Technische Universität München
Lehrstuhl Informatik VIII
Prof. Dr.-Ing. Georg Carle
Dipl.-Ing. Stephan Günther, M.Sc.
Johannes Naab, M.Sc.

**Tutorübung zur Vorlesung Grundlagen Rechnernetze und Verteilte Systeme**

**Übungsblatt 4 (11. Mai – 15. Mai 2015)**

**Hinweis:** Die mit * gekennzeichneten Teilaufgaben sind ohne Kenntnis der Ergebnisse vorhergehender Teilaufgaben lösbar.

## Aufgabe 1 ALOHA und CSMA/CD

Gegeben sei ein Netzwerk (s. Abbildung 1) bestehend aus drei Computern, welche über ein Hub miteinander verbunden sind. Die Distanzen zwischen den Computern betragen näherungsweise $d_{12} = 500\,\text{m}$ bzw. $d_{23} = 250\,\text{m}$. Etwaige indirekte Kabelführung darf vernachlässigt werden. Die Übertragungsrate betrage $r = 10\,\text{Mbit/s}$. Die relative Ausbreitungsgeschwindigkeit betrage wie üblich $\nu = 2/3$. Die Lichtgeschwindigkeit sei mit $c = 3 \cdot 10^8\,\text{m/s}$ gegeben.


Abbildung 1:



Zum Zeitpunkt $t_0 = 0\,\text{s}$ findet keine Übertragung statt und keiner der Rechner hat Daten zu versenden. Zum Zeitpunkt $t_1 = 1\,\mu\text{s}$ beginnt PC1 einen Rahmen der Länge 3 B zu senden. Bei $t_2 = 4\,\mu\text{s}$ stehen auch bei PC2 und PC3 Rahmen der Länge 3 B zum Senden an.

a)* Berechnen Sie die Serialisierungszeit $t_s$ für eine Nachricht.

$$t_s = \frac{l}{r} = \frac{3 \cdot 8\,\text{bit}}{10 \cdot 10^6\,\text{bit/s}} = 2{,}4\,\mu\text{s}$$

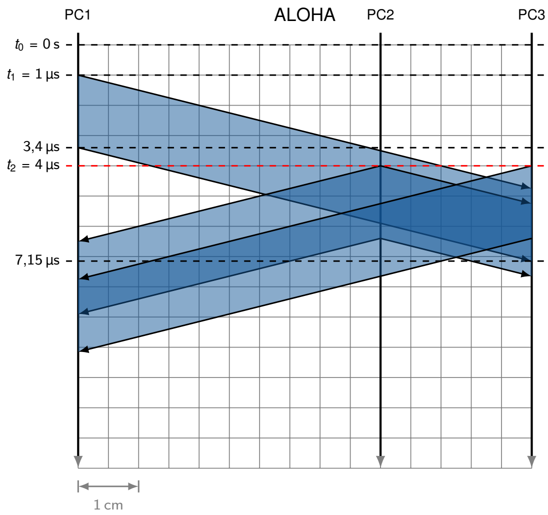
b)* Berechnen Sie die Ausbreitungsverzögerungen $t_p(1{,}2)$ und $t_p(2{,}3)$ auf den beiden Streckenabschnitten.

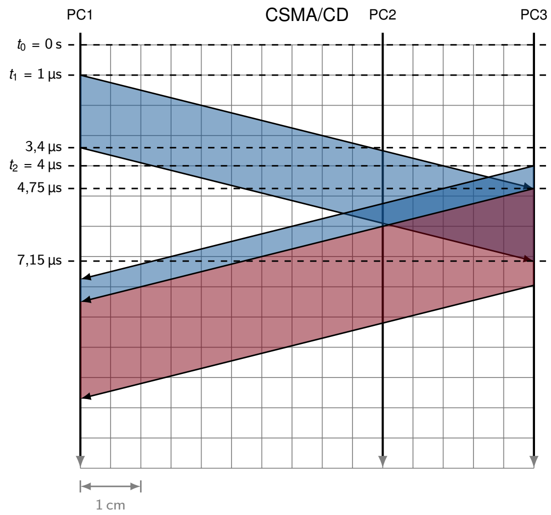
$$t_p(1{,}2) = \frac{d_{12}}{\nu c} = \frac{500\,\text{m}}{\frac{2}{3} \cdot 3 \cdot 10^8\,\text{m/s}} = 2{,}5\,\mu\text{s}$$

$$t_p(2{,}3) = \frac{d_{23}}{\nu c} = \frac{250\,\text{m}}{\frac{2}{3} \cdot 3 \cdot 10^8\,\text{m/s}} = 1{,}25\,\mu\text{s}$$

c) Zeichnen Sie für ALOHA und 1-persistentes CSMA/CD jeweils ein Weg-Zeit-Diagramm, das den Sendevorgang im Zeitintervall $t \in [t_0, t_0 + 10\,\mu\text{s})$ darstellt. (Maßstab: $100\,\text{m} \mathrel{\hat{=}} 1\,\text{cm}$ bzw. $1\,\mu\text{s} \mathrel{\hat{=}} 5\,\text{mm}$)

Bei ALOHA wird das Medium nicht abgehört. Dies bedeutet, dass zum Zeitpunkt $t_2$ PC2 zu senden beginnt, obwohl er die Übertragung von PC1 bereits detektieren könnte. Im Gegensatz dazu wird bei CSMA/CD das Medium abgehört. Aus diesem Grund beginnt PC2 nicht zu senden. PC3 allerdings kann infolge der endlichen Signalausbreitungsgeschwindigkeit noch nicht wissen, dass PC1 bereits sendet. Es kommt also zur Kollision. Bei $t = 4{,}75\,\mu\text{s}$ erkennt PC3 die Kollision und bricht die eigene Übertragung ab. Um sicherzugehen, dass alle Stationen, die an das gemeinsame Medium angeschlossen sind, über die Kollision informiert werden, sendet PC3 ein *Jam-Signal*. Dieses ist bei Ethernet ein 4 B langes alternierendes Bitmuster (da die Länge in der Aufgabenstellung nicht gegeben war, reicht die Andeuting des Jamsignals).




d) Aus der vorhergehenden Teilaufgabe ist zu erkennen, dass bei beiden Verfahren Kollisionen auftreten. Im Gegensatz zu ALOHA funktioniert CSMA/CD aber unter den gegebenen Umständen nicht. Warum?

Bei ALOHA wird der Verlust eines Rahmens dadurch erkannt, dass der Absender keine Bestätigung erhält. Ein derartiges Quittungsverfahren gibt es bei CSMA/CD nicht. Stattdessen nimmt ein Sender bei CSMA/CD an, dass ein Rahmen erfolgreich übertragen wurde, falls während der Übertragung keine Kollision aufgetreten ist. Im konkreten Fall hat PC1 allerdings die Übertragung abgeschlossen, bevor ihn die Übertragung bzw. das Jam-Signal von PC3 erreicht. PC1 erkennt daher die Kollision nicht und geht fälschlicherweise von einer erfolgreichen Übertragung aus.

e) Berechnen Sie für CSMA/CD die maximale Entfernung zweier Rechner innerhalb einer Kollisionsdomäne in Abhängigkeit der minimalen Rahmenlänge. Setzen Sie die Werte für FastEthernet ein ($r = 100\,\mathrm{Mbit/s}$, $l_{\min} = 64\,\mathrm{B}$).

Im Falle einer Kollision darf keiner der sendenden Knoten seinen Sendevorgang beenden, bevor er die Kollision bemerkt hat. Ansonsten würde er davon ausgehen, dass die Übertragung erfolgreich war. Dies bedeutet, die minimale Serialisierungszeit $t_{s,\min}$ eines Rahmens muss zweimal der Ausbreitungsverzögerung zwischen den beiden am weitesten entfernten Stationen entsprechen:

$$
\begin{aligned}
t_{s,\min} &= 2 \cdot t_{p,\max} \\
\frac{l_{\min}}{r} &= 2 \cdot \frac{d_{\max}}{\nu c} \\
d_{\max} &= \frac{1}{2} \cdot \nu c \cdot \frac{l_{\min}}{r} \\
d_{\max} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot 3 \cdot 10^8 \,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdot \frac{64 \cdot 8\,\mathrm{bit}}{100 \cdot 10^6\,\frac{\mathrm{bit}}{\mathrm{s}}} \\
d_{\max} &= 10^8 \,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdot \frac{64 \cdot 8\,\mathrm{bit}}{100 \cdot 10^6\,\frac{\mathrm{bit}}{\mathrm{s}}} = 512\,\mathrm{m}
\end{aligned}
$$

f)* Welchen Einfluss haben Hubs, Brücken und Switches auf die Kollisionsdomäne?

Hubs verbinden Netzsegmente auf der physikalischen Schicht, wodurch eine gemeinsame Kollisionsdomäne entsteht (Bus).

Brücken unterbrechen Kollisionsdomänen, indem Rahmen nur dann in das jeweils andere Netzsegment weitergeleitet werden, wenn sich der jeweilige Empfänger in diesem Segment befindet. (Die Weiterleitungsentscheidungen werden auf Basis der Ziel-MAC-Adresse getroffen. Durch Beobachtung des Datenverkehrs kann eine Brücke mit der Zeit lernen, welche Knoten sich auf welcher Seite befinden.)

Switches sind im Wesentlichen Brücken mit mehr als zwei Ports. Sie unterbrechen daher ebenfalls Kollisionsdomänen.

## Aufgabe 2 Cyclic Redundancy Check (CRC)

Die Nachricht `10101100` werde mittels CRC, wie in der Vorlesung eingeführt, gesichert. Als Reduktionspolynom sei $r(x) = x^3+1$ gegeben.

a)* Wie lang ist die Checksumme?

Die Länge der Checksumme in Bit entspricht dem Grad des Reduktionspolynoms, hier also $\mathrm{grad}(r(x)) = 3\,\mathrm{bit}$.

b) Bestimmen Sie die Checksumme für die gegebene Nachricht.

Zunächst werden an die Nachricht grad($r(x)$) = 3 Nullen angehängt: `10101100`**`000`**. Anschließend wird durch $r(x)$ dividiert:

```
10101100000 : 1001 = 10111011  Rest 011
1001|||||||
----|||||||
001111|||||
  1001|||||
  ----|||||
  01100||||
   1001||||
   ----||||
   01010|||
    1001|||
    ----|||
    001100|
      1001|
      ----|
      01010
       1001
       ----
       0011
```

c) Geben Sie die übertragene Bitfolge an.

Die übertragene Bitfolge besteht aus der ursprünglichen Nachricht konkateniert mit der eben berechneten Prüfsumme: `10101100 011`.

Bei der Übertragung trete nun das Fehlermuster `00100000000` auf.

d)* Wie lautet die empfangene Bitfolge?

Die empfangene Bitfolge ist das XOR aus der übertragenen Bitfolge und dem Fehlermuster:

```
    10101100011
XOR 00100000000
---------------
    10001100011
```

e) Zeigen Sie, dass der Übertragungsfehler erkannt wird.

Die empfangene Bitfolge wird wieder durch $r(x)$ dividiert:

```
10001100011 : 1001 = 10011111 Rest 100
1001|||||||
----|||||||
0001110||||
   1001||||
   ----||||
   01110|||
    1001|||
    ----|||
    01110||
     1001||
     ----||
     01111|
      1001|
      ----|
      01101
       1001
       ----
       0100
```

Es bleibt der Rest `100`. Bei einer fehlerfreien Übertragung hätte hingegen kein Rest bleiben dürfen.

f)* Geben Sie ein Fehlermuster an, welches nicht erkannt werden kann.

Vielfache des Reduktionspolynoms können nicht erkannt werden, z. B. `10010000000`:

```
    10101100011
XOR 10010000000
---------------
    00111100011
```

Division durch $r(x)$ ergibt:

```
                (war: 00110111 Rest 000)
00111100011 : 1001 = 00111011 Rest 000
001001|||||
  ----|||||
  01100||||
   1001||||
   ----||||
   01010|||
    1001|||
    ----|||
    001101|
      1001|
      ----|
      01001
       1001
       ----
       0000
```

## Aufgabe 3 Bitübertragungstechniken (Hausaufgabe)

Seit 2010 verbindet ein neues Unterseekabel Japan und die USA. Das Kabel verläuft von Chikura nahe Tokio nach Los Angeles in Kalifornien (ca. 10 000 km) und besteht aus 8 Faserpaaren mit einer Übertragungsrate von insgesamt 7,68 Tbit/s pro Richtung. Als vereinfachende Annahmen setzen Sie voraus, dass das Licht nur den Weg des Kabels zurücklegt und keine Signalbeeinträchtigungen oder Verzögerungen durch Signalverstärker, Steckverbinder und ähnliches auftreten. Die relative Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht innerhalb einer Glasfaser beträgt (ebenso wie in Kupferleitungen) etwa $\nu = {}^2/_3$ bezogen auf die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum $c = 3 \cdot 10^8\,\mathrm{m/s}$.

a)* Wie viele Byte können sich maximal gleichzeitig in Hin- und Rückrichtung auf einem Faserpaar befinden (gesucht ist die Summe aus Hin- und Rückrichtung)?

$$
\begin{aligned}
t_p &= \frac{d}{\nu c} \\
C_{\text{ges}} &= 2 \cdot r \cdot t_p \\
C_{\text{Faserpaar}} &= \frac{C_{\text{ges}}}{8} = \frac{r \cdot t_p}{4} = \frac{r \cdot d}{4 \cdot \nu c} = 96\,\text{Gbit} = 12\,\text{GB}\ (\approx 11{,}18\,\text{GiB})
\end{aligned}
$$

b)* Welche Speicherkapazität hat das Kabel insgesamt? Geben Sie dabei die Speichergrößen in Gbit wie auch GiB bzw. vergleichbaren Einheiten an.

$$C_{\text{ges}} = 2 \cdot t_p \cdot r = 768\,\text{Gbit} \approx 89{,}41\,\text{GiB}$$

Um die angegebene Übertragungsrate zu erreichen, wird die Datenübertragung auf 64 verschiedene Wellenlängen je Faser aufgeteilt (Frequenzmultiplex), auf denen jeweils mit derselben Datenrate gesendet wird.

c)* Welche Länge hat ein Bit auf einer solchen Faser?

$$d_{\text{Bit,Faser}} = \frac{d}{\frac{1}{2}\frac{C_{\text{Faserpaar}}}{64}} \approx 1{,}33\,\text{cm/bit}$$

Um ein Gefühl für die errechneten Größen zu bekommen, stellen wir einen Vergleich mit FastEthernet ($r = 100\,\text{Mbit/s}$) an. Als Medium werden hier oft Kupferkabel verwendet. Als relative Ausbreitungsgeschwindigkeit nehmen Sie hier ebenfalls $\nu = \frac{2}{3}$ an.

d) Wie lang ist ein Bit bei FastEthernet im Vergleich zur optischen Übertragung in der vorangegangenen Teilaufgabe?

In der vorangegangenen Teilaufgabe haben wir bereits die Länge eines Bits auf der Faser berechnet – nämlich $4/3\,\text{cm}$. Da sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit zwischen der Faser und FastEthernet nicht unterscheidet, ist der Unterschied der Bitlänge zwischen Faser und FastEthernet ausschließlich durch die Übertragungsrate begründet. Es reicht also den Faktor zu bestimmen, um den die Faser schneller ist. Dieser errechnet sich wie folgt:

$$\frac{r_{\text{Faser pro Wellenlänge}}}{r_{\text{FE}}} = \frac{\frac{7.68 \cdot 10^{12}\,\text{bit/s}}{8 \cdot 64}}{100 \cdot 10^6\,\text{bit/s}} = 150.$$

Wir dividieren die Gesamtrate zunächst durch 8, da sich diese auf alle 8 Fasern bezieht. Außerdem dividieren wir durch 64, da wir seit Teilaufgabe c) von virtuellen Fasern ausgehen. Mit dieser Erkenntnis lässt sich nun leicht die Bitlänge bei FastEthernet bestimmen:

$$d_{\text{Bit,FE}} = d_{\text{Bit,Faser}} \cdot \frac{r_{\text{Faser,virtuell}}}{r_{\text{FE}}} = \frac{4}{3}\,\text{cm} \cdot 150 = 2{,}00\,\text{m}.$$

Alternativ lässt sich die Bitlänge auch direkt bestimmen:

$$d_{\text{Bit,FE}} = \frac{\nu \cdot c}{r_{\text{FE}}} = 2\,\text{m}.$$

Die Verlegung und Instandhaltung eines Unterseekabels ist sehr aufwendig. Die Verbindung zwischen den beiden Städten könnte ebenso über Satellit erfolgen. Betrachten Sie die beiden Verbindungswege kurz in Bezug auf die Round-Trip-Time (RTT[1]).

[1] Als RTT bezeichnet man die Zeit, die eine Nachricht vom Sender zum Empfänger und wieder zurück benötigt.

Nehmen Sie dazu an, dass das Unterseekabel in direkter Luftlinienverbindung zwischen Chikura und Los Angeles liegt. Vernachlässigen Sie dabei die Erdkrümmung. Ein geostationärer Satellit (36 000 km Höhe) befinde sich genau über dem Mittelpunkt der Strecke.

e) Wie groß ist die RTT beim Glasfaserkabel?

$$\mathrm{RTT}_{\mathrm{Faser}} = 2\,(t_p + t_s) \approx 2 \cdot \frac{d}{\nu c} = 100\,\mathrm{ms}$$

f) Weswegen kann in diesem Fall bei der Bestimmung der RTT die Serialisierungszeit $t_s$ vernachlässigt werden? Gehen Sie hierbei von Paketen in der üblichen Größe von 1500 B aus.

Es gilt $t_p \gg t_s$, da selbst bei der Übertragungsrate einer einzelnen Wellenlänge je Faser noch so hoch, ist dass die Serialisierungszeit bei üblichen Paketgrößen mehrere Größenordnungen geringer ist als die Ausbreitungsverzögerung:

$$\begin{aligned} r_{\text{pro Wellenlänge und Faser}} &= \frac{7{,}68\,\mathrm{Tbit/s}}{8 \cdot 64} = 15\,\mathrm{Gbit/s} \\ t_s(L = 1500\,\mathrm{B}) &= \frac{1500 \cdot 8\mathrm{bit}}{15\,\mathrm{Gbit/s}} = 800\,\mathrm{ns} \\ t_p &= \frac{d}{\nu c} = 50\,\mathrm{ms} \end{aligned}$$

g) Wie groß ist die RTT bei der Satellitenverbindung?

$$\mathrm{RTT}_{\mathrm{Satellit}} = 2 \cdot t_{p,sat} = 2 \cdot \frac{d_{sat}}{c} = 2 \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{5000^2 + 36000^2}\,\mathrm{km}}{3 \cdot 10^8\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} \approx 0.48\,\mathrm{s}$$