

## Aufgabe 1 Allgemeine Fragen (10 Punkte)

a) Erklären Sie, was man unter dem Begriff Middlebox versteht. Nennen Sie außerdem zwei verschiedene Gründe, warum es sinnvoll sein kann, Middleboxes zu virtualisieren.

10

b) Erklären Sie kurz den wesentlichen Unterschied zwischen CSMA/CD und CSMA/CA in Hinblick auf den Umgang mit Kollisionen.

1,5

c) Lassen sich MPLS-Dateneinheiten ohne weiteres über das öffentliche Internet übertragen? Begründen Sie Ihre Antwort ausführlich.

1

2 d) Im Rahmen des Spanning-Tree-Algorithmus werden spezielle Pakete – sogenannte BPDUs – verwendet. Erklären Sie, was die Abkürzung BPDUs bedeutet und wofür diese Pakete verwendet werden. Geben Sie außerdem an, welche Informationen laut Vorlesung in einer BPDUs enthalten sind.

2 e) Kodieren Sie die Zeichenfolge 111000101001 mit den Leitungscodes NRZ und Manchester, wie in der Vorlesung vorgestellt. Zeichnen Sie dabei alle Pegelwechsel ein.

	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1
NRZ												
Manchester												

f) Welche Bandbreite wird mindestens benötigt, um Daten mit  $25Mbit/s$  auf einem Kanal zu übertragen, dessen Signal-zu-Rausch-Abstand mit 31 angegeben ist. Geben Sie die Formel an und berechnen Sie das Ergebnis.

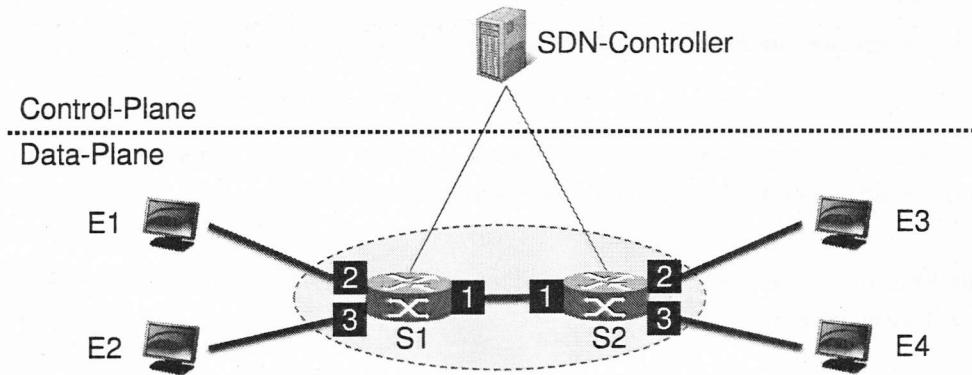
1

g) Geben Sie an, wie ein Router beschaffen sein muss, damit Head-of-Line-Blocking auftreten kann und wie es sich vermeiden lässt.

1,5

## Aufgabe 2 Software Defined Networking (10 Punkte)

In dem nachfolgend dargestellten SDN-Netz werden die beiden Switches S1 und S2 zentral von einem SDN-Controller über das *OpenFlow*-Protokoll gesteuert. An das Netz sind zudem die Endsysteme E1 bis E4 in der dargestellten Weise angebunden. Die Nummern der Ports, an denen die Systeme angeschlossen sind, sind in den quadratischen Kästen am jeweiligen Switch angegeben.



Auf Schicht 2 wird Ethernet verwendet. Für eine Weiterleitung der Ethernetrahmen zu den Endsystemen werden Flow-Einträge benötigt, die anhand der MAC-Adressen bestimmen, auf welchem Port ein Rahmen ausgegeben wird. In dieser Aufgabe sollen Sie die Funktionsweise einer *Learning-Switch App* beschreiben, die eine Zuordnung der MAC-Adressen zu den Ports automatisch erkennt und die zur Weiterleitung benötigten Flow-Einträge programmiert. Gehen Sie dabei von der folgenden Ausgangssituation aus:

1. Die App besitzt (noch) keine Kenntnis der MAC-Adressen der Endsysteme.
2. Der Austausch von Rahmen zwischen Endsystemen kann in beliebiger Reihenfolge stattfinden.

1,5

a) Erläutern Sie zunächst kurz, was unter der *Trennung von Kontroll- und Datenebene* im Kontext von SDN zu verstehen ist. Nennen Sie einen Vorteil, der sich daraus hinsichtlich der Entwicklung von SDN-Applikationen ergibt.

b) In der Vorlesung wurde zwischen proaktiver und reaktiver Flow-Programmierung unterschieden. Welchen dieser Modi muss die Learning-Switch App verwenden, um Flows zu programmieren, die Ethernetrahmen abhängig von deren MAC-Adressen weiterleiten? Begründen Sie Ihre Antwort.

c) Vervollständigen Sie die nachfolgenden Flowtables. Gehen Sie davon aus, dass in diesen jeweils *fünf* Flows von der Learning-Switch App so früh wie möglich programmiert wurden, durch die eine Weiterleitung der Ethernetrahmen zu allen Endsystemen ermöglicht wird. Die Rahmen werden dabei ausschließlich an die adressierten Endsysteme weitergeleitet, und zwar ohne weitere Interaktion mit dem Controller. Verwenden Sie die Matches  $*$  (bedingungsloses Matching) sowie  $\text{Src} = X$  oder  $\text{Dst} = X$  ( $X \in \{E1, \dots, E4\}$ ) für ein Match auf die Quell-, bzw. Ziel-MAC-Adressen der jeweiligen Endsysteme.

1,5

6

Hinweis: Wenn Sie eine Flowtable korrigieren möchten, dann streichen Sie diese durch und verwenden Sie stattdessen die entsprechende Flowtable, die zusätzlich am Ende der Klausur bereitgestellt ist.

Switch S1, Flowtable 0			Switch S1, Flowtable 1		
Priority	Match	Actions	Priority	Match	Actions
		Goto-Table 1			
Low					Output ALL
Switch S2, Flowtable 0			Switch S2, Flowtable 1		
Priority	Match	Actions	Priority	Match	Actions
High					
					Output 2
					Output 3
		Controller			

- 1 d) Ist die Nummerierung *beider* Flowtables eines Switches für die Learning-Switch App aus Aufgabenteil c von Relevanz? Begründen Sie Ihre Antwort.

### Aufgabe 3 Tries (7,5 Punkte)

7,5

- a) Wofür werden Tries im Zusammenhang mit einem Router verwendet?

0,5

- b) Erläutern Sie die drei in der Vorlesung genannten Anforderungen an Tries.

1,5

- 2,5 c) Gegeben sei nun zunächst ein binärer Trie, in dem IPv6-Adressen gespeichert werden (Adresslänge von  $W = 128$  Bit). Für jeden Zugriff auf einen Knoten des Tries ist ein eigener Speicherzugriff erforderlich. Jeder Speicherzugriff benötigt  $t_{access} = 2ns$ . Berechnen Sie die maximale Datenrate  $D$  in Gbit/s, die mit einer solchen Datenstruktur erreicht werden kann, wenn ausschließlich 256 Byte große Pakete betrachtet werden. Geben Sie alle Zwischenrechnungen und die für die Berechnung verwendeten Formeln explizit an!

Hinweis: Sie benötigen für diese Aufgabe keinen Taschenrechner. Brüche müssen nicht ausgerechnet werden.

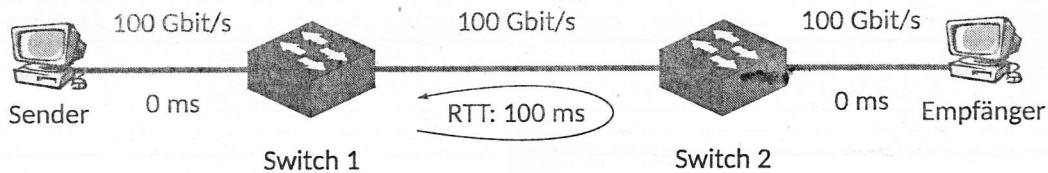
- 2 d) In der Vorlesung wurde im Zusammenhang mit Tries das "Path Compression" Verfahren vorgestellt. Was ist die generelle Idee hinter diesem Verfahren und welche zusätzlichen Informationen sind hierfür nötig? Kann mit diesem Verfahren die maximale Zeit, die für einen vollständigen Adress-Lookup in einem binären Trie im Worst Case benötigt wird, verbessert werden? Begründen Sie ihre Entscheidung.

- e) Gegeben sei nun ein Multibit Trie mit festem Stride von  $k$  (für alle Ebenen). Geben Sie in O-Notation an, wie viel Zeit hier für einen vollständigen Adress-Lookup benötigt wird. Erklären Sie, wie dieser Wert zustande kommt.

1

## Aufgabe 4 Transportschicht (11 Punkte)

Gegeben sei folgendes Szenario:



1

- a) Der Sender möchte 32.000 Bytes an den Empfänger übertragen. Nach Erhalt der Daten werden diese vom Empfänger quittiert.

Schätzen Sie eine sinnvolle untere Schranke für die Dauer von Beginn der Übertragung bis Empfang der Quittung unter idealen Bedingungen ab. (Es sind keine exakten Berechnungen erforderlich.)

Nun soll die Leistung von TCP im gleichen Szenario betrachtet werden. Gegeben seien folgende Parameter:

TCP-Variante	TCP Reno
RTT	100 ms
MSS	1.000 Byte
Empfangspuffer (pro Verbindung)	6.000 Byte
Bottleneck Rate	100 Gbit/s
SSThresh (initial)	4 MSS
Slowstart beginnt bei	1 MSS

Tabelle 4.1: Parameter

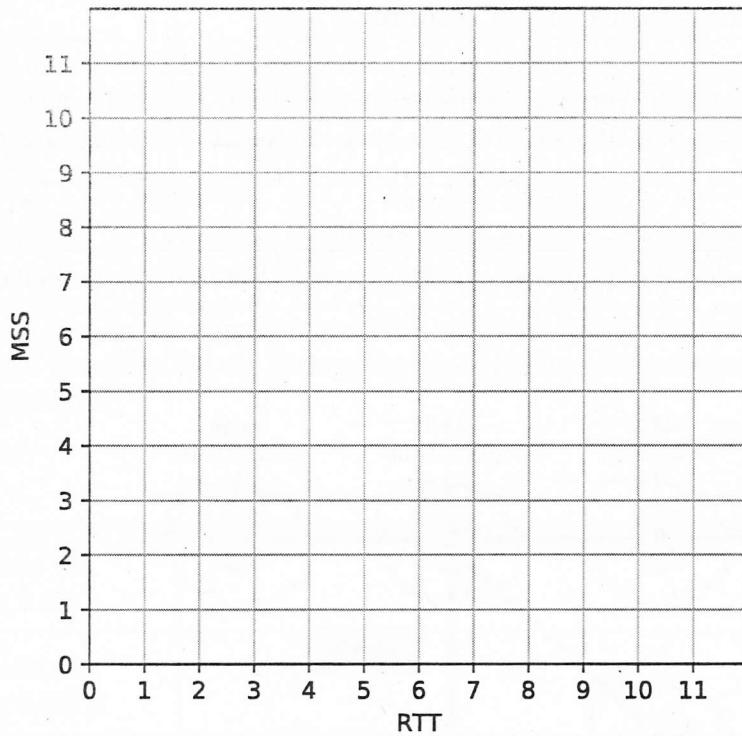
Zur Vereinfachung sollen die Verarbeitungszeiten in den Endsystemen ignoriert werden. Der 3-Wege Handshake beim Verbindungsauflauf wird ebenfalls ignoriert. Daten gelten immer am Ende der RTT, in der sie abgeschickt werden, als quittiert (sofern sie generell quittiert werden). Es treten keine Übertragungsfehler auf. Es finden keine anderen Übertragungen als die jeweils genannten statt.

$rate_{max}$  bezeichne die maximal erreichte Datenrate einer Verbindung (Messgranularität eine RTT). Hierfür wird für jede RTT die mittlere Datenrate ermittelt und darüber das Maximum gebildet.

- b) Skizzieren Sie die Datenübertragung von 32.000 Bytes:

- Tragen Sie dafür für jede RTT die versendete Datenmenge in das vorgegebene Diagramm ein.
- Nennen Sie für jede der RTTs, wodurch die versendete Datenmenge begrenzt wird.
- Nach wie vielen Umlaufzeiten (RTTs) ist die Übertragung abgeschlossen?

3



3) c) Vergleichen Sie die Dauer der Übertragung mit der oben berechneten unteren Schranke.

- Um welchen Faktor ist die Übertragung mittels TCP langsamer als die untere Schranke?
- Wie groß ist  $rate_{max}$  (s. oben)? Wodurch wird es beschränkt?
- Kann der Sender (unter den gegebenen Bedingungen) seine Datenrate durch die gleichzeitige Nutzung von zwei TCP-Verbindungen erhöhen? Begründen Sie Ihre Antwort.
- Schätzen Sie grob ab, wie lange die Übertragung der *doppelten* Datenmenge mithilfe von *zwei* gleichzeitig gestarteten TCP-Verbindungen dauert (jede Verbindung überträgt 32.000 Bytes). Geben Sie eine kurze Begründung an.

d) Heben Sie nun die oben identifizierte Beschränkung von  $rate_{max}$  auf, indem Sie *einen* Parameter aus Tabelle 4.1 ändern. Nennen Sie den Parameter und den neuen Wert.

Skizzieren Sie die Datenübertragung von 32.000 Bytes unter den neuen Bedingungen:

- Tragen Sie dafür für jede RTT die versendete Datenmenge in das vorgegebene Diagramm ein.
- Nach wie vielen Umlaufzeiten (RTTs) ist die Übertragung abgeschlossen?
- Um welchen Faktor konnte die Übertragung beschleunigt werden?

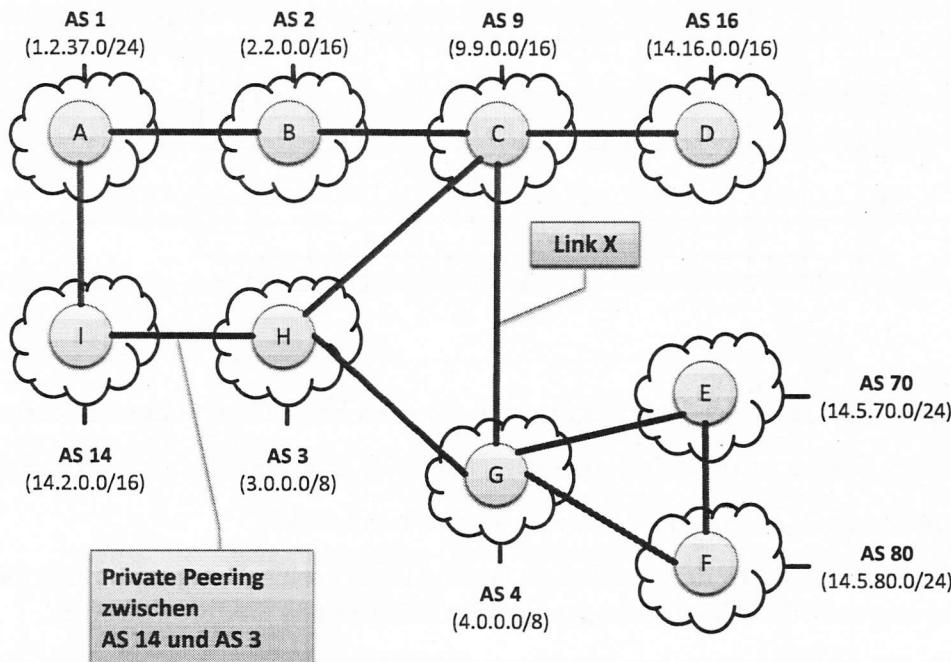
2) e) Obwohl die Einschränkung für  $rate_{max}$  im vorherigen Aufgabenteil aufgehoben wurde, ist die Übertragung deutlich langsamer als die in a) berechnete untere Schranke.

- Analysieren Sie, wodurch die Übertragung weiterhin verzögert wird. Beschreiben Sie dies nachvollziehbar.
- Beschreiben Sie eine weitere aus der Vorlesung bekannte Maßnahme, mit der die Übertragung weiter beschleunigt werden kann, und deren Auswirkung.
  - Die Daten sollen weiterhin über *eine* TCP-Verbindung übertragen werden.
  - Die in der vorherigen Teilaufgabe vorgenommene Parameteränderung bleibt weiterhin gültig.

## Aufgabe 5 Border Gateway Protocol (13 Punkte)

Gegeben ist die folgende Netztopologie, die aus neun Autonomen Systemen (AS) und neun BGP-Routern (A, B, ...) besteht. Die durchgezogenen Verbindungen zwischen den BGP-Routern kennzeichnen sowohl die physische Verbindung zwischen den BGP-Routern als auch aktive BGP-Verbindungen. Ferner gilt für alle Teilaufgaben:

- Jedes AS ist für das ihm zugewiesene Präfix verantwortlich.
- Die BGP-Verbindung zwischen den Routern I und H ist ausschließlich Bestandteil einer *Private-Peering*-Vereinbarung.



a) Welche Routing-Nachrichten sind bei BGP dafür zuständig, neue Pfade im Netz bekannt zu machen? Geben Sie den Namen und Inhalt dieser Routing-Nachrichten an. Wann, bzw. wie oft werden diese Nachrichten bei BGP verschickt?

- 1,5
- b) Erklären Sie, wofür die drei Tabellen Adj-RIB-In, Loc-RIB und Adj-RIB-Out bei BPG benötigt werden. Geben Sie dafür an, welche Informationen diese Tabellen jeweils enthalten.
- 5 c) Füllen Sie die BGP-Routingtabelle von C mit allen zur Aufgabenstellung passenden Einträgen. Beschränken Sie sich dabei ausschließlich (!) auf die Einträge, deren Zielnetz sich als  $14.w.x.y/z$  darstellen lässt – das heißt, das Zielnetz jedes Eintrags muss ein beliebiges Unter-Präfix von  $14.0.0.0/8$  sein.  
*Hinweis: Eine korrekte Lösung muss nicht zwingend alle freien Einträge der Tabelle ausnutzen.*

BGP-Routingtabelle von C (AS 9):		
Zielnetz	Next Hop	Pfad

d) Geben Sie für die drei unten aufgelisteten Fälle an, über welche BGP-Router die Pakete jeweils weitergeleitet werden. Beachten Sie die Reihenfolge und beginnen Sie immer mit dem Router, bei dem die Pakete zuerst eintreffen.

1,5

	Weiterleitung erfolgt über:
<b>Fall 1:</b> Pakete von 14.2.6.13 an 9.9.9.9	
<b>Fall 2:</b> Pakete von 14.2.6.13 an 3.3.3.3	
<b>Fall 3:</b> Pakete von 14.2.6.13 an 14.5.80.6	

e) Erklären Sie, wie BGP-Router C durch die Aggregation von Adressbereichen Routing-Nachrichten einsparen kann. Geben Sie ein konkretes Beispiel für das in der Aufgabenbeschreibung dargestellte Netz an.

1

f) Durch die Bekanntgabe von neuen Präfixen kann dafür gesorgt werden, dass alle Pakete aus AS 9 in Richtung AS 70 **nicht** über Link X geroutet werden und trotzdem am Ziel ankommen. Geben Sie alle BGP-Router an, die eine solche Bekanntgabe durchführen können, und begründen Sie Ihre Wahl. Was genau muss in einem solchen Fall bekanntgegeben werden? Geben Sie ein konkretes Beispiel an.

## Aufgabe 6 Datacenter (8,5 Punkte)

Eine Firma möchte ein neues Datacenter aufbauen und plant dafür ein Fat-Tree-Netzwerk für ihre 16 Server-Racks.

8,5

a) In der Vorlesung wurden sogenannte k-Pod-Fat-Trees vorgestellt. Worin unterscheidet sich ein k-Pod-Fat-Tree von einem Fat-Tree? Beschreiben Sie jeweils einen Vor- und einen Nachteil von k-Pod-Fat-Trees gegenüber Fat-Trees.

1,5

b) Die Firma hat nun vor, einen k-Pod-Fat-Tree aufzubauen. Skizzieren Sie einen k-Pod-Fat-Tree mit  $k=4$  für die im Lösungsfeld vorgegebenen 16 Server-Racks. Zeichen Sie alle Switches ein. Machen Sie kenntlich, welche Server Racks und Switches zu welchem Pod gehören. Sie müssen nur für den ersten Pod alle Links vollständig einzeichnen. Benennen Sie außerdem die verschiedenen Ebenen der Switches in Ihrem k-Pod-Fat-Tree.

4

*Hinweis: Sie können Switches als Kreise zeichnen.*

c) Die Firma will zukünftige Erweiterungen des Data-Centers berücksichtigen. Deswegen will sie Switches mit 8 Ports kaufen. Wie viele Server-Racks können in einem k-Pod-Fat-Tree mit diesen Switches angeschlossen werden?

*Hinweis: Geben Sie alle Zwischenrechnungen und verwendeten Formeln an.*

- 2 d) In der Vorlesung wurde das TCP-Incast-Problem vorgestellt, welches den Durchsatz in Data-Centern beeinträchtigt. Illustrieren Sie das TCP-Incast-Problem. Zeichnen Sie dabei ein, wo ein Engpass entsteht. Erklären Sie kurz, wie es zu diesem Problem kommt.