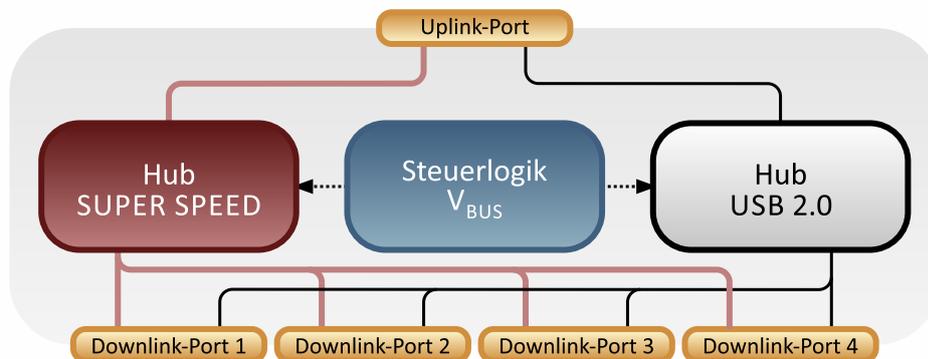
$E=m \cdot c^2$

Die Schnittstellen-Hubs stellen eine elektrische Verbindung zwischen dem Host und den Endgeräten sicher. Sie erlauben eine einfachere Handhabung durch den Benutzer. Sie überwachen das Verhalten beim Anschließen des Gerätes, Power Management, Erkennung von Fehlern, Fehlerkorrektur und die Unterstützung aller Geschwindigkeitsmodi.

Der Hub USB 3.0 beinhaltet einen Hub USB 2.0 und einen Hub SuperSpeed. Der Hub SuperSpeed besteht weiter aus einem Repeater und einem Hub-Controller:

- Der Repeater dient zur Vermittlung der Verbindung, Erkennung des Anschlusses und Abschaltens des Gerätes, Fehlererkennung und -korrektur.
- Der Controller stellt die Kommunikation zwischen dem Hub und Host sicher, die die Einstellung des Hubs und seiner Downlink-Ports ermöglicht.

Der Hub SuperSpeed überwacht die Weiterleitung der Pakete, wie in den vorigen Kapiteln beschrieben. Der Hub USB 3.0 ist eine logische Kombination des Hubs USB 2.0 und des Hubs SuperSpeed. Die einzige geteilte Sektion ist die Logik, die  $V_{BUS}$  steuert (siehe folgendes Bild).



Hub USB 3.0

## 2.14 Verwendungsmöglichkeiten der Schnittstelle USB 3.0



Verglichen mit der vorigen Version wurde die Schnittstelle USB 3.0 erheblich verbessert. Der markanteste Unterschied ist selbstverständlich die Übertragungsrate, die gegenüber der vorigen Schnittstelle USB 2.0 ungefähr zehnfach gestiegen ist. Theoretisch bietet der Bus die Datenrate von bis zu 5 Gbit/s, wie von den Eigenschaften der Bitübertragungsschicht der Schnittstelle ersichtlich ist.

Selbstverständlich kann diese Datenrate an den Enden der Datenübertragungen der Schnittstelle nicht erreicht werden. Nach der Einrechnung der Verluste durch 8B/10B-Kodierung (ca. 20 %) und der Art der Datenverkapselung in der Sicherungs- und Protokollschicht (ca. 2,4 %) beträgt die maximale Übertragungsrate 3,88 Gbit/s.



Die Spezifikation nennt erreichbare Datenraten von über 400 MB/s (3,2 Gbit/s).

Aktuell sind 3,2 Gbit/s eine ziemlich hohe Übertragungsrate und so kann die Schnittstelle USB 3.0 mit den meisten gegenwärtigen Hochgeschwindigkeitsschnittstellen konkurrieren. Ein der vielen Beispiele einer praktischen Verwendung könnte der Anschluss eines Gerätes eines Flash-Speichers sein, wie Speicherkarten, Flash-Karten oder die zurzeit beliebten Festplatten **SSD** (*Solid State Disc*), die mindestens teilweise die angebotene Geschwindigkeit auszunutzen können.



Die Schnittstelle USB 3.0 findet daher vor allem bei den Übertragungen von großen Datenvolumen ihre Anwendung. Mehrere zugleich durchgeführte OUT-Transaktionen mit einer IN-Transaktion erlaubt dann die gleichzeitige Nutzung des Busses durch mehrere Geräte, obwohl nur eines der Geräte dem Host aktiv Daten senden kann. Bei der Datenübertragung kann die Schnittstellen mit der **eSATA** (*external Serial Advanced Technology Attachment*) konkurrieren, die bisher im Bereich der Datenübertragung an der Spitze war.



Zurzeit scheint die Schnittstelle USB 3.0 der einzige Rivale zur Schnittstelle Thunderbolt zu sein, die im Wesentlichen eine externe Schnittstelle **PCI-E** (*Peripheral Component Interconnect - Express*) ist, eine noch höhere Datenrate im Vergleich zur Schnittstelle USB 3.0 anbietet und überdies noch die Möglichkeit einer Kettung der Geräte zur Verfügung stellt. Heutzutage wird die Schnittstelle Thunderbolt praktisch ausschließlich bei den Produkten der Firma Apple verwendet.

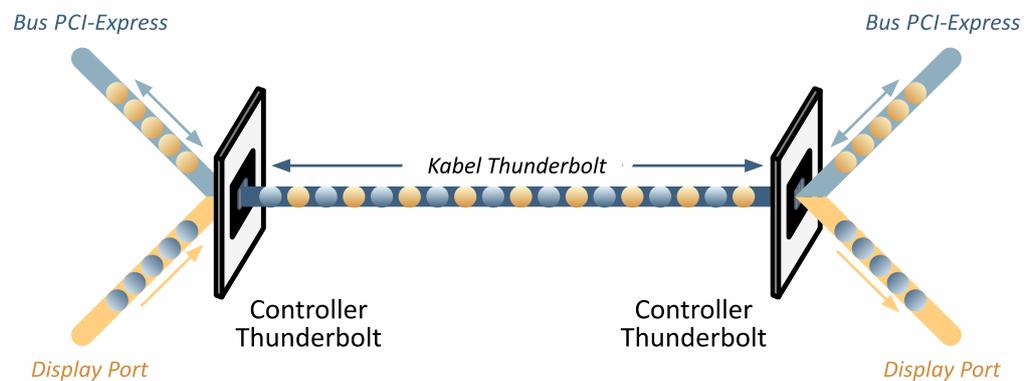
## 3 3 Schnittstelle Thunderbolt

### 3.1 Charakteristiken der Schnittstelle

Die Schnittstelle Thunderbolt (**TB**) ist eine Schnittstelle, die auf den Markt der Computerindustrie eine Reihe von neuen Konstruktionslösungen, Funktionen und Verbesserungen bringt. Die Schnittstelle Thunderbolt wird in Zusammenarbeit der Firmen Intel und Apple entwickelt. 2009 wurde der erste Prototyp dieser Schnittstelle auf den Markt eingeführt. Damals noch unter der Bezeichnung LightPeak. Das erste seriell hergestellte Gerät mit der Schnittstelle Thunderbolt war 2011 das Notebook MacBook Pro der Firma Apple.



Der markanteste Unterschied der Schnittstelle Thunderbolt im Vergleich zu weiteren Schnittstellen ist vor allem ihre Konstruktionslösung. Sie besteht aus der Kombination von zwei unterschiedlichen Schnittstellen – eines externen Busses **PCI-E** und eines Ports **DP** (*Display Port*). Die Kommunikation erfolgt in beiden Richtungen und es handelt sich um eine Vollduplex-Verbindung. Die Pakete der beiden Protokolle werden zugleich in einer Verbindung übertragen. Der Controller multiplext diese Pakete auf der Seite des Senders in einen Datenfluss und auf der Seite des Empfängers schaltet unter den einzelnen Protokollen um.



Prinzip der Kommunikation auf der Schnittstelle Thunderbolt



Der Vorteil und das Ziel der Schnittstelle **TB** ist ein Hochgeschwindigkeitsanschluss von verschiedenen Geräten und die Unterstützung einiger Übertragungsmodi mittels eines unfizierten Steckverbinders.



Deshalb wurde ein angepasster Stecker *Mini DisplayPort* eingesetzt.



---

Mit der theoretischen Übertragungsrates von bis zu 10 Gbit/s pro Kanal überragt die Schnittstelle **TB** die Standards **eSATA**, **USB** und **Firewire**. Im Vergleich mit dem Bus USB 3.0 ist ihre Datenrate fast doppelt so hoch (in Abhängigkeit von der verwendeten Hardware und Software) und erfordert niedrigere Gemeinkosten. Die reale Übertragungsrates beträgt ungefähr 6,4 Gbit/s pro Kanal.

---



---

An einen **TB**-Stecker können bis zu sieben **TB**-Geräten angeschlossen werden. Ein **TB**-Port kann auch zugleich Daten für zwei Displays mit dem **DP**-Port in der hohen Auflösung **HD** (*High Definition*) übertragen.

---



---

Für die Datenübertragung und Versorgung wurden auch trotz anfänglicher Pläne mit Lichtwellenleitern (Technologie *Silicon Photonics Link*) nur Kupferkabel eingesetzt.

---



---

Ein Vorteil der Kupferpaare besteht in der Bewältigung der ausreichenden Übertragungsrates, in erheblich niedrigeren Preisen im Vergleich mit Lichtwellenleitern und in einer problemlosen Versorgung von angeschlossenen Geräten der Leistungsaufnahme von bis zu 10 W.

---



---

Ihr bedeutender Nachteil ist jedoch eine begrenzte Kabellänge, die höchstens drei Meter betragen kann.

---



---

In der Zukunft wird immer noch mit der Verwendung von Lichtwellenleitern gerechnet, vor allem wegen ihrer Möglichkeiten zur Steigerung der Übertragungsrates von bis zu 100 Gbit/s und einer viel größeren Kabellänge bei konstanten Übertragungsbedingungen.

---



---

Die Gesellschaft Intel garantiert Übertragung eines zweistündigen Videos in der Auflösung Full HD innerhalb von 30 Sekunden und Übertragung von mp3-Dateien mit der Gesamtlänge von einem Jahr innerhalb von 10 Minuten.

---

## 3.2 Architektur der Schnittstelle

$E=m \cdot c^2$

---

Die Architektur der Schnittstelle Thunderbolt basiert auf zwei zukunftsweisenden Standards. Der erste ist der Standard **PCI-E** und der zweite **DP**.

---

+

---

Der Vorteil des Standards **PCI-E** ist seine Vielseitigkeit, breite Reihe von Anwendungen in den bestehenden **PC** (*Personal Computer*) - viele Technologien werden gerade für die Verbindung und Zusammenarbeit mit dem Bus **PCI-E** konzipiert - und der Möglichkeit der direkten Verbindung mit dem Bus **PCI-E** auf der Grundleiterplatte des **PC**.

---

+

---

Ein Vorteil des Ports **DP** ist die Fähigkeit, auch eine höhere Auflösung als Full HD (z. B. 4K oder 5K) mit einer immer größeren Bildfrequenz zu erreichen. Zusammen mit dem Bild kann auch ein 8-Kanal-Ton übertragen werden.

---

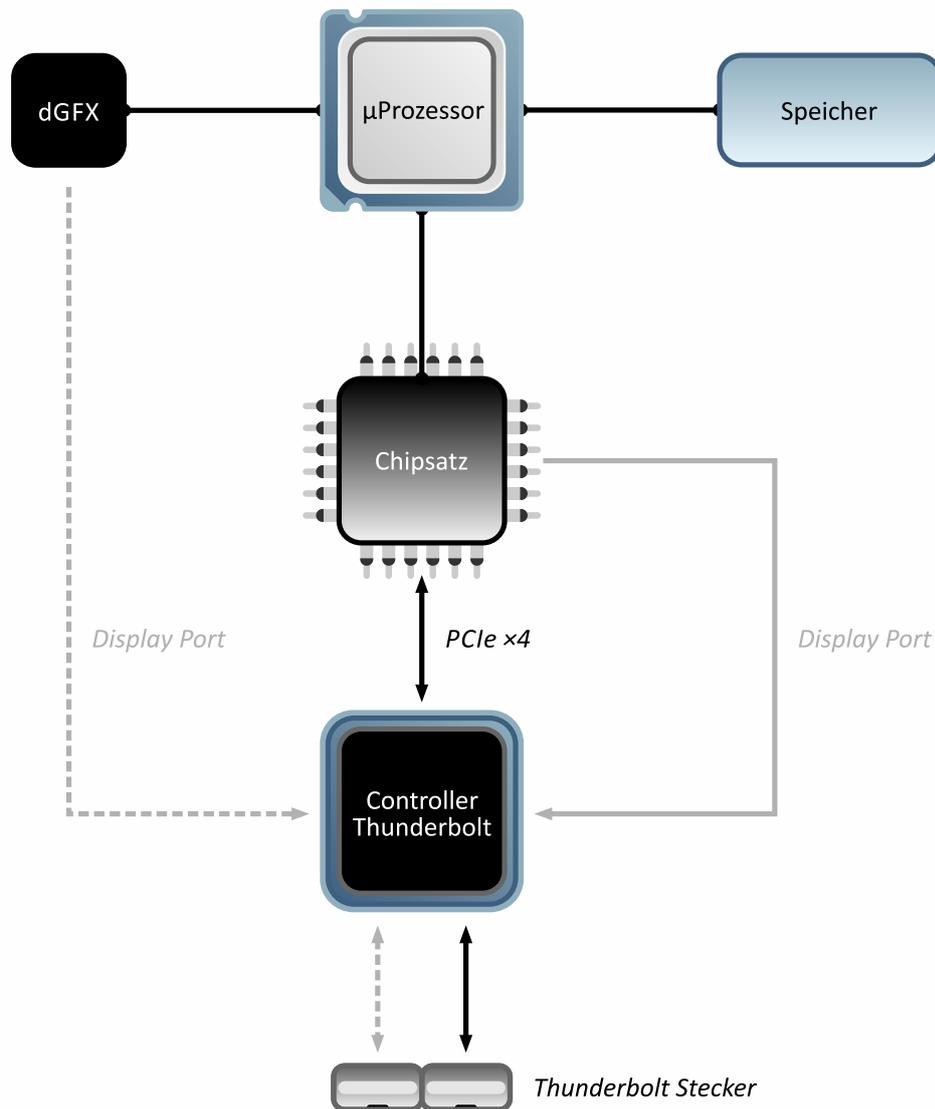
*i*

---

Der physische Stecker **Mini DP** ist mit dem klassischen Port **DP** abwärtskompatibel. Die maximale Übertragungsrate des **DP** an sich beträgt 5,4 Gbit/s, wenn alle vier Verbindungen genutzt werden. Bei einer Verbindung über die Schnittstelle **TB** steigt die Datenrate auf 10 Gbit/s. Die Gesamtgeschwindigkeit bei einer Übertragung in zwei Kanälen und in beiden Richtungen beträgt daher 20 Gbit/s.

---

Das Blockdiagramm auf dem folgenden Bild zeigt die Architektur der Schnittstelle Thunderbolt.



Architektur der Schnittstelle Thunderbolt

In den Controller **TB** gehen die Daten vom Port **DP** und vom Bus **PCI-E** ein. Der Controller kombiniert die Daten mit den Paketen, die gemeinsam über ein aktives **TB**-Kabel übertragen werden.



Die Verwendung von aktiven Kabeln hat jedoch ungünstige thermische Wirkungen. Auf dem angeschlossenen nicht aktiven Stecker kann eine Temperatur von ungefähr 43°C gemessen werden. Im aktiven Zustand kann die Temperatur bis auf 50°C steigen. Auf dem Kabel zwischen den Steckern unterscheidet sich die Temperatur nicht von der Umgebungstemperatur.



Die Erwärmung der Kabelenden wird durch Einbau des Chips *Gennum GN2033* direkt in den Stecker verursacht. Er kann trotz seiner sehr kleinen Abmessungen die Bedingungen für fehlerfreie Hochgeschwindigkeits-Datenübertragung über ein

dünnes Kupferpaar sicherstellen. Der Chip ist jedoch für die Technologie **TB** nicht unbedingt nötig, aber seine Anwesenheit verbessert Übertragungsraten und Übertragungscharakteristiken der Schnittstelle. Beim Übergang zu Lichtwellenleitern wird sein Einsatz nicht notwendig.

---



Erhöhte Temperaturen sind für Benutzer nicht gefährlich, aber sicher tragen sie zur gesamten Erwärmung des Gerätes und damit auch zu höheren Anforderungen an seine Kühlung bei. Beispielsweise haben Stecker der Schnittstelle USB 3.0 dieses Problem nicht, ihre Temperatur unterscheidet sich nur wenig von der Umgebungstemperatur.

---



Die Verwendung von aktiven Kabeln hat (neben großer Erwärmung) für die Benutzer eine signifikantere Auswirkung: einen höheren Anschaffungspreis gegenüber konkurrierenden Schnittstellentypen.

---



i

---

Ein Port **TB** braucht zwei Kanäle. Jeder besteht aus zwei Pfaden für die Übertragung in beiden Richtungen und hat eine Kapazität von 10 Gbit/s. Ein Kanal wird für Bilddaten und der andere für weitere Daten verwendet. Weil die Leistung der Kanäle nicht zusammengerechnet wird, wird die offizielle Kapazität von 10 Gbit/s per Port angeführt. Gemäß der angeführten Konstruktionslösung beinhaltet daher der Controller vier Ausgänge.

---

Für Endgeräte, die an **PC** angeschlossen werden, befindet sich der Controller **TB** im Modus eines Endpunktes (*Endpoint*). Zur Verfügung stehen vier Ein- bzw. Ausgänge gemäß Typ der Operation. Die empfangenen Daten gehen in den Programmschalter Thunderbolt ein, der ein sehr leistungsfähiger Protokoll-Programmschalter ist. Die Daten werden darin gemäß ihrem Protokoll aufgeteilt. Die Daten des Ports **DP** gehen vom Controller (*DP out*) aus und die Daten des Busses **PCI-E** gehen in den **PCI-E**-Programmschalter ein. Er teilt die Daten danach gemäß der Spezifikation 4 des Standards PCI-E 2.0 ein. Daran kann man ein (4 Kanäle), zwei (2 Kanäle) oder vier (1 Kanal) Geräte anschließen. Bei einer Reihenschaltung von mehr Geräten steuert die Datenleitung der PCI-E-Programmschalter, der vor dem gegebenen Gerät ist. Jedes Element in der Reihenschaltung muss zwei Ports beinhalten. Falls er nur einen hat, ist es nicht imstande, die Daten zum nächsten Gerät zu übertragen und wird daher am Ende der Kette angeschlossen. Ein solches Gerät ist typischerweise ein Monitor. Die kleinste Verzögerung hat dann das Gerät, das sich in der Topologie der Schaltung an der ersten Stelle befindet. Nach der Aufteilung der Daten gehen sie in den Mikrochip **PCH** (*Platform Controller Hub*) ein, der die Datenpfade bestimmt und Hilfsfunktionen in der Zusammenarbeit mit Hauptprozessor **CPU** (*Central Processing Unit*), d. h. z. B. Systemuhr, und Speicher steuert. Die Verbindung zwischen dem Controller und **PCH** schließt die Schnittstelle **FDI** (*Flexible Display Interface*), daher das Band für eine selbstständige Übertragung von Bilddaten ein.

---

i

Bei der Verwendung der Lichtwellenleitertechnologie wird es nicht nötig sein, die Hardware der gegenwärtigen Geräte der Schnittstelle **TB** zu ändern. Sie kann schon heute Daten sowohl über Kupferkabel als auch mittels Lichtwellenleitern übertragen. Bei den Lichtwellenleitern können die Kabel eine Reichweite bis zu einigen zehn Metern bei der gleichzeitigen Versorgung mittels eines metallischen Leiters haben. Bei der Abwesenheit der Versorgung wird mit der Übertragung des optischen Signals auf bis zu einigen hundert Metern gerechnet.

---