



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Betriebssysteme
und Rechnerverbund
Connected and Mobile Systems



Computernetze 1

Übung 3 Physical Layer

Fynn Schulze, 08. Mai 2025

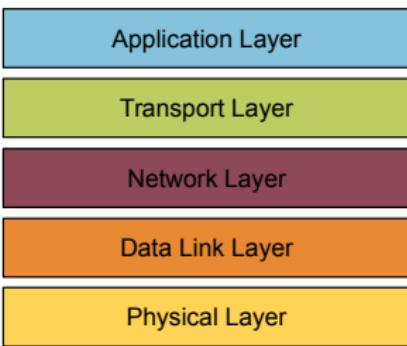
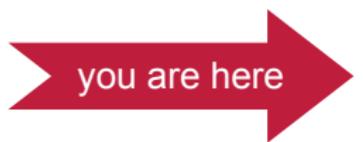
Technische Universität Braunschweig, IBR

Überblick

- **1) Physical Layer**
- **2) Netztopologien**
- **3) Kommunikationsarten**
- **4) Binärcodierung**
- **5) Mehrstufige Codierung**
- **6) Manchester Codierung**
- **7) Differentielle Manchester Codierung**
- **8) Bitraten**
- **9) Verzögerungen/Kanalauslastung**



Überblick



Aufgabe 1: Physical Layer

Beschreiben Sie, welchen Dienst der Physical Layer dem Data Link Layer anbietet. Gehen Sie auch auf die bereitgestellte Dienstgüte ein.

Dienst des Physical Layers

Der Physical Layer überträgt einen **Bitstrom**. Der Data Link Layer übergibt einen Bitstrom an den Physical Layer zur Übertragung bzw. bekommt empfangsseitig einen Bitstrom vom Physical Layer angeboten.

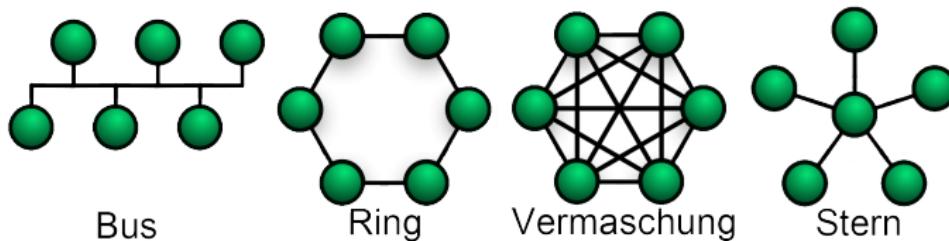
Der Physical Layer garantiert **nicht**, dass der Bitstrom fehlerfrei ist. Je nach Übertragungsmedium kann sich die Fehlerrate stark unterscheiden
⇒ best-effort service

Aufgabe 2: Netztopologien

Bewerten Sie die folgenden Netztopologien bezüglich Ausfallsicherheit, Kabellänge, Gesamtdatenrate und benötigter Wegewahlverfahren.

Begründen Sie Ihre Bewertung.

- a) Bus
- b) Ring
- c) Vollständige Vermaschung
- d) Stern



2 a) Bus

Bustopologie

Alle Knoten sind mit kurzen Stichleitungen an ein einzelnes (langes) Kabel angeschlossen.

Lösung

Ausfall Je nach dem, was ausfällt:

- Bus zerteilt \Rightarrow Abschnitte funktionieren i.d.R. weiter
- Stichleitung defekt \Rightarrow Knoten nicht erreichbar
- Knoten fällt aus \Rightarrow Netz nicht betroffen

Kabellänge Eine (ggf. sehr lange) Leitung + kurze Stichleitungen

Datenrate Gering, da Medium geteilt ist

Wegewahl Nicht nötig, alle Knoten sind direkt erreichbar (Broadcast)



2 b) Ring

Ringtopologie

Jeder Knoten ist mit jeweils einer Leitung mit zwei Nachbarn verbunden. Er ist aktiver Teilnehmer des Rings.

Lösung

Ausfall Wenn Knoten ausfällt ist Ring unterbrochen

Sonderfälle Knotenausfall kann kompensiert werden, wenn ...

- Kommunikation in beide Richtungen möglich ist
- ausgefallene Knoten vom Netzwerk umgangen werden

Lösung

Ausfall Wenn Knoten ausfällt ist Ring unterbrochen

Kabellänge Pro Knoten wird ein Kabel benötigt, kann je nach Geometrie sehr lang werden



2 c) Vollständige Vermaschung

Vollständige Vermaschung

Jeder Knoten ist mit jedem anderen Knoten über jeweils eine Leitung direkt verbunden.

Lösung

Ausfall Sehr gut, wenn ein Knoten/Link ausfällt, ist das restliche Netz nicht beeinträchtigt

Kabellänge Es werden sehr viele Kabel benötigt \Rightarrow Skalierbarkeit

Datenrate Sehr hoch, jeder Link kann zu jeder Zeit genutzt werden

Wegewahl Nicht nötig, jeder Empfänger ist direkt erreichbar

2 d) Stern

Sterntopologie

Jeder Knoten ist mit einem zentralen Switch über ein Kabel verbunden.

Lösung

Ausfall Switch fällt aus \Rightarrow gesamtes Netz fällt aus
Knoten/Link fällt aus \Rightarrow Knoten nicht erreichbar

Kabellänge Pro Knoten wird ein Kabel benötigt,
kann je nach Geometrie sehr lang werden

Datenrate Hoch, der Switch muss jedoch sehr hohe Datenraten
verarbeiten

Wegewahl Nicht nötig für Blattknoten,
Switch muss über Weiterleitung entscheiden



Aufgabe 3: Kommunikationsarten

Geben Sie für jede der folgenden Kommunikationsarten ein reales Übertragungssystem an, welches diese verwendet.

- a) Simplex
- b) Semi-Duplex
- c) Full-Duplex



3 a) Simplex

Simplex-Übertragung

Es kann nur in eine Richtung gesendet werden, es gibt keinen Rückkanal (für Bestätigungen).



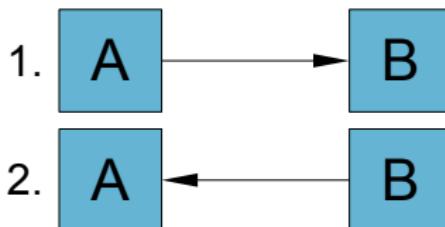
Lösung (Beispiele)

- Rundfunk
- Peilsender
- Infrarot-Fernbedienung

3 b) Semi-Duplex

Semi-Duplex-Übertragung

Es kann in beide Richtungen gesendet werden, jedoch nur abwechselnd.



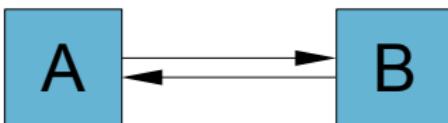
Lösung (Beispiele)

- CB-Funk
- IEEE 802.11 (WLAN)
- Klassisches Ethernet (10BASE5)

3 c) Full-Duplex

Full-Duplex-Übertragung

Es kann beliebig in beide Richtungen gleichzeitig gesendet werden.



Lösung (Beispiele)

- Gigabit-Ethernet (1000BASE-T)
- Analoges Telefon
- GSM

Aufgabe 4: Binärcodierung

Zeichnen Sie die binäre Codierung der Bitfolge

0010 0000 0111 0001 0101

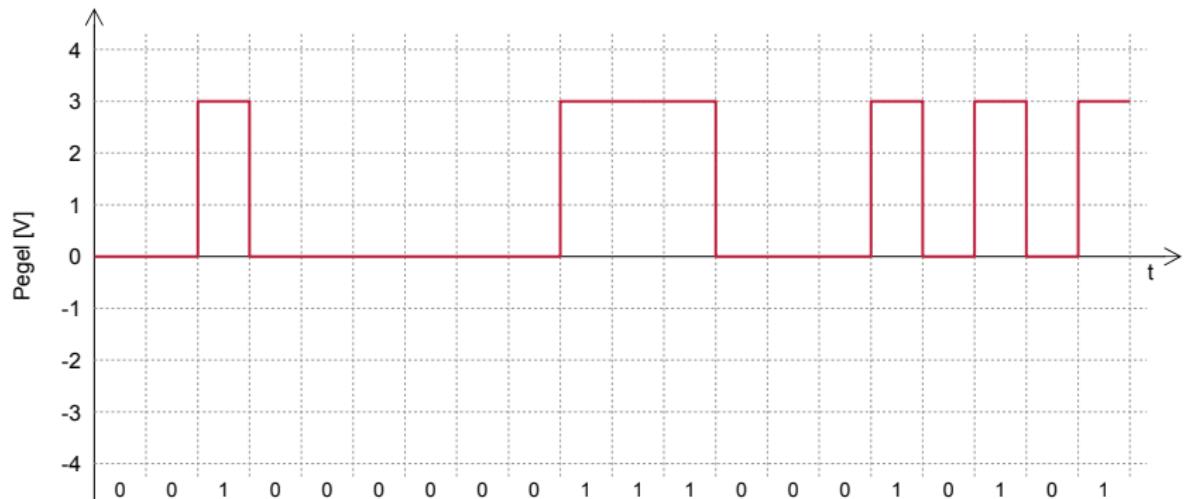
in das Diagramm ein. Verwenden Sie den Non-Return-to-Zero Leitungscode und wählen Sie als Pegel 0 Volt für eine logische Null und 3 Volt für eine logische Eins.

Binärcodierung

Bei der Binärcodierung wird jedem übertragenen Bit ein definierter Spannungspegel zugeordnet. Der Empfänger misst die Spannung und erkennt daraus das übertragene Bit.



Aufgabe 4: Lösung



Aufgabe 5: Mehrstufige Codierung

Zeichnen Sie die mehrstufige Codierung der Bitfolge

0000 1100 1100 1001 1101 1011 0000 0110 0110 000

in das Diagramm ein. In der folgenden Tabelle sind die möglichen Symbole ihren Spannungspegeln zugeordnet.

Symbol	110	100	010	000	001	011	101	111
Pegel [V]	4	3	2	1	-1	-2	-3	-4

Hintergrund: Mehrstufige Codierung

Mehrstufige Codierung

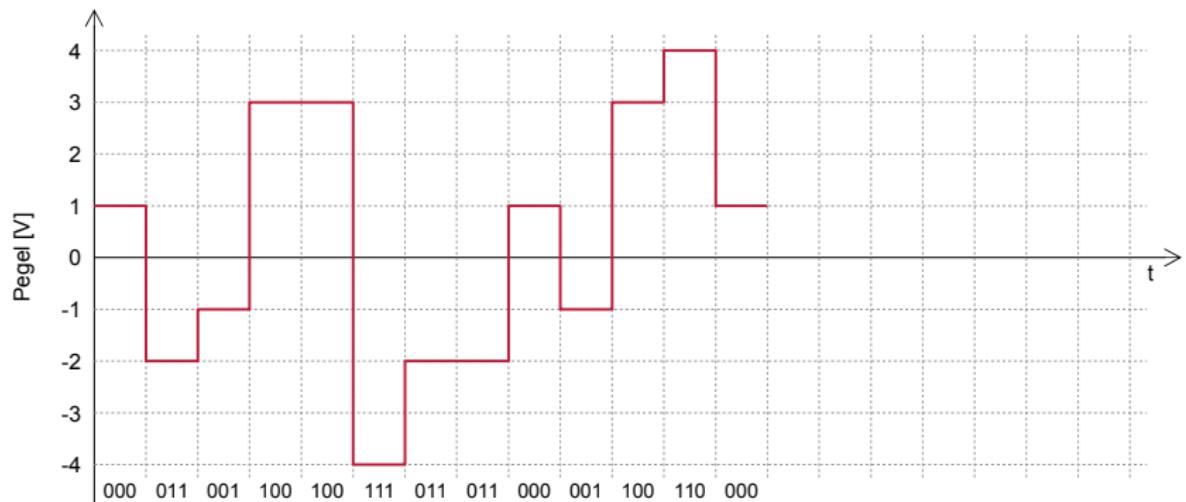
Wenn mehr als zwei verschiedene Spannungen verwendet werden, können nicht nur einzelne Bits übertragen werden.

Pro Zeitabschnitt wird dann ein **Symbol** übertragen, das mehrere Bits repräsentiert.

In dieser Aufgabe codiert jedes Symbol 3 Bits, da es 8 verschiedene Symbole gibt.



Aufgabe 5: Lösung



Aufgabe 6: Manchester Codierung

Zeichnen Sie die Manchester Codierung der Bitfolge

1101 1001 00

in das Diagramm ein. Die verwendeten Spannungspegel sind $U_h = 1\text{ Volt}$ und $U_l = -1\text{ Volt}$. Eine logische Null wird durch den Übergang von U_l nach U_h dargestellt, eine logische Eins entsprechend entgegengesetzt.



Hintergrund: Manchester Codierung

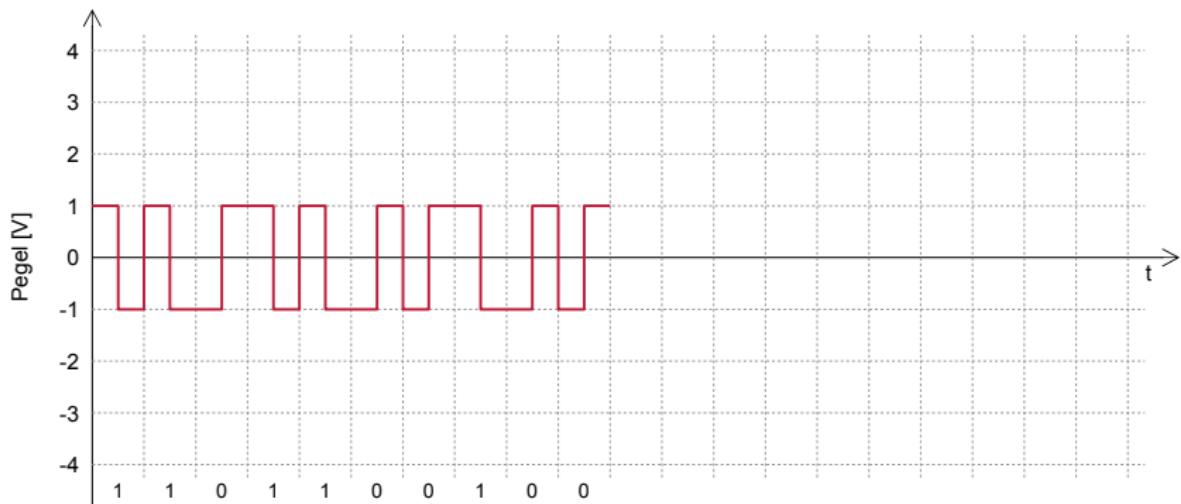
Manchester Codierung

Bei der Manchester Codierung wird ein Bit durch den **Wechsel des Pegels** übertragen. Dadurch wird sichergestellt, dass für den Empfänger ein Takt auf der Leitung sichtbar ist und auch lange Folgen des gleichen Bits erkannt werden können. Es werden jedoch zwei Symbole pro Bit benötigt.

Achtung

Es ist nicht festgelegt, ob eine logische Null durch einen Übergang von U_l nach U_h dargestellt wird oder umgekehrt. Sender und Empfänger müssen vor der Übertragung den Modus kennen!

Aufgabe 6: Lösung



Aufgabe 7: Differentielle Manchester Codierung

Zeichnen Sie die Differentielle Manchester Codierung der Bitfolge

1001 0001 11

in das Diagramm ein. Die Übertragung der Bitfolge schließt sich an das im Diagramm vorgegebene Bit an. Die verwendeten Spannungsspegele sind $U_h = 1 \text{ Volt}$ und $U_l = 0 \text{ Volt}$. Die Phasenlage der Codierung wird bei Übertragung einer logischen Eins invertiert.



Hintergrund: Differentielle Manchester Codierung

Differentielle Manchester Codierung

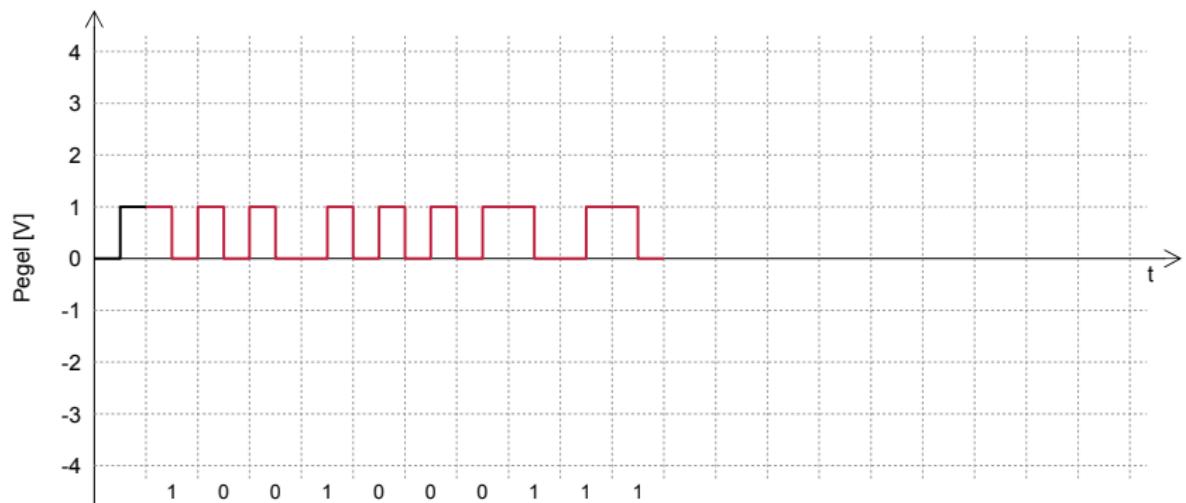
Bei der differentiellen Manchester Codierung wird das übertragene Bit durch die (ausbleibende) **Invertierung der Phasenlage** des Signals dargestellt. Das Signal ist weniger Störanfällig, da der absolute Signalpegel irrelevant ist.

Achtung

Wir folgen der Festlegung im Standard IEEE 802.5, nach welcher eine logische 1 durch Invertierung der Phasenlage gekennzeichnet wird.



Aufgabe 7: Lösung



Aufgabe 8: Bitraten

- Berechnen Sie die maximale Bitrate für ein binäres Signal in einem rauschfreien Kanal mit 4 kHz Bandbreite. Geben Sie das Ergebnis in Bit/s an.
- Berechnen Sie die maximale Bitrate für ein vierstufiges Signal in einem rauschfreien Kanal mit 6 kHz Bandbreite. Geben Sie das Ergebnis in Bit/s an.
- Berechnen Sie die maximale Bitrate für ein vierstufiges Signal in einem Kanal mit S/N-Ratio von 20 dB und 3 kHz Bandbreite. Geben Sie das Ergebnis in Bit/s an.
- Berechnen Sie die benötigte SNR, um eine Bitrate von 1 Mbit/s auf einem 50 kHz breiten Kanal anbieten zu können. Geben Sie das Ergebnis in Dezibel an.

Wiederholung: Logarithmus

- $\log_b r = ???$
- In Worten: „Welchen Exponenten muss ich an b dranschreiben, damit r rauskommt?“

Beispiel

- $\log_{10} 100 = 2$
- $\log_{10} 1000 = 3$

Taschenrechner

- Können oft nur zur Basis 10 (Taste „log“) und e (Taste „ln“) rechnen.
- Umrechnen der Basis: $\log_b r = \frac{\log_a r}{\log_a b}$
- Beispiel: $\log_2 32 = \frac{\log_{10} 32}{\log_{10} 2} = 5$

S/N-Ratio und Dezibel

Definition: signal-to-noise ratio (SNR)

$SNR = \frac{\text{Signalleistung}}{\text{Rauschleistung}}$ ⇒ „Größe des Signals im Verhältnis zum Rauschen“

Das **Signal/Rausch-Verhältnis** wird oft in Dezibel angegeben:

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{Signalleistung}}{\text{Rauschleistung}} \right)$$

Beispiel

$SNR(dB)$	SNR
10	10
20	100
30	1000



8 a) Binäres Signal im rauschfreien Kanal

- a) Berechnen Sie die maximale Bitrate für ein binäres Signal in einem rauschfreien Kanal mit 4 kHz Bandbreite. Geben Sie das Ergebnis in Bit/s an.

Nyquist Theorem

$$\text{max. Bitrate} = 2B \cdot \log_2 V \text{ bit/s}$$

B = Bandbreite [Hz]

V = Anzahl Stufen

Lösung

$$\begin{aligned} B &= 4 \text{ kHz} = 4000 \text{ Hz}, V = 2 \\ &\Rightarrow 2 \cdot 4000 \cdot \log_2 2 \text{ bit/s} \\ &= 2 \cdot 4000 \cdot 1 \text{ bit/s} = \mathbf{8000 \text{ bit/s}} \end{aligned}$$

8 b) Vierstufiges Signal im rauschfreien Kanal

- b) Berechnen Sie die maximale Bitrate für ein vierstufiges Signal in einem rauschfreien Kanal mit 6 kHz Bandbreite. Geben Sie das Ergebnis in Bit/s an.

Nyquist Theorem

$$\text{max. Bitrate} = 2B \cdot \log_2 V \text{ bit/s}$$

B = Bandbreite [Hz]

V = Anzahl Stufen

Lösung

$$\begin{aligned} B &= 6 \text{ kHz} = 6000 \text{ Hz}, V = 4 \\ &\Rightarrow 2 \cdot 6000 \cdot \log_2 4 \text{ bit/s} \\ &= 12000 \cdot 2 \text{ bit/s} = \mathbf{24000 \text{ bit/s}} \end{aligned}$$



8 c) Vierstufiges Signal im verrauschten Kanal

- c) Berechnen Sie die maximale Bitrate für ein vierstufiges Signal in einem Kanal mit S/N-Ratio von 20 dB und 3 kHz Bandbreite. Geben Sie das Ergebnis in Bit/s an.

Shannon Theorem

$$\text{max. Bitrate} = B \cdot \log_2(1 + S/N) \text{ bps}$$

B = Bandbreite [Hz]

S/N = Signal/Rausch-Verhältnis

Achtung

- Unabhängig von der Stufenzahl!
- Theoretische Obergrenze, in der Realität schwer erreichbar



8 c) Vierstufiges Signal im verrauschten Kanal

- c) Berechnen Sie die maximale Bitrate für ein vierstufiges Signal in einem Kanal mit S/N-Ratio von 20 dB und 3 kHz Bandbreite. Geben Sie das Ergebnis in Bit/s an.

Erinnerung

$$SNR(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{Signalleistung}}{\text{Rauschleistung}} \right)$$

$$20 \text{ dB} = 10 \cdot \log_{10} SNR$$

$$SNR = 10^2 = 100$$



8 c) Vierstufiges Signal im verrauschten Kanal

- c) Berechnen Sie die maximale Bitrate für ein vierstufiges Signal in einem Kanal mit S/N-Ratio von 20 dB und 3 kHz Bandbreite. Geben Sie das Ergebnis in Bit/s an.

Shannon Theorem

$$\text{max. Bitrate} = B \cdot \log_2(1 + S/N) \text{ bps}$$

B = Bandbreite [Hz]

S/N = Signal/Rausch-Verhältnis

Lösung

$$B = 3 \text{ kHz} = 3000, S/N = 20 \text{ dB} = 100$$

$$3000 \cdot \log_2(1 + 100) \text{ bit/s}$$

$$3000 \cdot \frac{\log_{10} 101}{\log_{10} 2} \text{ bit/s} \approx 3000 \cdot 6.66 \text{ bit/s} \approx \mathbf{20000 \text{ bit/s}}$$

8 d) S/N-Ratio für gegebene Bitrate

- d) Berechnen Sie die benötigte SNR, um eine Bitrate von 1 Mbit/s auf einem 50 kHz breiten Kanal anbieten zu können. Geben Sie das Ergebnis in Dezibel an.

Shannon Theorem

$$\text{max. Bitrate} = B \cdot \log_2(1 + S/N) \text{ bit/s}$$

Lösung

$$50000 \cdot \log_2(1 + x) = 1000000$$

$$\log_2(1 + x) = 20$$

$$2^{\log_2(1+x)} = 2^{20}$$

$$1 + x = 1048576$$

$$x = 1048575 \approx \mathbf{60.2 \text{ dB}}$$

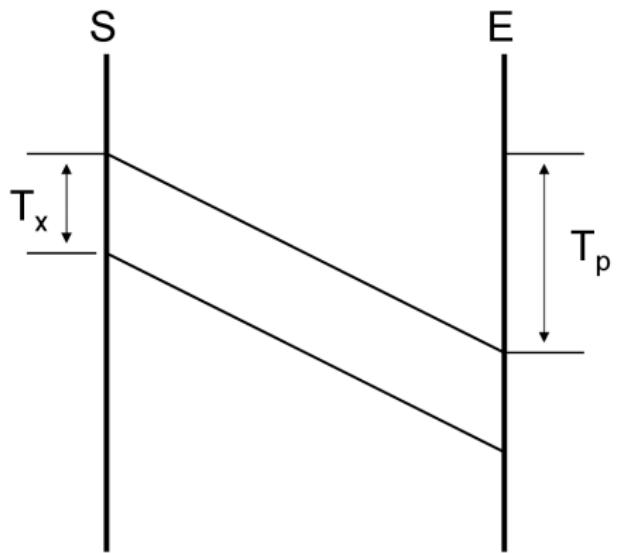


Aufgabe 9: Verzögerungen

Signale breiten sich im luftleeren Raum mit Lichtgeschwindigkeit (etwa $3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$) aus. In elektrischen Leitern (verdrillte Kupferkabel, Koaxialkabel) beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit etwa $2 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$. Berechnen Sie T_p und T_x für die Übertragung eines 1.000 Bit Blocks über

- 50 m verdrilltes Kupferkabel mit einer Bitrate von 10 kbit/s,
 - 5 km Koaxialkabel mit einer Bitrate von 1 Mbit/s,
 - 50.000 km luftleeren Raum mit einer Bitrate von 10 Mbit/s.
- Geben Sie bei allen Berechnungen die Zwischenschritte an und führen Sie die Einheiten bei der Berechnung mit! Notieren Sie alle Ergebnisse in Sekunden.
- Interpretieren Sie die Ergebnisse anhand des Verhältnisses zwischen Ausbreitungsverzögerung und Übertragungsverzögerung ($a = \frac{T_p}{T_x}$).

Verzögerungen



Definitionen

- T_p **Ausbreitungsverzögerung**
(propagation delay):
Abstand von Sender und
Empfänger geteilt durch die
Ausbreitungsgeschwindigkeit
des Mediums
- T_x **Übertragungsverzögerung**
(transmission delay):
Anzahl der übertragenen Bits
geteilt durch die auf dem
Medium realisierte Bitrate



9 a) Kupferkabel

a) 50 m verdrilltes Kupferkabel mit einer Bitrate von 10 kbit/s

Ausbreitungsverzögerung T_p

$$d = 50 \text{ m}$$

$$v = 2 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\begin{aligned} T_p &= \frac{d}{v} \\ &= \frac{50 \text{ m}}{2 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \\ &= \frac{5 \cdot 10^1 \text{ m} \cdot \text{s}}{2 \cdot 10^8 \text{ m}} \\ &= 2.5 \cdot 10^{-7} \text{ s} \end{aligned}$$

Übertragungsverzögerung T_x

$$n = 1000 \text{ bit}$$

$$s = 10000 \frac{\text{bit}}{\text{s}}$$

$$\begin{aligned} T_x &= \frac{n}{s} \\ &= \frac{1000 \text{ bit}}{10000 \frac{\text{bit}}{\text{s}}} \\ &= \frac{1}{10 \frac{1}{\text{s}}} \\ &= 0.1 \text{ s} \end{aligned}$$



9 b) Koaxialkabel

b) 5 km Koaxialkabel mit einer Bitrate von 1 Mbit/s

Ausbreitungsverzögerung T_p

$$d = 5 \text{ km}$$

$$v = 2 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$T_p = \frac{d}{v}$$

$$= \frac{5 \text{ km}}{2 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$= \frac{5 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}}{2 \cdot 10^8 \text{ m}}$$

$$= 2.5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

Übertragungsverzögerung T_x

$$n = 1000 \text{ bit}$$

$$s = 1000000 \frac{\text{bit}}{\text{s}}$$

$$T_x = \frac{n}{s}$$

$$= \frac{1000 \text{ bit}}{1000000 \frac{\text{bit}}{\text{s}}}$$

$$= \frac{1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{s}}}$$

$$= 1 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$



9 c) Luftleerer Raum

c) 50000 km luftleeren Raum mit einer Bitrate von 10 Mbit/s

Ausbreitungsverzögerung T_p

$$d = 50000 \text{ km}$$

$$v = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\begin{aligned} T_p &= \frac{d}{v} \\ &= \frac{50000 \text{ km}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \\ &= \frac{5 \cdot 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}}{3 \cdot 10^8 \text{ m}} \\ &= \frac{1}{6} \text{ s} \end{aligned}$$

Übertragungsverzögerung T_x

$$n = 1000 \text{ bit}$$

$$s = 10000000 \frac{\text{bit}}{\text{s}}$$

$$\begin{aligned} T_x &= \frac{n}{s} \\ &= \frac{1000 \text{ bit}}{10000000 \frac{\text{bit}}{\text{s}}} \\ &= \frac{1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{s}}} \\ &= 1 \cdot 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$



9 d) Verhältnis T_p / T_x

d) Interpretieren Sie die Ergebnisse anhand des Verhältnisses zwischen Ausbreitungsverzögerung und Übertragungsverzögerung ($a = \frac{T_p}{T_x}$).

Erklärung

Mit dem Verhältnis $a = \frac{T_p}{T_x}$ lässt sich z.B. die Eignung verschiedener Verbindungsalternativen beurteilen.

$$\text{Gesamtverzögerung} = T_p + T_x$$

- $a > 1$
⇒ hohe Ausbreitungsverz. ($T_p > T_x$)
- $a < 1$
⇒ hohe Übertragungsverz. ($T_x > T_p$)

Lösung

- 9 a) $a = \frac{2,5 \cdot 10^{-7} s}{1 \cdot 10^{-1} s} = 2,5 \cdot 10^{-6}$
- 9 b)
 $a = \frac{2,5 \cdot 10^{-5} s}{1 \cdot 10^{-3} s} = 2,5 \cdot 10^{-2}$
- 9 c) $a = \frac{\frac{1}{6} s}{1 \cdot 10^{-4} s} = \frac{1}{6} \cdot 10^4$

Nächste Übung:

22. Mai 2025

