

# Merkzettel für die Klausur

Marco Ammon, Julia Hindel

18. September 2018

## Paketverzögerung

1. Bitrate  $R$  in  $\frac{\text{b}}{\text{s}}$
2. Paketgröße  $L$  in Bit
3. Ausbreitungsverzögerung  $D = \frac{l}{v}$ , wobei  $l$  die Länge der Verbindung und  $v$  die Signalausbreitungsgeschwindigkeit ist
4. Kanalpuffergröße in Bit:  $R \cdot D = R \cdot \frac{l}{v} = \frac{l}{\frac{v}{R}}$   
 $\implies$  Anzahl der gesendeten Bits während 1. Bit sich vom Sender zum Empfänger ausbreitet
- a)  $RD > 1$ :
  - i.  $t = D$ : erstes Bit erreicht Empfänger,  $R \cdot D$  Bits versendet
- b)  $RD < 1$ :
  - i.  $t = D$ : Anfang des Bits empfangen,  $R \cdot D \cdot 100\%$  des Bits versendet
  - ii.  $t = \frac{1}{R}$ : Bit komplett gesendet
  - iii.  $t = \frac{1}{R} + D$ : Bit komplett empfangen
5. Kanalpuffergröße in Paketen  $a = \frac{R \cdot D}{L} = \frac{l}{\frac{L}{R}}$
6. Sendezeit leitungsverb.:  $R_{\text{eff}} = \frac{R}{x}$  mit  $x$  den Slots pro Sekunde/Frequenz
7. Paketverzögerung:

Einführung,  
21

Übung 1, 11  
Übung 2, 2

$$d = \underbrace{d_{\text{trans}}}_{\text{Übertragung, Bits auf Link, } \frac{L}{R}} + \underbrace{d_{\text{prop}}}_{\text{Ausbreitung im Medium } \frac{l}{v}} + \underbrace{d_{\text{proc}}}_{\text{Verarbeitung (Bitfehler, Links bestimmen)}} + \underbrace{d_{\text{queue}}}_{\text{Warteschlange (Wartezeit auf Link)}}$$

8. Paketverzögerung mit mehreren Links:

Übung 2.6

$$\left( \sum_{i=1}^E d_{\text{trans}_i} + d_{\text{prop}_i} + d_{\text{proc}_i} + d_{\text{queue}_i} \right) + d_{\text{proc}}$$

9. Übertragung in Paketen über mehrere Links:

Übung 1, 25

$$d_{\text{trans}} = n_{\text{links}} \cdot \frac{L}{R} + (n_{\text{pakete}} - 1) \cdot \frac{L}{R}$$

(wenn leitungsvermittelt:  $n_{\text{links}} = 1$ )

10. mittlere Warteschlangenverzögerung

Übung 2.4

$$d = \frac{d_{ges}}{N}$$

$$d_{ges} = \sum_{i=1}^N (i-1) \cdot \frac{L}{R} = \frac{N \cdot (N-1)}{2} \cdot \frac{L}{R}$$

11. Verkehrsintensität:

Übung 1, 20  
Übung 2.5

$\lambda$ : durchschnittliche Paketankunftsrate (Pakete pro Sekunde)

$$\rho = \frac{L \cdot \lambda}{R} \begin{cases} d_{queue} \text{ fällt} & \text{falls } \rho < 1 \\ d_{queue} \text{ steigt} & \text{falls } \rho = 1 \\ d_{queue} \rightarrow \infty, \text{ da mehr Pakete ankommen als abgearbeitet werden} & \text{falls } \rho > 1 \end{cases}$$

12. Wahrscheinlichkeit, dass  $n$  Nutzer gleichzeitig senden:  $P_n = \binom{\max}{n} \cdot (P_{user})^n \cdot (1 - P_{user})^{\max-n}$

Übung 1.3c

13. Wahrscheinlichkeit, dass mehr als  $n$  Nutzer gleichzeitig senden:  $\sum_{i=n}^{\max} P_i = 1 - \sum_{i=0}^n P_i$

Übung 1.3d

## TCP-Leistungsanalyse

1. Verbindungsaufbau:  $2 \cdot RTT$  für:

Transport, 134

- $C \rightarrow S$  : SYN (seqnum: client\_isn)
- $S \rightarrow C$  : SYN + ACK (seqnum: server\_isn, acknum: client\_isn + 1)
- $C \rightarrow S$  : ACK + Request (seqnum: client\_isn + 1, acknum: server\_isn + 1)

2. Verbindungsabbau:

Transport, 136

- $C \rightarrow S$  : FIN (seqnum: client\_sqn)
- $S \rightarrow C$  : ACK (seqnum: server\_sqn, acknum: client\_sqn + 1)
- $S \rightarrow C$  : FIN (seqnum: server\_sqn)
- $C \rightarrow S$  : ACK (seqnum: client\_sqn + 1, seqnum: server\_sqn + 1)
- $C$  wartet noch 2 Segmentlebensdauern auf mögliche alte Segmente („time wait“),  $S$  ist nach dem Erhalt des letzten ACKs fertig

3. festes Fenster, keine Wartezeiten:

Transport, 162  
Übung 4, 9  
Übung 5, 4

$$d = \underbrace{2 \cdot RTT}_{\text{Verbindungsaufbau}} + \underbrace{\frac{O}{R}}_{\text{Datei übertragen}}$$

tritt ein falls gilt:

$$\underbrace{\frac{WL}{R}}_{\text{Senden eines Fensters der Größe WL}} \geq \underbrace{\frac{L}{R}}_{\text{Senden Segment}} + \underbrace{RTT}_{\text{ACK von Server bei Client}}$$

4. festes Fenster, mit Wartezeit (also  $\frac{WL}{R} < \frac{L}{R} + RTT$ ): Wartezeit pro Fenster:

Transport, 163  
Übung 4, 8  
Übung 5, 6

$$\frac{L}{R} + RTT - \frac{WL}{R}$$

$K$  Fenster  $\Rightarrow (K-1)$ -mal Warten, Anzahl benötigter Fenster  $K := \lceil \frac{O}{WL} \rceil \Rightarrow (K-1)$ -mal Warten

$$d = 2RTT + \frac{O}{R} + (K-1) \left( \frac{L}{R} + RTT - \frac{WL}{R} \right)$$

5. Dynamisches Fenster:

Transport, 164  
Übung 5, 8

$$d = 2RTT + \frac{O}{R} + d_{SSW}$$

warten, wenn  $\frac{WL}{R} \leq \frac{L}{R} + RTT \Rightarrow$  Wartezeit nach  $K$ . Fenster:  $\max\{\frac{L}{R} + RTT - 2^{K-1} \cdot \frac{L}{R}; 0\}$

Wartezeiten bis Fenster  $Q$ :  $\max\{k : T \cdot \frac{L}{R} + RTT - 2^{k-1} \cdot \frac{L}{R}; 0\}$

Anzahl Fenster  $K$  um  $O$  zu übertragen:  $K = \min\{k : \sum_{i=1}^k x^{i-1} \cdot L \geq O\}$

Transport, 166  
Übung 5, 9

$$Q = \left\lceil \log_2 \left( 1 + \frac{RTT}{\frac{L}{R}} \right) \right\rceil + 1$$

bis zu welchem Fenster Wartezeiten

$$K = \left\lceil \log_2 \left( \frac{O}{L} + 1 \right) \right\rceil$$

Anzahl Fenster um  $O$  zu übertragen

$\underbrace{P}_{\text{Anzahl SSW}} = \min\left\{ \underbrace{Q}_{\text{Nicht mehr warten, } O \text{ groß genug}}; \underbrace{K-1}_{\text{Warten, wenn } O \text{ zu klein}} \right\}$  Wartezeit bei endlich großem Objekt  $O$

$$d = 2RTT + \frac{O}{R} + P \cdot \left( RTT + \frac{L}{R} \right) - (2^P - 1) \cdot \frac{L}{R}$$

6. mehrere Links  $T$ :

Übung 5.2

$$d = 2 \cdot RTT_T + \frac{O}{R} + (T-1) \cdot \frac{L}{R} + P_T \cdot \left( RTT_T + \frac{TL}{R} \right) - (2^{P_T} - 1) \cdot \frac{L}{R}$$

$$Q_T = \left\lceil \log_2 \left( T + \frac{RTT}{\frac{L}{R}} \right) \right\rceil + 1$$

$K =$  wie normal

7. um Faktor 2 erhöhen, also Fenstergröße  $W^3$ :

Übung 5.1

$$d = 2 \cdot RTT + \frac{O}{R} + P \cdot \left( \frac{L}{R} + RTT \right) - \frac{P-1}{2} \cdot \frac{L}{R}$$

$$Q = \left\lceil \log_3 \left( 1 + \frac{RTT}{\frac{L}{R}} \right) \right\rceil + 1$$

$$K = \left\lceil \log_3 \left( \frac{2O}{L} + 1 \right) \right\rceil$$

8. Verzögerung HTTP mit  $M$  Objekten und 1 Basisseite:

a) nicht-persistent:

Übung 5, 18  
Aufgabe 5.1

$$(M+1) \left( 2 \cdot RTT + \frac{O}{R} + SSW \right)$$

b) persistent mit Pipelining:  $Q$  und  $K$  konstant

Übung 5, 18  
Aufgabe 5.3

$$2 RTT + \underbrace{RTT}_{\text{Anfrage Bilder}} + (M+1) \cdot \frac{O}{R} + \text{gem. SSW}$$

$$\text{gem. SSW} = SSW + RTT - \max \left\{ \frac{L}{R} + RTT - \left( 2^{K-1} \cdot \frac{L}{R} \right); 0 \right\}$$

c) nicht-persistent mit  $X$  parallelen Verbindungen ( $\frac{M}{X}$  ganze Zahl):  
in  $SSW_{\text{parallel}}$   $R$  durch  $\frac{R}{X}$  ersetzen

Übung 5, 18  
Aufgabe 5.2

$$\left( \frac{M}{X} + 1 \right) \cdot 2 \cdot RTT + (M+1) \cdot \frac{O}{R} + SSW_{\text{normal}} + SSW_{\text{parallel}}$$

9. Flusskontrolle: Transport, 144
- a) effective window  $> 0 \Rightarrow$  senden
  - b) LastByteWritten  $-$  LastByteAcked  $\leq$  MaxSendBuffer  $\Rightarrow$  Anwendung schreibt Transport, 147
  - c) Freier Speicher bei Empfänger:  
advertised window = maxRcvBuffer  $-$  ((NextByteExpected  $-$  1)  $-$  LastByteRead) Transport, 146
  - d) Falls mehr als 16 Bit für Fenstergröße benötigt werden: Scaling Factor  $F \leq 14$ , dann gilt  
window = advertised window  $\cdot 2^F$  Transport, 150
10. Überlastkontrolle:
- a) max window = min {congestion window; advertised window} Transport, 152
  - b) effective window = max window  $-$  (LastByteSent  $-$  LastByteAcked) Transport, 152
  - c) Bitrate  $R \approx \frac{\text{congestion window}}{RTT}$
  - d) Slow-Start: Transport, 153f
    - i. anfangs congestion window = MSS, nach jedem ACK congestion window+ = MSS (also exponentiell), bis 3 doppelte ACKs eintreffen oder Threshold (anfangs unendlich) erreicht
    - ii. Multiplicative Decrease (3 doppelte ACKs):  
Threshold =  $\frac{\text{congestion window}}{2}$ ; congestion window/ = 2
    - iii. Additive Increase: Mit jedem ACK: congestion window+ = MSS  $\cdot \frac{\text{MSS}}{\text{congestion window}}$
    - iv. nach Timeout: Threshold =  $\frac{\text{congestion window}}{2}$ ; congestion window = MSS (dann wird Slow-Start bis zum Threshold und danach AIMD durchgeführt)

## Bitfehlerwahrscheinlichkeiten

Transport, 12

1. mindestens 1 Bitfehler im Segment:  $1 - (1 - p)^L$
2. 2 Bitfehler im Segment:  $P_{2\_Fehler} := \#Paare \cdot P_{\text{bestimmtes Paar fehlerhaft}} = \frac{(L-1) \cdot L}{2} \cdot P_{\text{bestimmtes Paar fehlerhaft}}$
3. mittlere Anzahl Pakete bis 2 Bitfehler im gleichen Segment:  $\frac{1}{P_{2\_Fehler}}$

## Fehlerkontrolle

1. Stop-And-Wait: Transport, 18
  - a) (Leitungs-)Durchsatz: Transport, 92

$$\frac{L}{N \cdot \left(\frac{L}{R} + 2D\right)}$$
  - b) Normierter Durchsatz: Transport, 92

$$S = \frac{1}{N(1 + 2a)}$$
  - c) Falls keine Fehler:  $N = 1$  Transport, 91
  - d) Mittlere Anzahl der Sendeveruche pro Paket bei Fehlerwahrscheinlichkeit  $p$ : Übung 4, 3  
Transport, 93

$$N = \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot p^{i-1} \cdot (1 - p) = \frac{1}{1 - p} \Rightarrow S = \frac{1 - p}{1 + 2a}$$

2. Selective-Repeat (mit Pakete auf Kanal  $a = \frac{R \cdot D}{L}$ ):

- a) 1. Fall: Fenster groß genug, dass bis zum ACK-Empfang gesendet werden kann, also  $W > 1 + 2a$ :

i. ohne Fehler:

$$S = \frac{W \cdot L}{W \cdot \frac{L}{R}} \cdot \frac{1}{R} = 1$$

Transport, 95  
Übung 4, 9

ii. mit Fehlerwahrscheinlichkeit  $p$ :

$$S = 1 - p$$

Transport, 99  
Übung 4, 16

- b) 2. Fall: Es muss auf ACK gewartet werden, also  $W < 1 + 2a$ :

i. ohne Fehler:

$$S = \frac{W \cdot L}{\frac{L}{R} + 2D} \cdot \frac{1}{R} = \frac{W}{1 + 2a}$$

Transport, 95  
Übung 4, 8

ii. mit Fehlerwahrscheinlichkeit  $p$ :

$$S = \frac{W \cdot (1 - p)}{1 + 2a}$$

Transport, 99  
Übung 4, 16

3. Go-Back-N (ohne Fehler wie Selective-Repeat) mit Fehlerwahrscheinlichkeit  $p$ :

a) Mittlere Anzahl Sendeversuche pro Paket:

$$N = \sum_{i=1}^{\infty} ((1 - K) + K_i) \cdot p^{i-1} \cdot (1 - p) = \frac{1 - p + K \cdot p}{1 - p}$$

b)  $W \geq 1 + 2a$ : ( $K = 1 + 2a$ )

$$S = \frac{1 - p}{1 + 2ap}$$

Transportschicht,  
101  
Übung 4, 18

c)  $W < 1 + 2a$ : ( $K = W$ )

$$S = \frac{W \cdot (1 - p)}{(1 - p + W \cdot p) \cdot (1 + 2a)}$$

Transportschicht,  
101  
Übung 4, 18

## Sequenznummernraum mit $m = 2^n$ Werten

- Falls Empfangsfenstergröße = 1:  $W < m$  hinreichend
- Falls Sendefenstergröße = Empfangsfenstergröße  $> 1$ :  $W < \frac{m+1}{2}$

Transport, 61  
Transport, 81

## Leistungsanalyse Medienzugriff

1. (Slotted-)ALOHA:

a) Wahrscheinlichkeit für Senden ohne Kollision bei Sendewahrscheinlichkeit  $p$ :

$$\underbrace{p}_{\text{Knoten sendet}} \cdot \underbrace{(1-p)}_{\text{kein anderer Knoten sendet in } [t_0 - 1, t_0]} \cdot \underbrace{(1-p)}_{\text{kein anderer Knoten sendet in } [t_0, t_0 + 1]} \\ = p \cdot (1 - p)^{N-1} \cdot (1 - p)^{N-1} = p \cdot (1 - p)^{2N-2}$$

Sicherung, 19  
Sicherung, 28  
Sicherung, 36

b) Normalisierter Durchsatz:

$$S = N \cdot p(1 - p)^{2(N-1)}$$

Sicherung, 36

- c) Sendeversuche pro Slot:  $G = N \cdot p \Rightarrow p = \frac{G}{N}$  *Sicherung, 37*  
 i. ALOHA:  $G = 0,5$  *Sicherung, 37*  
 ii. Slotted-ALOHA:  $G = 1$  *Sicherung, 39*

## 2. CSMA *Sicherung, 41*

- a) notwendige Voraussetzung: Ausbreitungsverzögerung  $d_{\text{prop}} < \text{Rahmensendezeit } \frac{L}{R}$  *Übung 8, 4*  
 b) verwendet ACKs *Sicherung, 42*  
 c) bei fehlendem ACK nach Timeout  $\Rightarrow$  Backoff (warten)  $\Rightarrow$  Resend  
 d) Varianten: *Sicherung, 43*  
 i. 1-persistent: Bei belegtem Medium warten bis frei, dann sofort senden *Übung 8, 6*  
 ii. nicht-persistent: Bei belegtem Medium Backoff  
 iii.  $p$ -persistent: Wenn Medium wieder frei, Senden mit Wahrscheinlichkeit  $p$  oder einen weiteren Slot abwarten  $(1 - p)$

## 3. CSMA/CD *Sicherung, 48*

- a) mit allen CSMA-Varianten kombinierbar *Übung 8, 11*  
 b) keine ACKs *Übung 8.2*  
 c) verwendet „listen while talking“  
 d) Normierter Durchsatz: *Sicherung, 52*

$$S_{\text{max}} = \frac{\text{Sendezeit}}{\text{Sendezeit} + \text{Ausbreitungszeit} + \text{Wettbewerbszeit}}$$

$$= \frac{\frac{L}{R}}{\frac{L}{R} + D + (e - 1) \cdot 2D} = \frac{1}{1 + 4,4a}$$

- e) Minimale Rahmengröße  $L$ : *Sicherung, 50*

$$\frac{L}{R} > 2 \cdot D \Rightarrow L > 2 \cdot R \cdot D$$

- f) Erfolg

$$p = \frac{1}{N}$$

$$P_{\text{erfolg}} = N \cdot p(1 - p)^{N-1}$$

$$(P_{\text{erfolg}})^{\text{max}} = \frac{1}{e}$$

$\Rightarrow$  alle  $e$  Slots erfolgreicher Senderversuch

## 4. Ethernet *Sicherung, 63*

- a) 1-persistentes CSMA/CD *Sicherung, 66*  
 b) Hub: eine Kollisionsdomäne, Signal wird auf alle Ports weitergeleitet *Sicherung, 67*  
 c) Bridge: Aufteilung in verschiedene Kollisionsdomänen, enthält „Switching Fabric“ *Sicherung, 72*  
 d) VLAN entweder port- oder tag-basiert

## Verteilte Hash-Tabellen

Anwendung,  
87

1. jeder Peer hat Bezeichner  $p \in [0, 2^m)$  bei  $m$  Bits
2. jedes Datenelement hat Schlüssel  $k$  aus gleichem Raum
3. Speicherung und Auslesen von  $k$  auf Peer  $p = \text{succ}(k) = (k + a) \bmod 2^m$  mit minimalem  $a$
4. Effizienzsteigerung durch Fingertabellen auf jedem Peer  $p$ :

a)  $m$  Einträge:

$$FT_p[i] = (p + 2^{i-1}) \bmod 2^m$$

b) Lookup von  $k$  beginnend auf beliebigem Peer  $p$ :

$$\text{lookup}(k, p) = \begin{cases} p & , p = k \\ FT_p[1] & , p < k \leq FT_p[1] \\ \text{lookup}(k, FT_p[i]) & , FT_p[i] \leq k < FT_p[i+1] \text{ mit } 1 < i < m \\ \text{lookup}(k, FT_p[m]) & , FT_p[m] \leq k \end{cases}$$

Anwendung,  
89  
Übung 3.1

## Cyclic Redundancy Check

Sicherung, 14

1. Nutzdaten  $D$  mit  $d$  Bits, Prüfdaten  $R$  mit  $r$  Bits, Generatorpolynom  $G$  mit  $r + 1$  Bits
2.  $R$  ist Rest bei  $(D \cdot 2^r)/G$
3.  $(D, R)$  ist folglich  $(D \cdot 2^r) \oplus R$
4. Korrekt falls  $(D, R)/G = 0$

## Shannons Theorem

1. Maximale Datenrate  $R$  bei Bandbreite  $B$ :  $R = B \cdot \log_2(1 + \frac{S}{N})$
2.  $x \text{ dB} = 10 \log_{10} \frac{S}{N} \Rightarrow \frac{S}{N} = 10^{\frac{x}{10}}$

Physikalisch,  
24  
Physikalisch,  
24

## Mathematisches

1. Binomialkoeffizient:

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k! \cdot (n-k)!}$$

2. Gaußsche Summenformel:

$$\sum_{k=1}^n k = \frac{n \cdot (n+1)}{2}$$

3. Quadratische Pyramidalzahl:

$$\sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n \cdot (n+1) \cdot (2n+1)}{6} = \frac{2n^3 + 3n^2 + n}{6}$$

4. Geometrische Reihe für  $|q| < 1$ :

$$\sum_{k=0}^{\infty} (a_0 \cdot q^k) = \frac{a_0}{1-q}$$