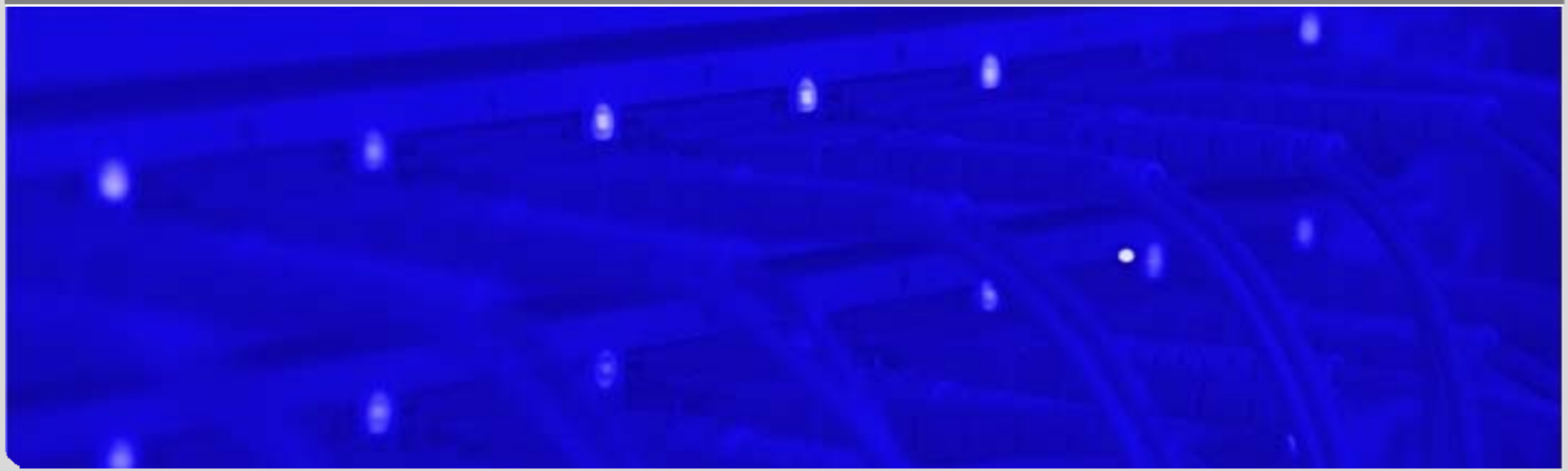
Karlsruher Institut für Technologie

TeleMatics

Next Generation Internet

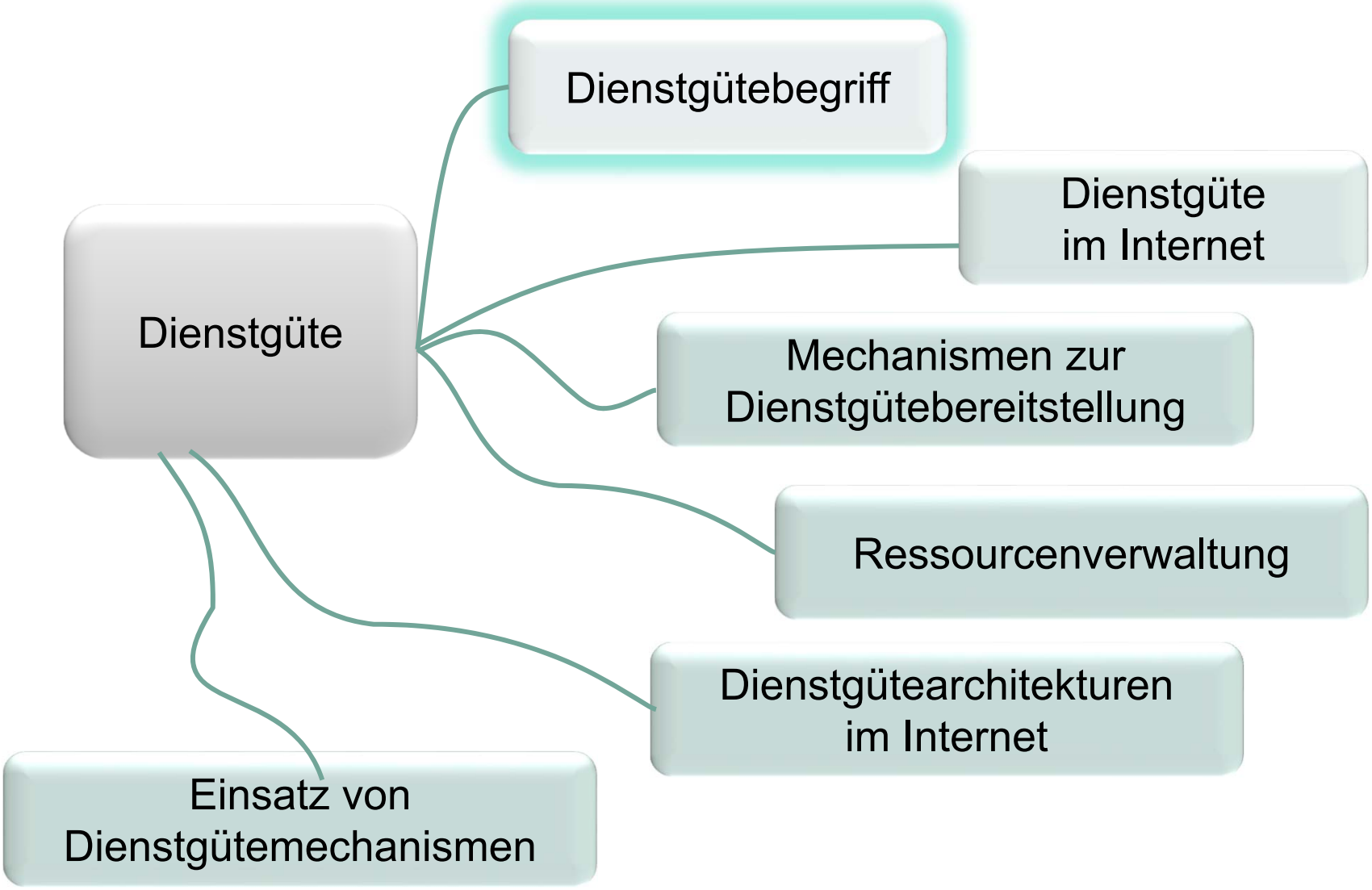
4. Dienstgüte

INSTITUT FÜR TELEMATIK



Überblick Kapitel 4

Überblick


Dienstgütebegriff
Dienstgüte im Internet
Dienstgüte
Mechanismen zur Dienstgütebereitstellung
Ressourcenverwaltung
Dienstgütearchitekturen im Internet
Einsatz von Dienstgütemechanismen

Was ist Dienstgüte?

- (Kommunikations-)Dienst wird mit bestimmter **Güte** bzw. **Qualität** assoziiert
  - umfasst zahlreiche Aspekte (technische und nicht-technische)
  - beschrieben durch Menge von Dienstmerkmalen, die Eigenschaften des Dienstes näher charakterisieren
  - zum Beispiel leistungsbezogene, betriebliche oder sicherheitsbezogene Merkmale
- Realwelt-Beispiel
  - Briefzustellung: normal, Einschreiben mit Rückschein, Express

Verschiedene Definitionen

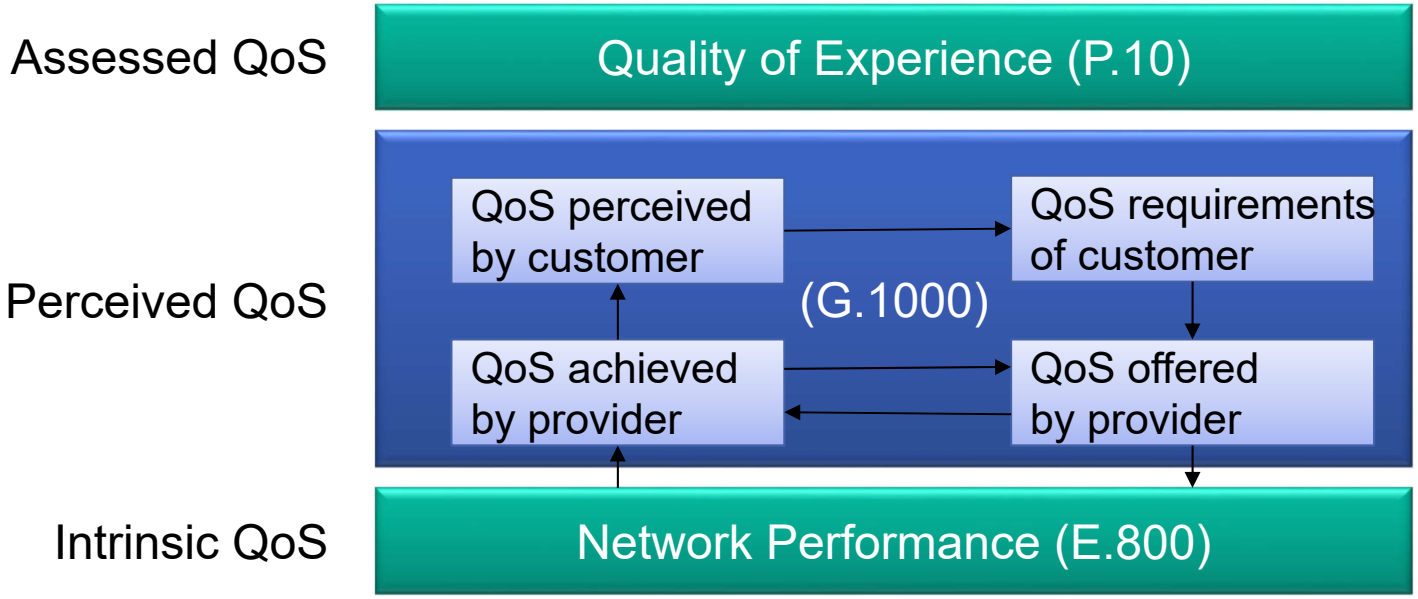
- ISO Definition: „*A set of qualities related to the collective behavior of one or more objects*“
  - sehr allgemein
- IETF: „A set of service requirements to be met by the network while transporting a flow“ [RFC2386]
- ITU-T Definition E.800 (09/2008): Quality of Service (QoS) „*Totality of characteristics of a telecommunications service that bear on its ability to satisfy stated and implied needs of the user of the service.*“
  - Definition ist am Dienstnutzer orientiert
    → subjektive Einflüsse

QoSE

- QoS Experienced/Perceived by Customer/User
- durch Kunden/Nutzer wahrgenommene Dienstgüte
- Qualitätsniveau, das Kunden meinen erfahren zu haben
- erfolgt oftmals durch Meinungsbewertung
  - Quantitative Komponente: wird durch Ende-zu-Ende-System-Effekte der Netzinfrastruktur beeinflusst
  - Qualitative Komponente: beeinflusst durch Nutzer-Erwartung, Umgebungsbedingungen, psychologische Faktoren, Anwendungskontext usw.

ITU-T Definition

- Quality of Experience: „overall acceptability of an application or service as perceived subjectively by the end-user“ ITU-T P.10



[StCJ11]

Dienstgüteparameter

- Dienstgüteparameter (quantitativ oder qualitativ):
  - quantitative:
    - Nachprüfbar durch Messung
  - qualitative:
    - Evtl. nachprüfbar durch Vergleich (relative Spez.)
    - Beeinflusst durch „Human Perception“ (z.B. Messen durch Ermittlung des Mean Opinion Score)
  - leistungsspezifische:
    - Durchsatz
    - Ende-zu-Ende-Verzögerung bzw. Ende-zu-Ende-Latenz
    - Verzögerungsschwankung (Delay-Jitter, meist kurz als Jitter bezeichnet)
    - Zuverlässigkeit (Übertragungsfehler, Paketverlust, doppelte Pakete,...)
    - Priorität (relativ)
    - Verbindungsaufbauverzögerung und -fehlerwahrscheinlichkeit

Weitere Aspekte

- Grad der Zusicherung je Merkmal
  - Keine Zusicherung (Best Effort)
  - Statistisch
  - Garantiert (deterministisch)
- Gültigkeit
  - Ende-zu-Ende
  - Bestimmte Übertragungsabschnitte
  - Einzelner Datenstrom, Aggregate
- „Grade of Service“
  - Betrachtung auf höherer semantischer Ebene
  - Zuverlässigkeit, Redundanz, Ausfallsicherheit usw.

Dienstgüteunterstützung in Netzen

- Dienstgüte in Netzen kann nicht „hinzugefügt“ werden
- Leistungsspezifische Dienstgüte kann nur abnehmen
  - Bei gegebener maximaler Datenrate, Entfernung und Verarbeitungszeit → minimale Laufzeit
  - Verzögertes Paket kann nicht mehr schneller befördert werden
  - Paketverlust kann nicht ungeschehen gemacht werden
- Ressourcenmangelverwaltung: Bevorzugte Behandlung von Paketen nur zu Lasten anderer Pakete möglich

It‘s the Latency, Stupid! [1)]

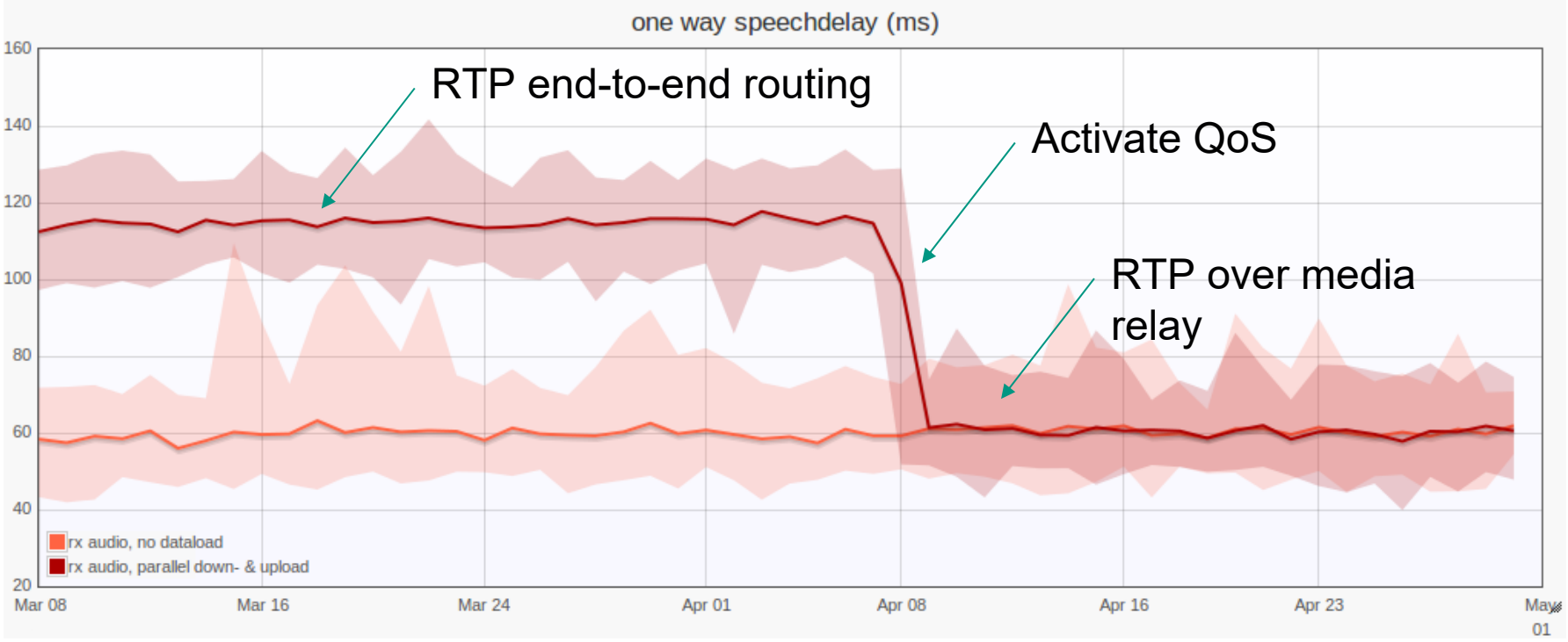
- Einfache Tatsache
  - Netz mit „Bandbreitenengpass“
    → Hinzufügen weiterer Kapazitäten als Abhilfe möglich
  - Netz mit schlechter (=hoher) Latenz
    → keine einfache Abhilfe möglich
- Latenz als Parameter wird immer wichtiger
  - Interaktive Anwendungen brauchen geringe Latenz
  - Viele Web-Seiten erfordern viele Transaktionen mit vielen verschiedenen Servern (viele Round-Trips)
- Viele Geräte erhöhen Latenz durch Pufferspeicher
  - „Bufferbloat“-Phänomen, TCP füllt Puffer systematisch

1) http://rescomp.stanford.edu/~cheshire/rants/Latency.html

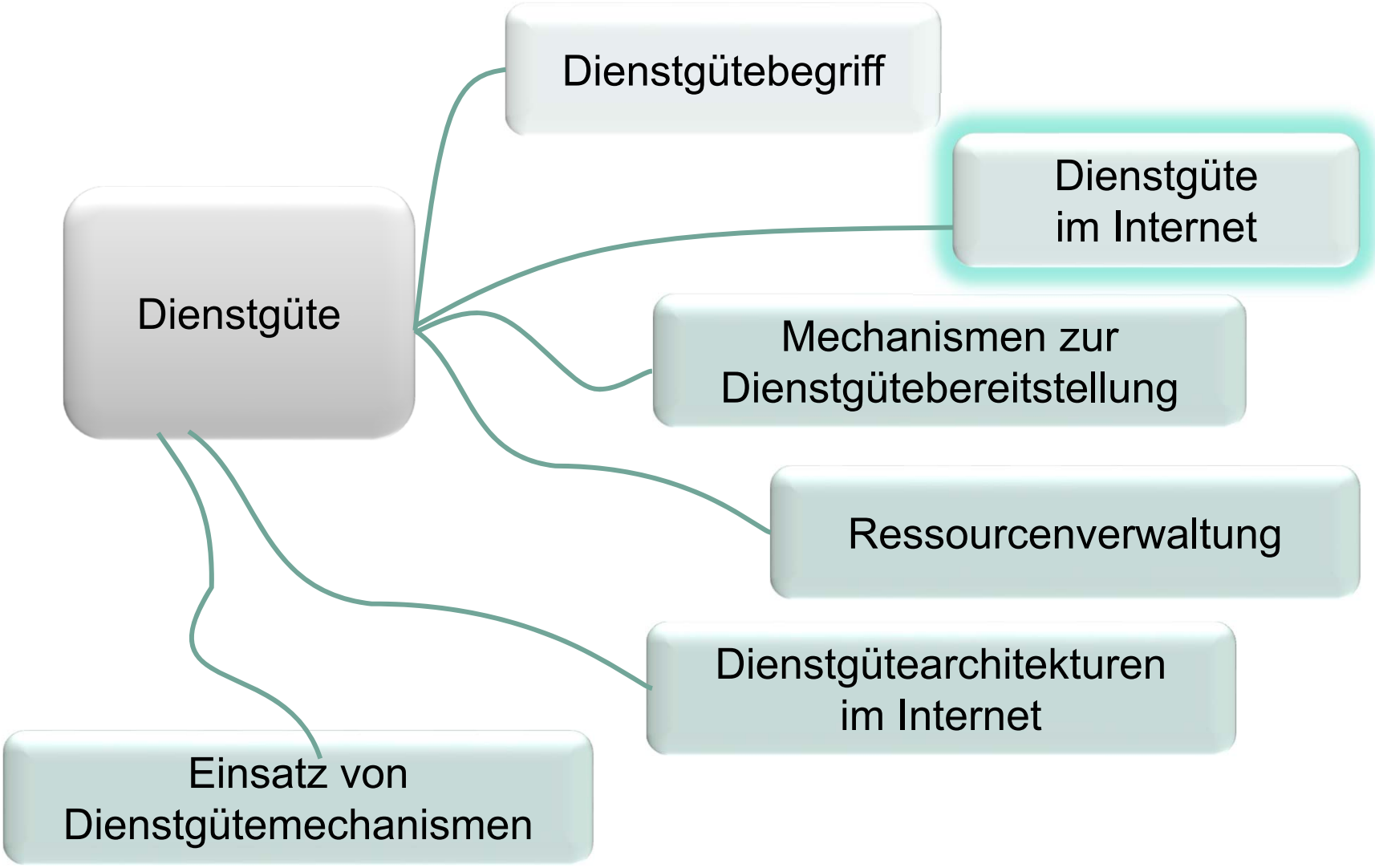
[GeNi11]

Realweltbeispiel Voice-over-IP VDSL

- Ohne differenzierte bzw. bevorzugte Weiterleitung der Sprachpakete: Qualitätsproblem



Überblick


Dienstgütebegriff
Dienstgüte im Internet
Dienstgüte
Mechanismen zur Dienstgütebereitstellung
Ressourcenverwaltung
Dienstgütearchitekturen im Internet
Einsatz von Dienstgütemechanismen

Dienstgüte im Internet?

- Fehlende Unterstützung für manche Anwendungen (insbesondere Echtzeitanwendungen, vor allem interaktive)
  - Derzeit manchmal schlechte Qualität bei „Audio/Video-Streaming“
- Datenstrom (Flow): Folge von Paketen zwischen zwei Punkten im Netzwerk
- Ende-zu-Ende-Datenstrom („Micro-Flow“): Datenstrom zwischen zwei Anwendungen
- Ressourcenmangel im Netzwerk
  → Schwankungen der Dienstqualität einzelner Datenströme

Dienstklassen

- Bestmögliche Klasse (Best-Effort):
  - Dienstklasse des heutigen Internets
  - keine Ressourcenreservierung
  - mit verfügbaren Ressourcen so gut (und schnell) umgehen, wie möglich
  - Konflikte sind „vorprogrammiert“, „Faire“ Aufteilung der Ressourcen
- Statistische Klasse:
  - Dienstgüteparameter werden nur statistisch eingehalten
    z.B.: „80% der Pakete haben eine Verzögerung < 100ms“
  - Ressourcen werden bis zu einem gewissen Grad überbelegt
  - Konflikte möglich
- Deterministische Klasse:
  - Dienstgüteparameter werden immer eingehalten (harte Garantie)
  - Ressourcen stehen einem Nutzer exklusiv zur Verfügung
  - keine Konflikte möglich, aber „Besetztfall“ (keine Ressourcen mehr übrig)

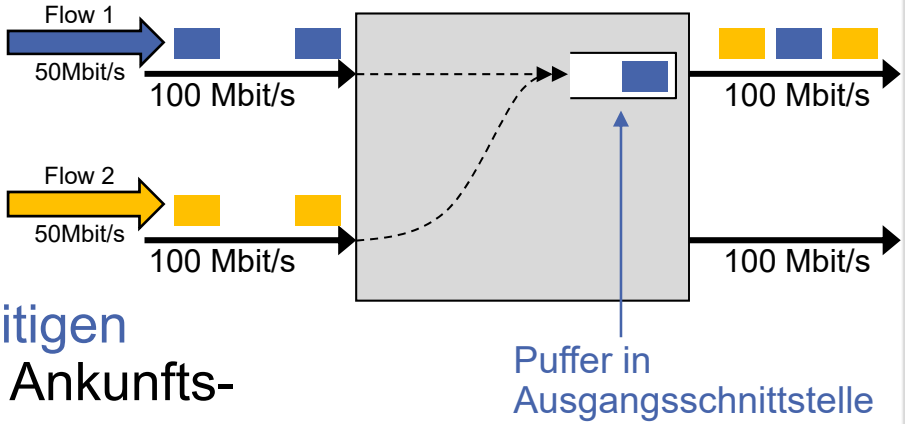
Best Effort – Fairness Index

- Bei Best-Effort: „faire“ Aufteilung der Kapazität erwünscht, z.B. gleiche Datenrate pro Datenstrom
- Aber: Wie definiert man fair?
- Ressourcen-Anteil für Nutzer i: x_i
- Jain‘s Fairness Index: $f(x) = \frac{(\sum x_i)^2}{n \sum {x_i}^2}, 0 \leq f(x) \leq 1$
- Beispiele:
  - $x = (1,1,3,5) \Rightarrow f(x) = 0{,}694$
  - $x = (2,2,2,2,2) \Rightarrow f(x) = 1{,}0$
  - $x = (2,2,2,3,3) \Rightarrow f(x) = 0{,}96$
  - $x = (1,1,0,0,0) \Rightarrow f(x) = 0{,}4$
  - $x = (3,3,0,3,3) \Rightarrow f(x) = 0{,}8$

[JaHC84]

Netzressourcen

- Einfaches Routermodell für paketbasierte Netze
  - Zwei Pakete mit gleichem Zielausgang: entweder Verwerfen oder Zwischenspeichern
  - Puffer
    - zum Ausgleich eines kurzzeitigen Missverhältnisses zwischen Ankunfts- und Abgangsraten
    - zwecks Anpassung an verschiedene Bandbreiten
    - mildert durch Bursts verursachten Paketverlust
    - Paketverlust tritt auf, wenn Puffer voll (Tail-Drop)
    - Pufferplatzierung am Eingang, Ausgang oder in der Verteilstruktur



- Ressourcen
  - Leitungskapazität (Datenrate, „Bandbreite“)
  - Puffergröße

Verkehrsmatrix

- Pufferfüllstand hängt von Verkehrsmatrix ab
  - Verkehrsmatrix: gibt an, welche Verkehrslast zwischen jedem Ein- und Ausgang fließt

	Output 1	Output 2
Input 1	50 Mbit/s	20 Mbit/s
Input 2	50 Mbit/s	50 Mbit/s

  - Bei langfristiger Überlast: hoher Paketverlust

	Output 1	Output 2
Input 1	75 Mbit/s	25 Mbit/s
Input 2	80 Mbit/s	20 Mbit/s

  - Verkehrsmatrix lässt sich nicht immer vorhersagen, z.B. Flash Crowds, DDoS-Angriffe

Wo ist das Problem?

- Ressourcenmangel (Link-Bandbreite/Puffer) im Netz verursacht Verzögerungsschwankungen und/oder Paketverlust
  → Datenstrom erfährt Schwankungen in der Dienstgüte
- Fehlende Unterstützung für einige Anwendungen, insbesondere interaktive Echtzeitanwendungen
  - Interaktive Anwendungen haben strenge Anforderungen an die Verzögerung: wenn ein Paket zu spät kommt, ist es nutzlos
  - zeitweise schlechte oder unakzeptable Qualität für Audio/Video-Anwendungen

Realzeit-Anwendungen

- Problem:
  - Realzeit-Anwendungen stellen zeitliche Anforderungen an Auslieferung der Daten
- Beispielsweise: Audio- und Videoanwendungen
  - Redundanz
    - Aus redundanter Information resultiert eine gewisse Toleranz hinsichtlich Datenverlusten
    - Zu spät eintreffende Daten stellen in diesem Sinne auch Verluste (d.h. Fehler) dar
  - Adaptivität
    - Verzögerungsadaptivität: Pufferschranke kann sich z.B. an der mittleren Verzögerungszeit im Netz orientieren

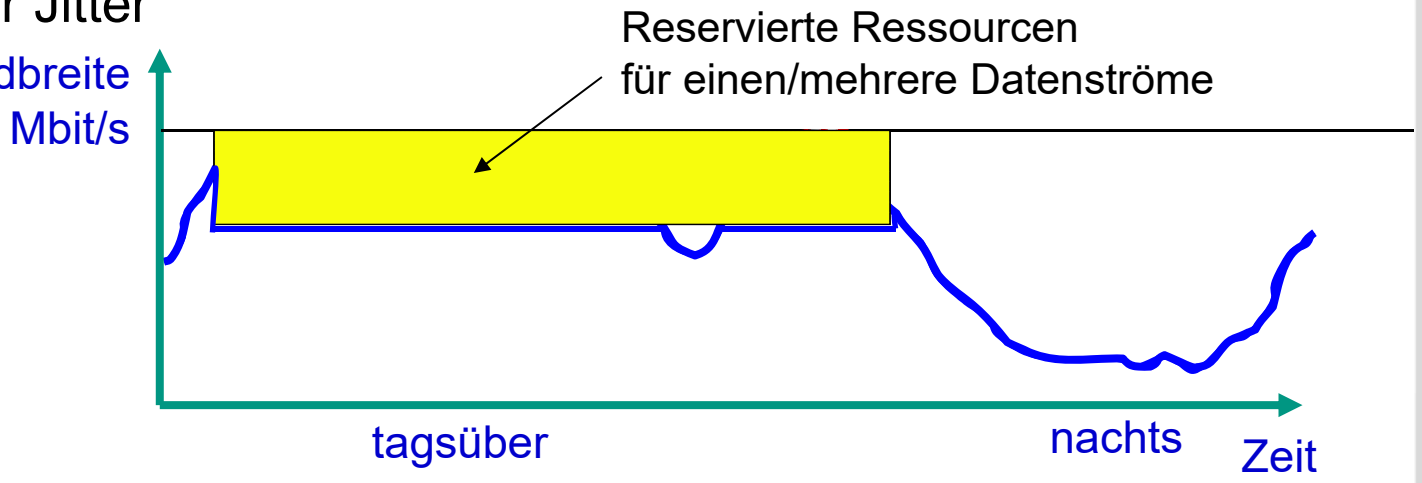
    - Ratenadaptivität: Videoanwendungen können z.B. Bitrate zugunsten der Qualität senken

Garantierte Dienste im Next Generation Internet

- Internet bietet derzeit keine garantierten Dienste
  - notwendig für Multimedia- und Echtzeit-Anwendungen
  - Erfolg der Paketweiterleitung abhängig von Netzlast
- Internet der nächsten Generation muss Dienstgüte anbieten
  - garantierte Bandbreiten
  - minimale Paketlaufzeiten
  - begrenzter Jitter

→ Quality of Service

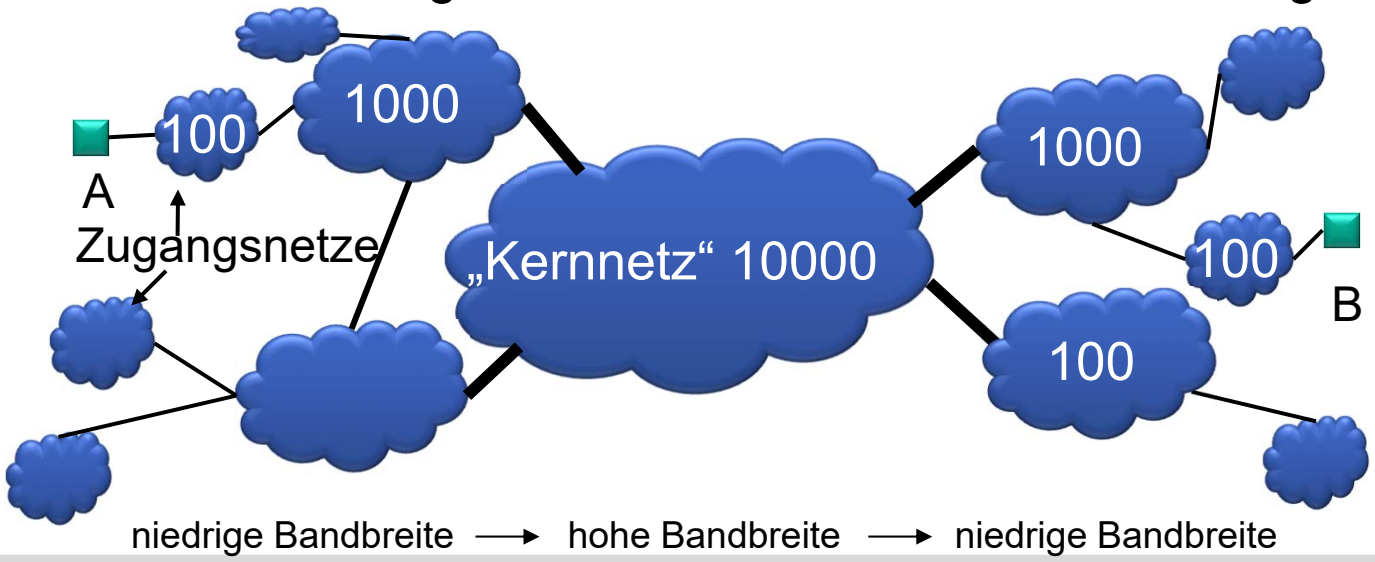
- Beispiel:



- Vorgehen:
  - Bereitstellung von Dienstqualität durch gezielte Ressourcenmangelverwaltung (z.B. Ressourcenreservierung)

Mythos „Over-Provisioning“

- „Over-Provisioning“: Last je Link meistens <50%
  → Kein Ressourcenmangel
- Übertragungskapazitätshierarchie vorhanden
  - Probleme
    - Verteilung (Verkehrsmatrix) für eingehenden Verkehr „unbekannt“
    - DDoS-Flooding für einzelne Anschlüsse immer möglich



Warteschlangen sind unvermeidbar

- Wenn man die Bandbreitenhierarchie wieder hinabsteigt
  - Pakete zwischenspeichern
  - Füllstand der Warteschlange variiert, Überlauf möglich
  - → Dienstgüte schwankt
- Wie groß sollte Pufferkapazität sein?
  - Antwort ist Anwendungs- und Situationsabhängig!
  - Größere Puffer erhöhen die Auslastung, aber erhöhen auch die Verzögerung, wenn sie gefüllt sind
  - Daumenregel empfiehlt eine Umlaufzeit, z.B. 250 ms
    - Häufig als Bandwidth Delay Product bezeichnet, korrekter wäre aber Bandwidth Round-Trip Time Product (gemeint ist $b_r \times RTT_{min}$, b_r=Bottleneck rate), z.B. bei b_r=1 Gbit/s und 250ms: 31,25 Mbyte
    - TCP-Durchsatz bricht weniger ein (z.B. bei Halbierung des Staukontrollfensters)
    - zu groß für hohe Geschwindigkeiten
  - Führt zu „Bufferbloat“-Problem

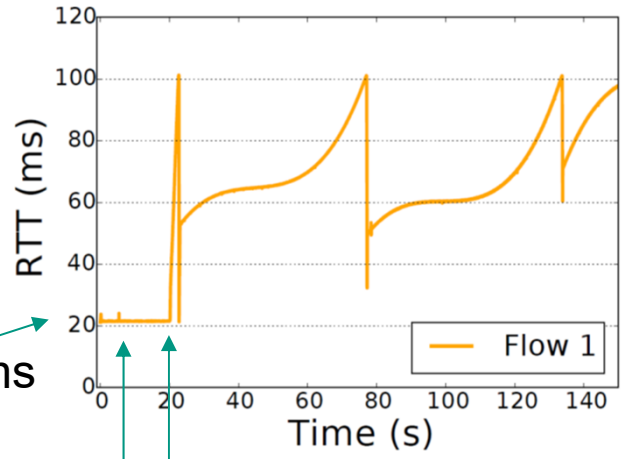
„Bufferbloat“-Ursachen (1)

[GeNi11]

- Speicher ist günstig, quasi überall vorhanden (Netzwerkkarte, OS, Switch, NAT, Router usw.)
  - Eventuell überdimensioniert (mehrfaches BRP)
- Einsatz statischer Puffer für stark schwankende Bandbreiten, z.B. WLAN oder DSL (1 – 300 Mbit/s)
  - 31,25 kByte – 9,375 Mbyte (bei 250ms RTT)
    → es wird die größte benötigte Kapazität bereitgestellt
  - RTTs sind aber individuell (hängen von der Distanz ab)
  - Es wird die gemittelte RTT angenommen

„Bufferbloat“-Ursachen (2)

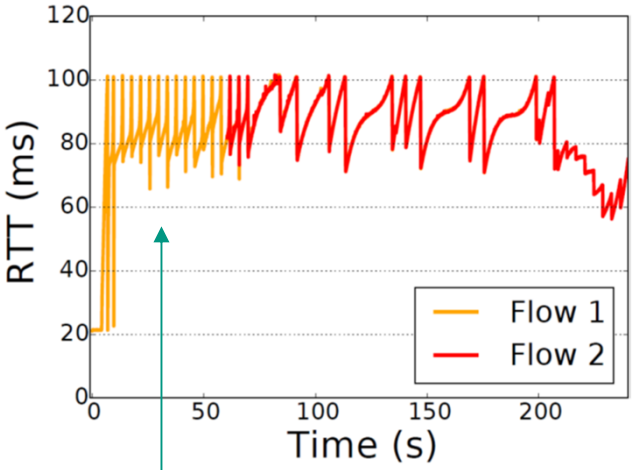
- Problem tritt nur bei Sättigung der Kapazität auf
  - Aber: verlustbasierte TCP-Staukontrolle füllt Puffer systematisch!
  - Standing Queue: Paketüberschuss verbleibt trotz Staukontrolle im Puffer



RTT_{MIN}=20ms

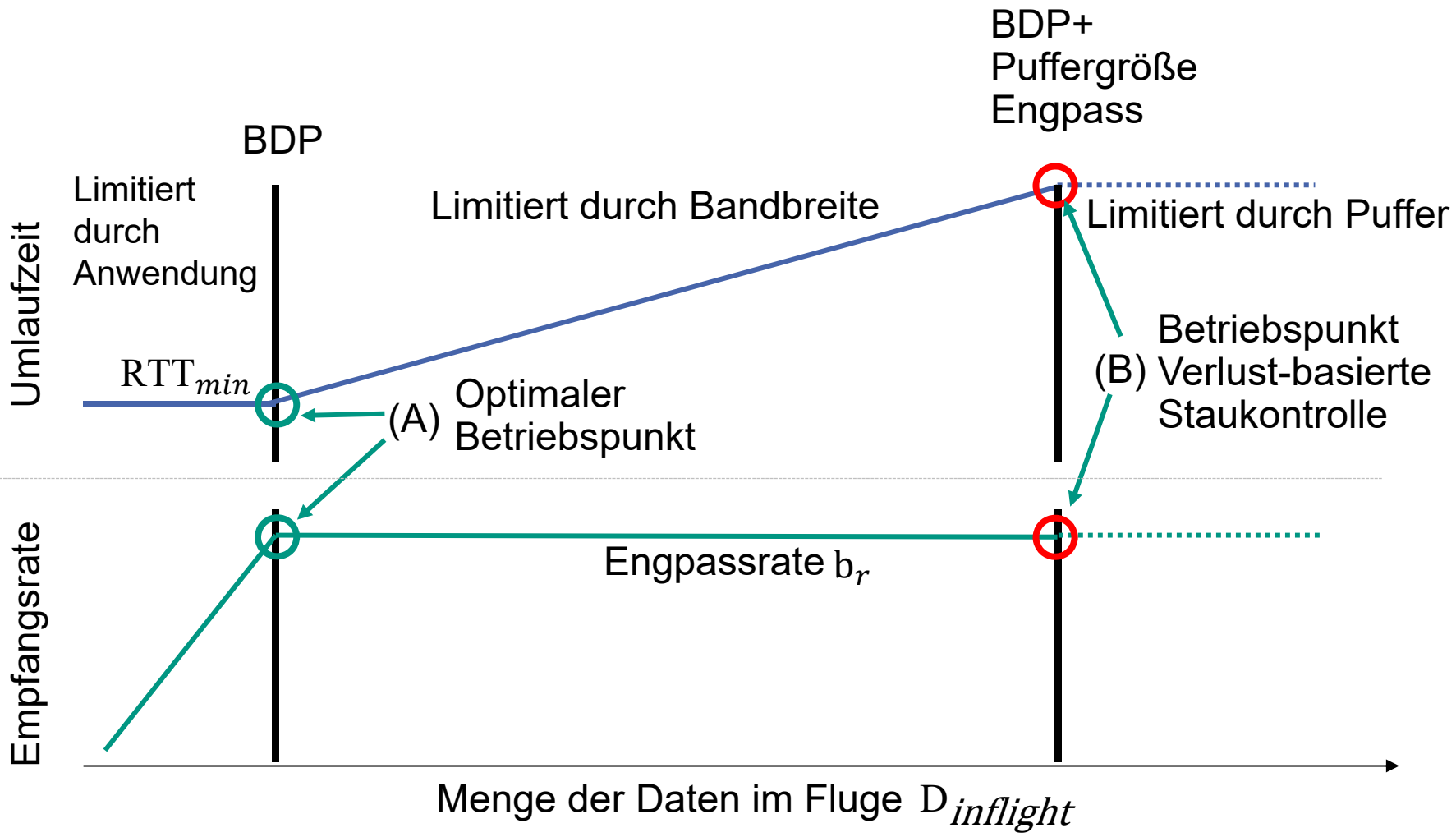
Kein Stau, 1 TCP-Datenstrom 10 Gbit/s

2. Datenstrom 10 Gbit/s startet → Stau



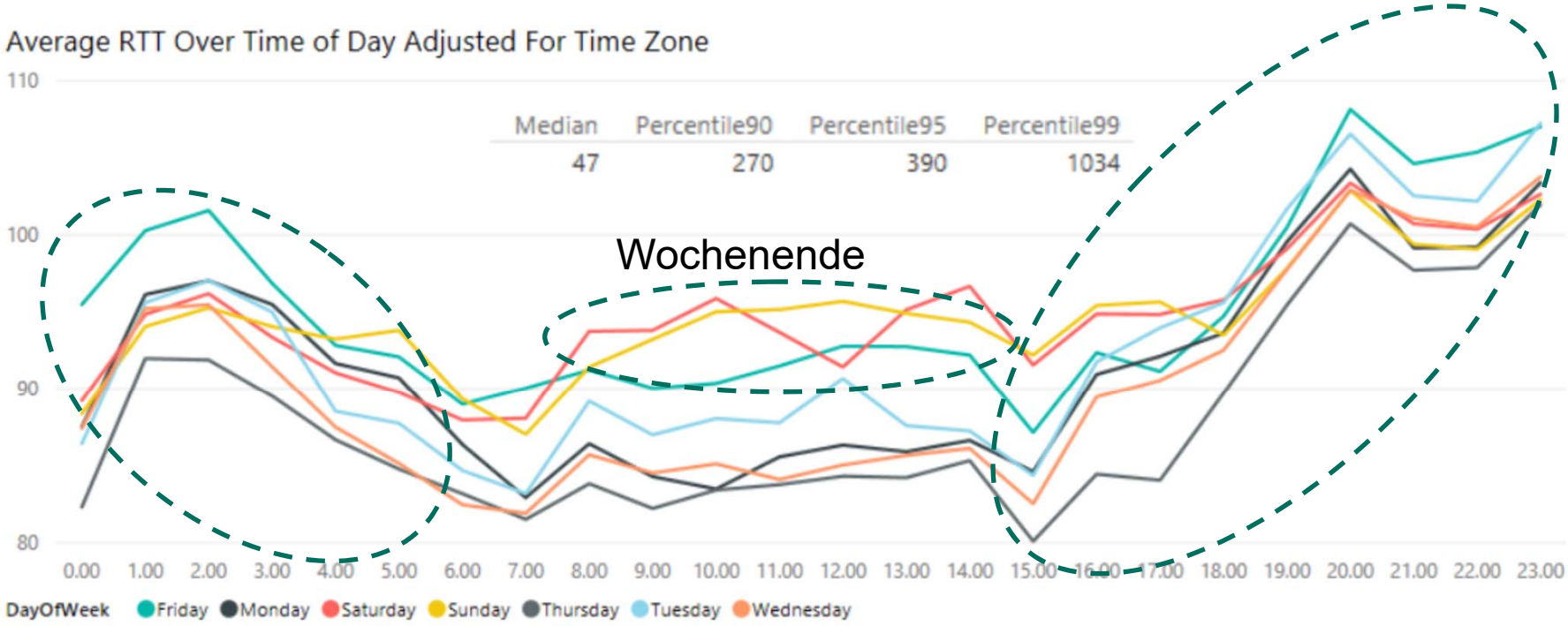
18 Datenströme, RTTs für zwei Datenströme gezeigt

Betriebspunkte Staukontrolle



Bufferbloat ist real!

- Messung von Microsoft (Desktop + Xbox)



Average SRTT information from sampled TCP connections for Windows Desktop and Xbox consoles

Quelle: https://www.ietf.org/proceedings/98/slides/slides-98-iccrg-reflections-on-congestion-control-00.pdf

Bufferbloat – Resümee

- Überdimensionierte Puffer
  - bis zu mehrere Sekunden RTT möglich!
  - TCP reagiert dann nicht mehr sinnvoll
  - Andere Datenströme, die den gleichen Puffer passieren, erfahren deutlich erhöhte Latenz
    → schlecht für interaktive Anwendungen

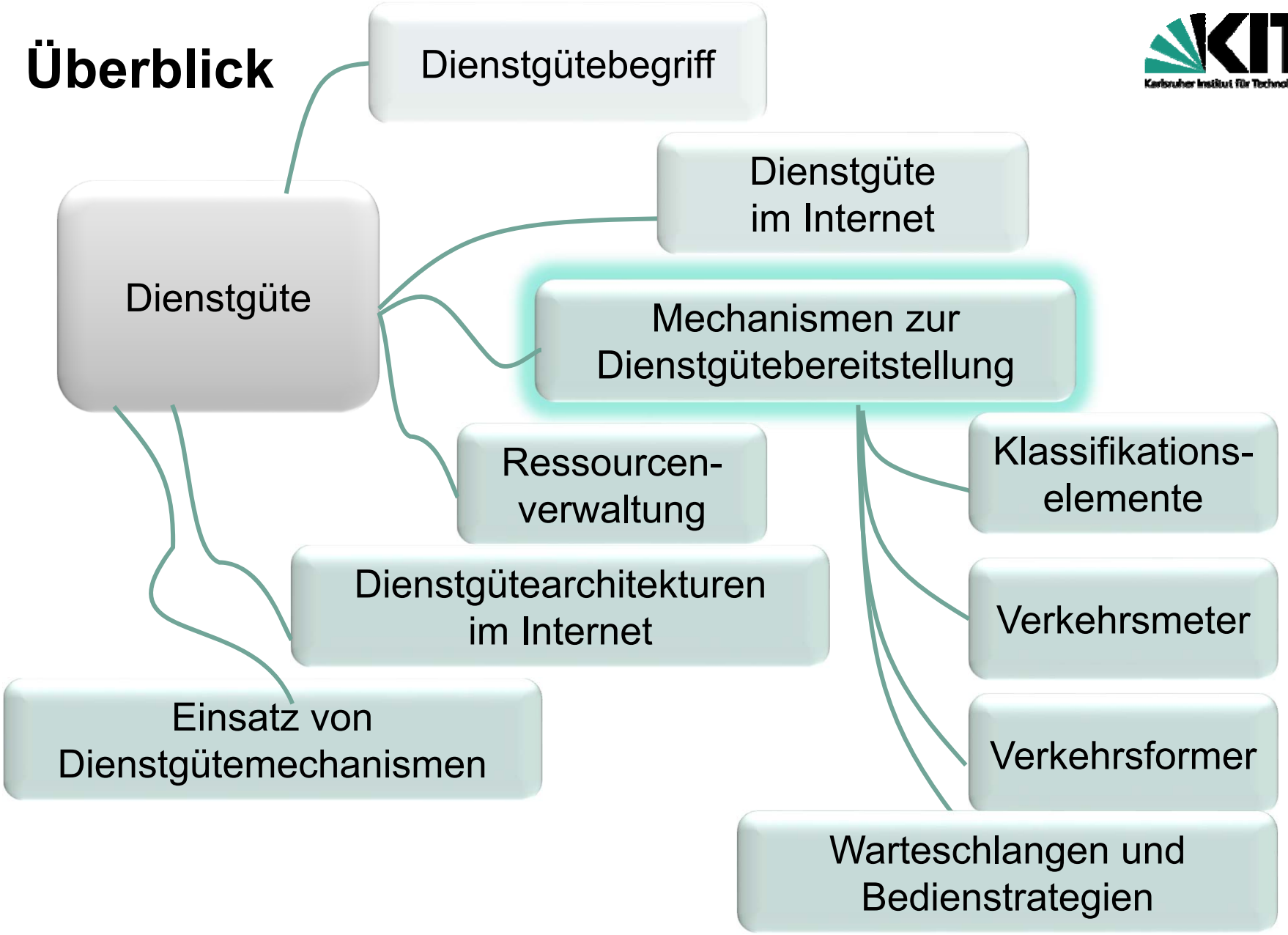
- Abhilfen:
  - aktives Warteschlangenmanagement  [NiJa12]
  - bessere Staukontrollverfahren
    - Ziel: Betriebspunkt (A)
    - Problem der Ko-Existenz von Delay-basierten und Verlust-basierten Staukontrollverfahren

Dienstgüteunterstützung?

Gegenargumente

- „Unendliche“ Bandbreite (echtes Over-Provisioning)
  - Teuer, DoS immer noch möglich
- Einfache Prioritäten sind ausreichend
  - gute Grundlage, aber alleine nicht ausreichend
- Adaptive Anwendungen
  - Adaptive Anwendungen können sich an die aktuellen Gegebenheiten im Netz anpassen
    - schon, aber nicht beliebig weit nach unten, z.B. gewisse Mindestqualität für Sprachcodec notwendig
  - mehr Intelligenz in den Anwendungen (klassisches E2E-Argument)
  - Aber: Basisdienste sind wichtig, z.B. hinsichtlich Verzögerungen

Überblick


Dienstgütebegriff
Dienstgüte
Dienstgüte im Internet
Mechanismen zur Dienstgütebereitstellung
Ressourcen-verwaltung
Klassifikations-elemente
Dienstgütearchitekturen im Internet
Verkehrsmeter
Einsatz von Dienstgütemechanismen
Verkehrsformer
Warteschlangen und Bedienstrategien

Mechanismen zur Dienstgütebereitstellung

- Was wird benötigt, um Dienstgüte zur Verfügung zu stellen?
- **Vor Ressourcennutzung:**

  Ressourcenbasierte **Zugangskontrolle** für Weiterleitungsklassen in der Kontrollebene (Ziel: Vermeidung von Überlast innerhalb einer Klasse)

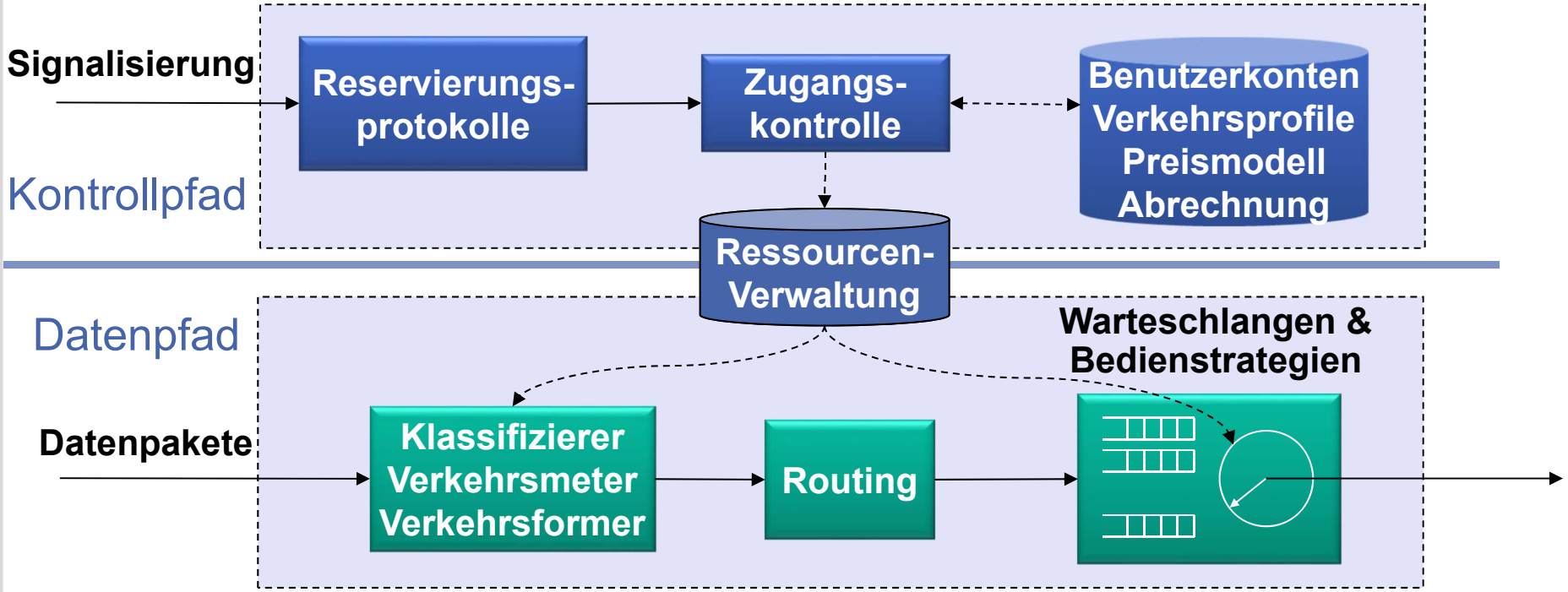
- **Während Ressourcennutzung:**

  Differenzierte Behandlung der Pakete im Datenpfad
  → Klassifizierung in „Weiterleitungsklassen“, Scheduling

  „**Policing**“, d.h. Überwachung der ankommenden Verkehrsmenge gemäß Verkehrsprofil, ggf. Beschränkung

Konzeptionelles Router-Modell

- Aufteilung der Funktionen in Kontroll-/Datenebenen



Verkehrsbeeinflussung

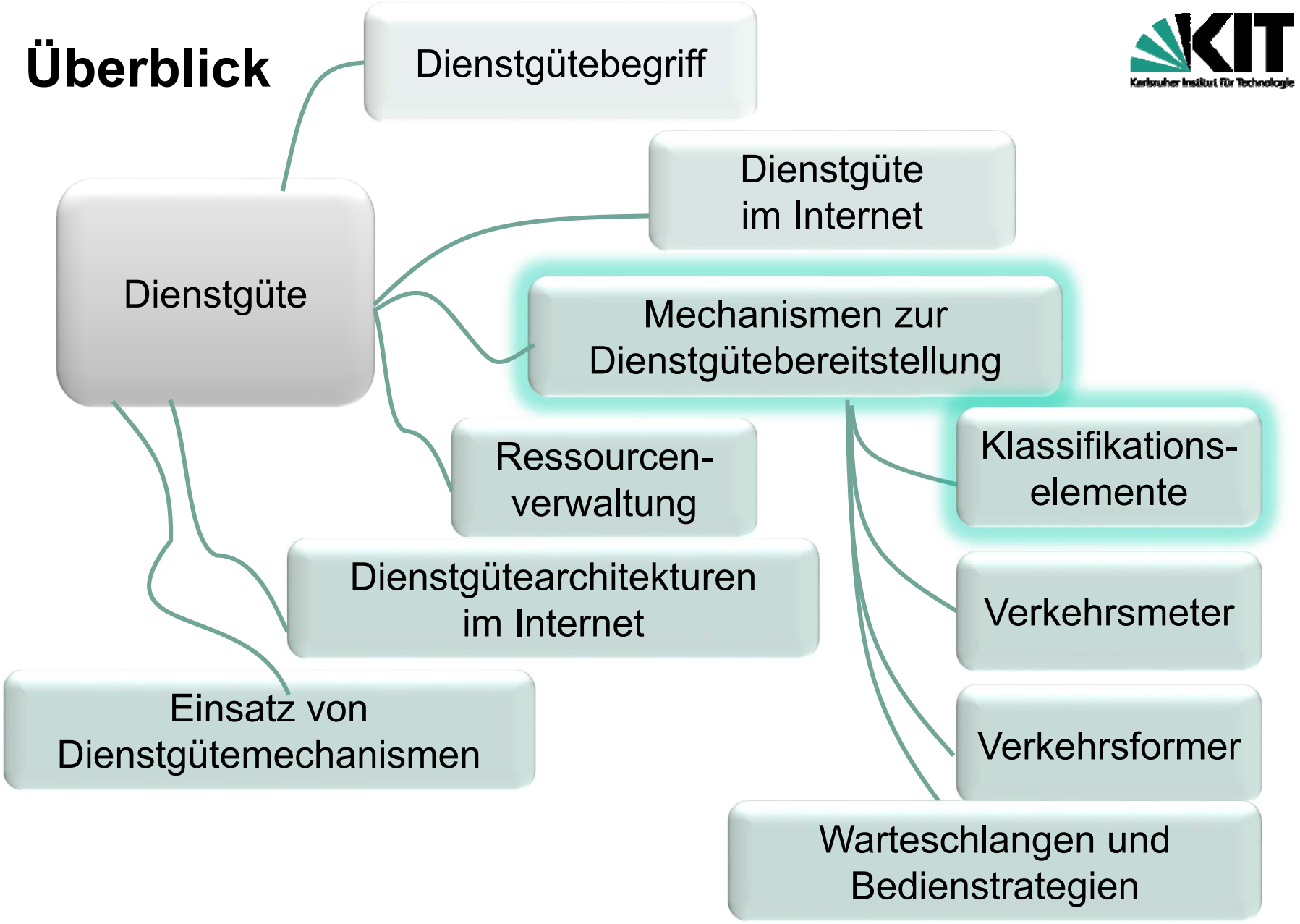
- Beispiel aus dem realen Leben: Verkehrsbeeinflussungsanlagen

- Verkehrsbeeinflussungsmechanismen im Netz
  - Klassifikationselemente
  - Verkehrsmeter
  - Verkehrsformer

Komponenten im Datenpfad

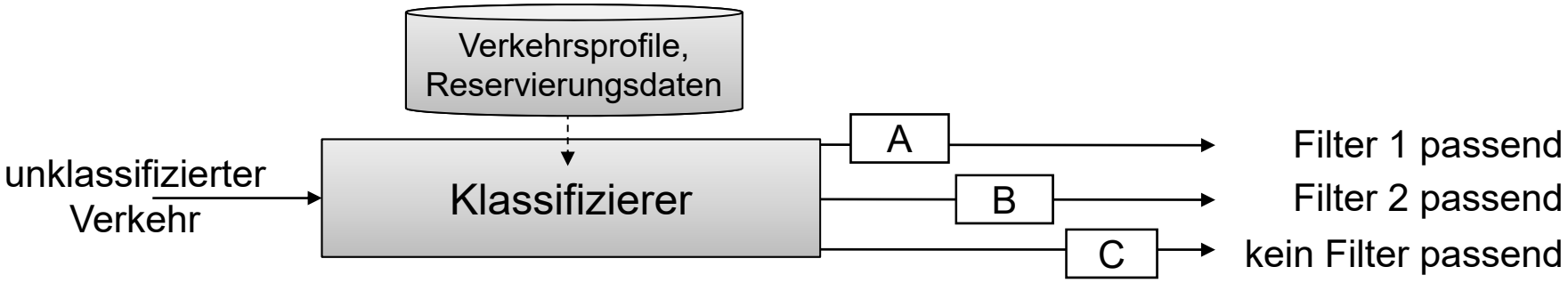
- Klassifikationselemente
  - Zuordnung von einzelnen Datenpaketen zu Datenströmen (Flows)
  - Datenströme: Einheiten auf denen Dienstgütemechanismen arbeiten
- Verkehrsmeter
  - Prüfen der Datenpakete auf Konformität zum im Verkehrsvertrag festgelegten Verkehrsprofil (Nutzungskontrolle)
- Verkehrsformer
  - Ändern der Charakteristik eines Datenstroms/Aggregats
  - Wiederherstellen von Konformität
- Warteschlangen
  - Unterschiedliche Behandlung von Datenströmen
- Bedienstrategien für Warteschlangen
  - Zuteilung der Ressourcen (z. B. Bandbreite, Rechenzeit, Speicher) durch Scheduler

Überblick


Dienstgütebegriff
Dienstgüte
Dienstgüte im Internet
Mechanismen zur Dienstgütebereitstellung
Ressourcen-verwaltung
Klassifikations-elemente
Dienstgütearchitekturen im Internet
Verkehrsmeter
Einsatz von Dienstgütemechanismen
Verkehrsformer
Warteschlangen und Bedienstrategien

Klassifikationselemente

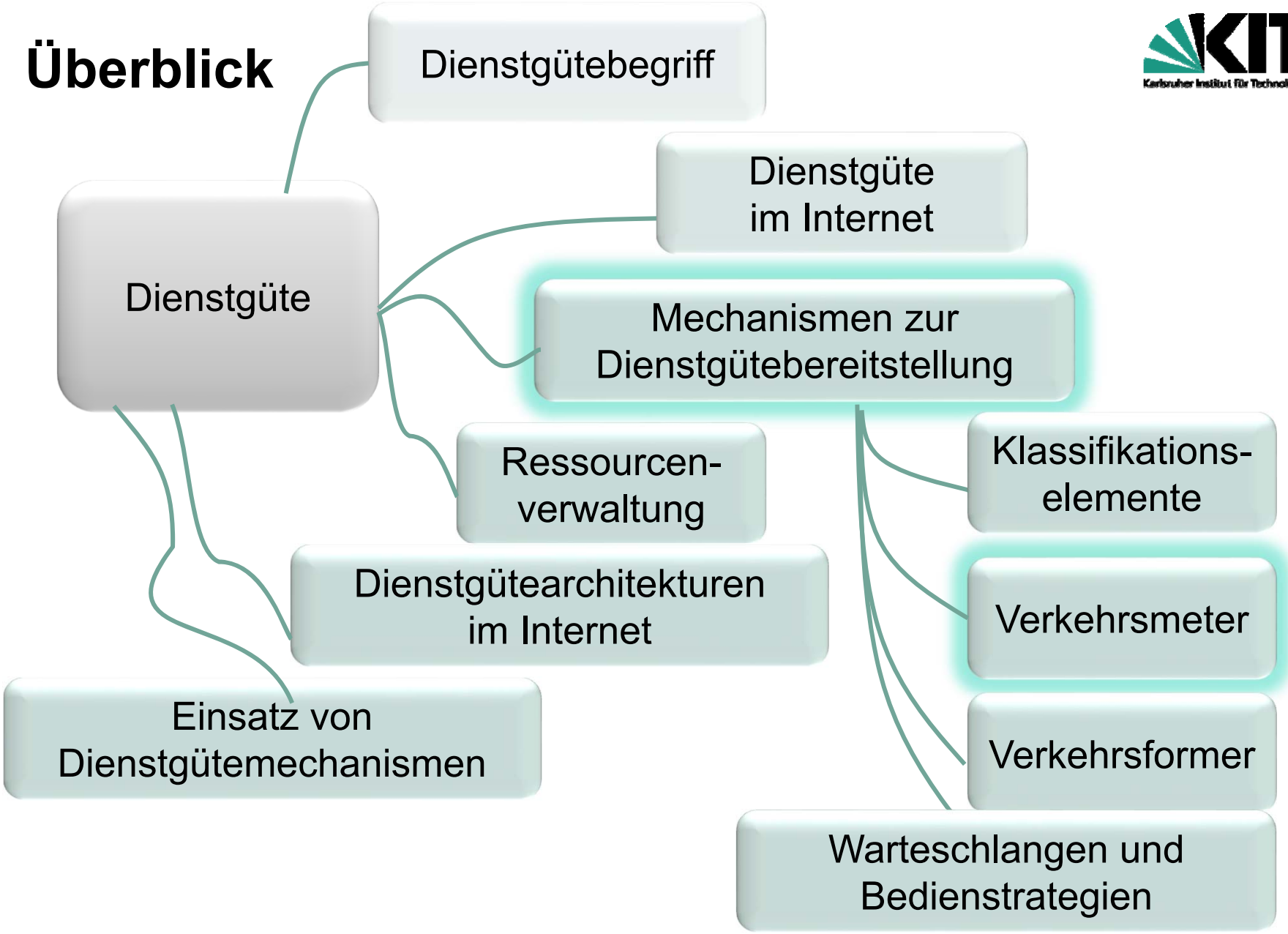
- Klassifizierer identifizieren Datenströme aus der Menge aller Pakete
  - Voraussetzung für differenzierte Behandlung
  - Zuordnung: Paket → Verkehrsprofil
  - Verkehrsprofil: wird für Policing benötigt und enthält z.B. erlaubte Parameter für Verkehrsmeter



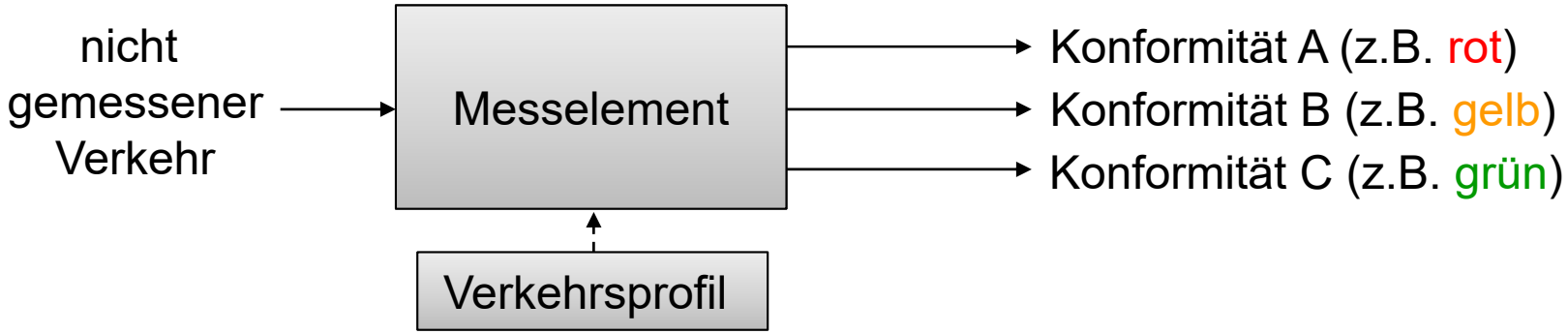
Klassifizierer

- Arten von Klassifizierern:
  - Klassifizierer für mehrere Paketkopffelder (Multi-Field Classifier)
    - Kombination eines oder mehrerer Paketkopffelder bspw. IP-Adressen, IP-Protokollfeld, Port-Nummern bei TCP/UDP-Paketen (müssen zugänglich sein)
    - IPv6: Flow Label, IP-Quell-, IP-Ziel-Adresse
    - sehr komplizierte und aufwändige Klassifikation (viele Verfahren, aber kein perfektes)
  - Klassifizierer für aggregiertes Verhalten (Aggregate Classifier)
    - viele Datenströme erfahren das gleiche Verhalten (Behavior Aggregate)
    - bspw.: DS (DiffServ) Codepoint im Paket
    - sehr einfache und schnelle Klassifikation (= Zugriff auf Array)
  - Klassifizierung nach Eingangs-Interface
- Klassifikationsinformationen stehen in Datenbasis

Überblick


Dienstgütebegriff
Dienstgüte
Dienstgüte im Internet
Mechanismen zur Dienstgütebereitstellung
Ressourcen-verwaltung
Klassifikations-elemente
Dienstgütearchitekturen im Internet
Verkehrsmeter
Einsatz von Dienstgütemechanismen
Verkehrsformer
Warteschlangen und Bedienstrategien

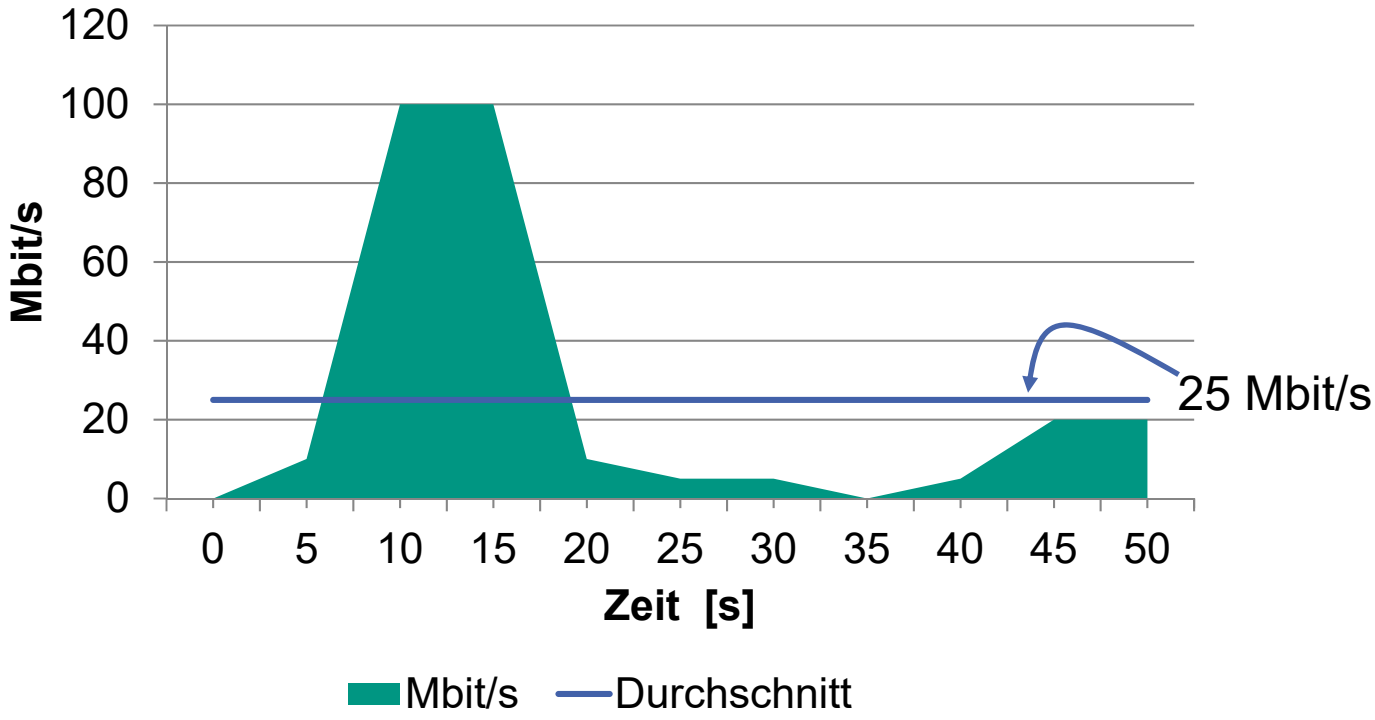
Verkehrsmeter



- Verkehrsmeter begutachten Datenströme:
  - Überprüfen der Konformität mit Verkehrsvertrag, keine Beeinflussung des Verkehrs
  - Eingabe:
    - Verkehrsprofil (Datenstrom, Dienstgüteparameter, Dienstklasse)
  - Ausgabe:
    - konform, nicht-konform
    - mehrere Konformitätsklassen (0, .., n) oder (rot, gelb, grün)
  - Beispiele:
    - Average Rate Meter (Moving Window)
    - Token Bucket (überprüft Rate und Burst)

Average Rage Meter

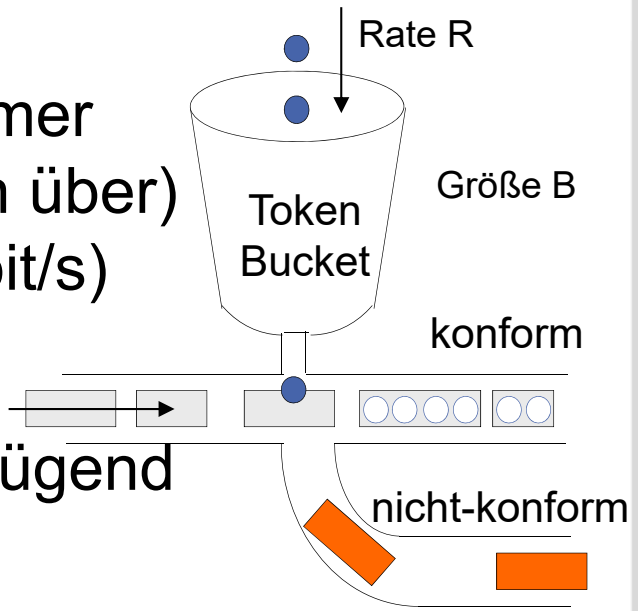
- Durchschnittliche Rate über Zeitintervall Δt, Wahl von Δt?



- Fenster von Δt bewegt sich gleitend vorwärts
- Burstartigkeit wird nicht gut berücksichtigt

Verkehrsmeter: Token Bucket

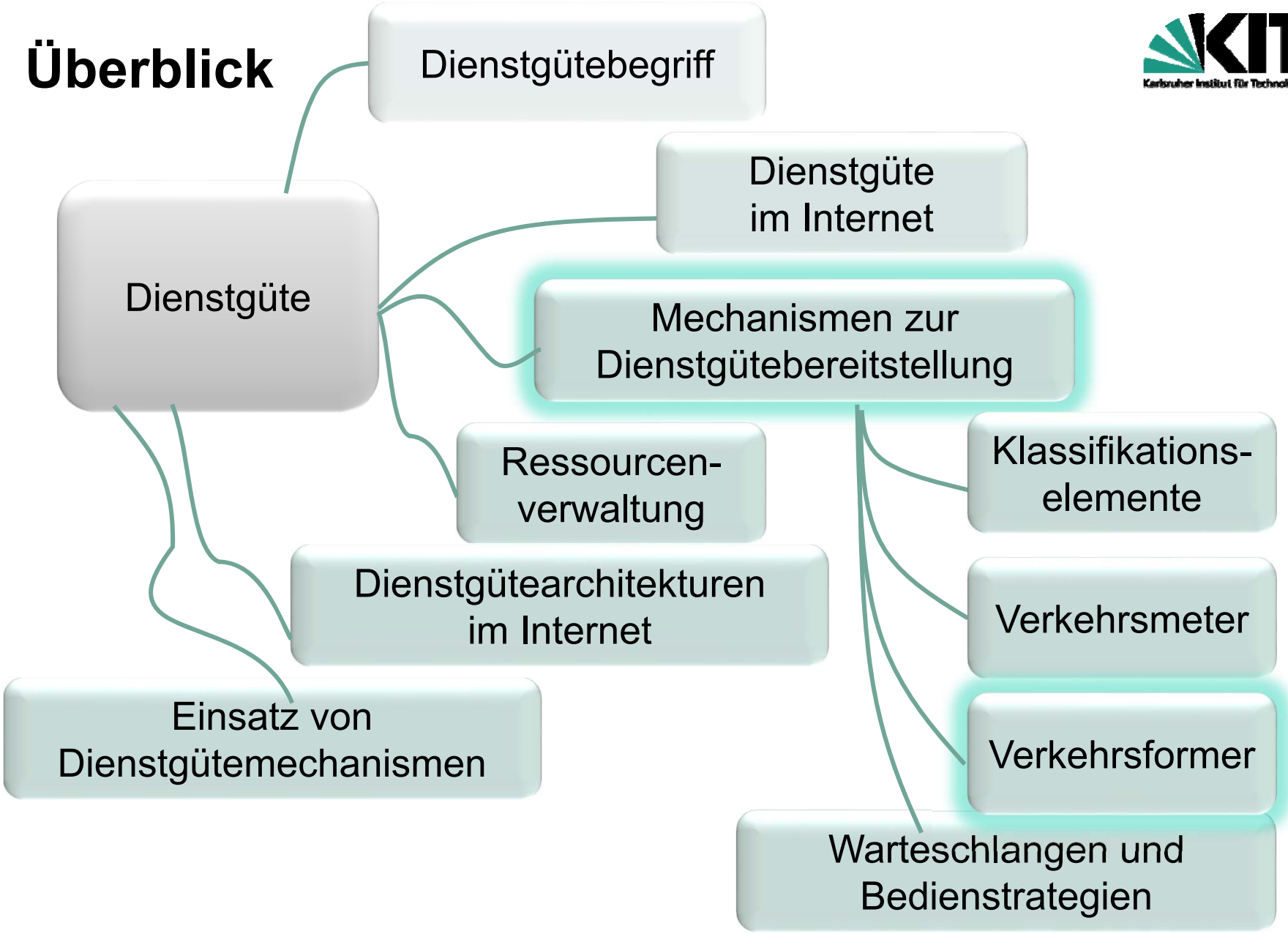
- Eimer mit Größe B Token (Senderechte)
- Token „tröpfeln“ mit der Rate R in den Eimer
- maximal B Token im Eimer (Token laufen über)
- überwacht die Einhaltung einer Rate R (bit/s) mit einer Toleranz (Burst) B (byte)
- Pakete werden als konform markiert, wenn bei Ankunft eines Pakets noch genügend Token im Eimer vorhanden sind (oft: 1 Byte = 1 Token)
  - Strenge Variante: für Paket mit Länge L müssen mindestens L Token vorhanden sein
  - Lockere Variante: Bucket muss mindestens ein Token enthalten, fehlende Tokens werden im Voraus geborgt (Tokenstand wird negativ)
- Andernfalls wird ein ankommendes Paket als nicht-konform markiert



Verkehrsbeschreibung

- Token Buckets können als Grundlage zur mathematisch vollständigen Modellierung des erzeugten Verkehrs dienen  [RFC2210, RFC2215]
  - Token Rate r (mittlere Rate), Bucket Tiefe b
  - Peak rate p: evtl. maximale Verkehrsgenerierungsrate, max. physikalische Rate, oder unendlich
  - Minimum policed unit m: Größe des kleinsten Pakets, das durch die Anwendung generiert wird.
    - maximale Paket-Rate kann durch b und m berechnet werden
    - Berechnung des maximalen zusätzlichen Bandbreitenaufwands, um Pakete über bestimmte Link-Layer-Technik zu übertragen, mit Hilfe des Verhältnisses der Link-Layer-Kopfgröße zu m
  - Maximum packet size M: größtes konformes Paket (größere Pakete werden als nicht konform betrachtet)

Überblick


Dienstgütebegriff
Dienstgüte
Dienstgüte im Internet
Mechanismen zur Dienstgütebereitstellung
Ressourcen-verwaltung
Klassifikations-elemente
Dienstgütearchitekturen im Internet
Verkehrsmeter
Einsatz von Dienstgütemechanismen
Verkehrsformer
Warteschlangen und Bedienstrategien

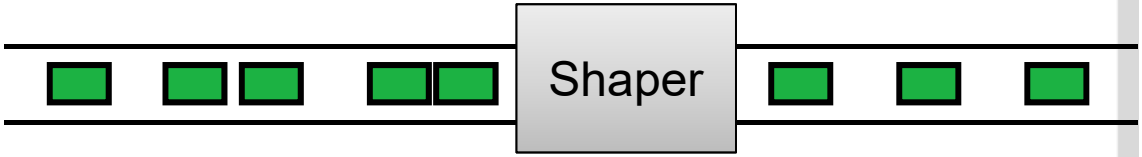
Verkehrsformer

- Verkehrsformer beeinflussen aktiv die Charakteristik des Verkehrs:
  - Ziel: Wiederherstellung von Konformität bzw. eines bestimmten Verkehrsmusters

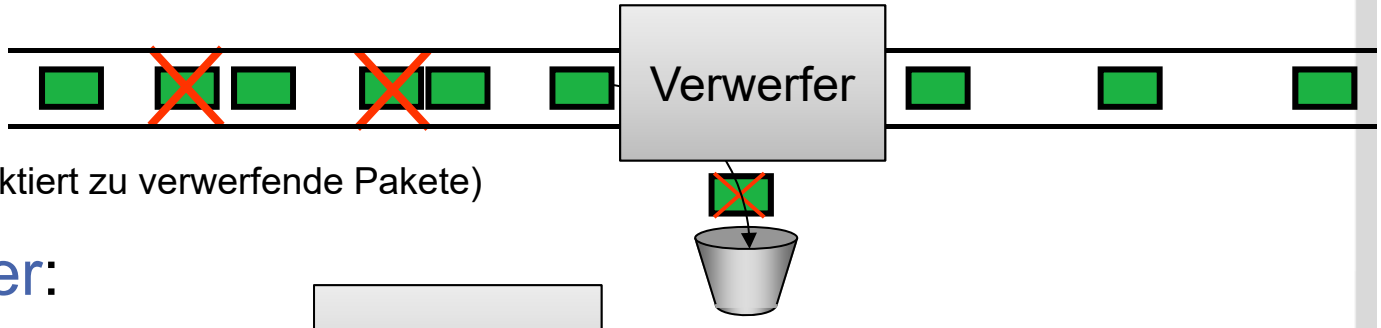
Beispiele:

- Verkehrsglätter:

(glättet alle Pakete eines Datenstroms)



- Verwerfer:



(selektiert zu verwerfende Pakete)

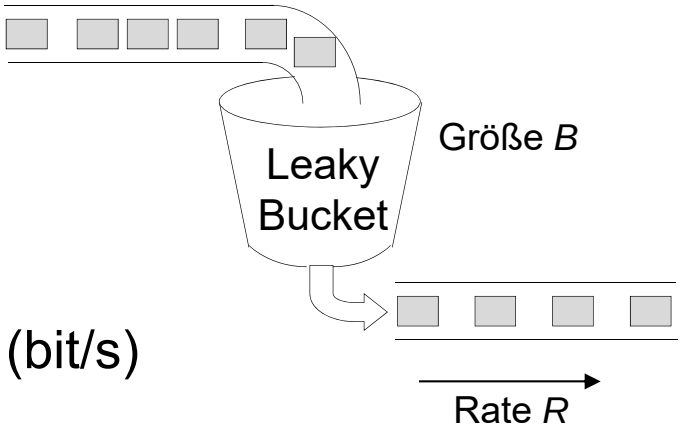
- Degradierer:

(selektiert zu degradierende Pakete)

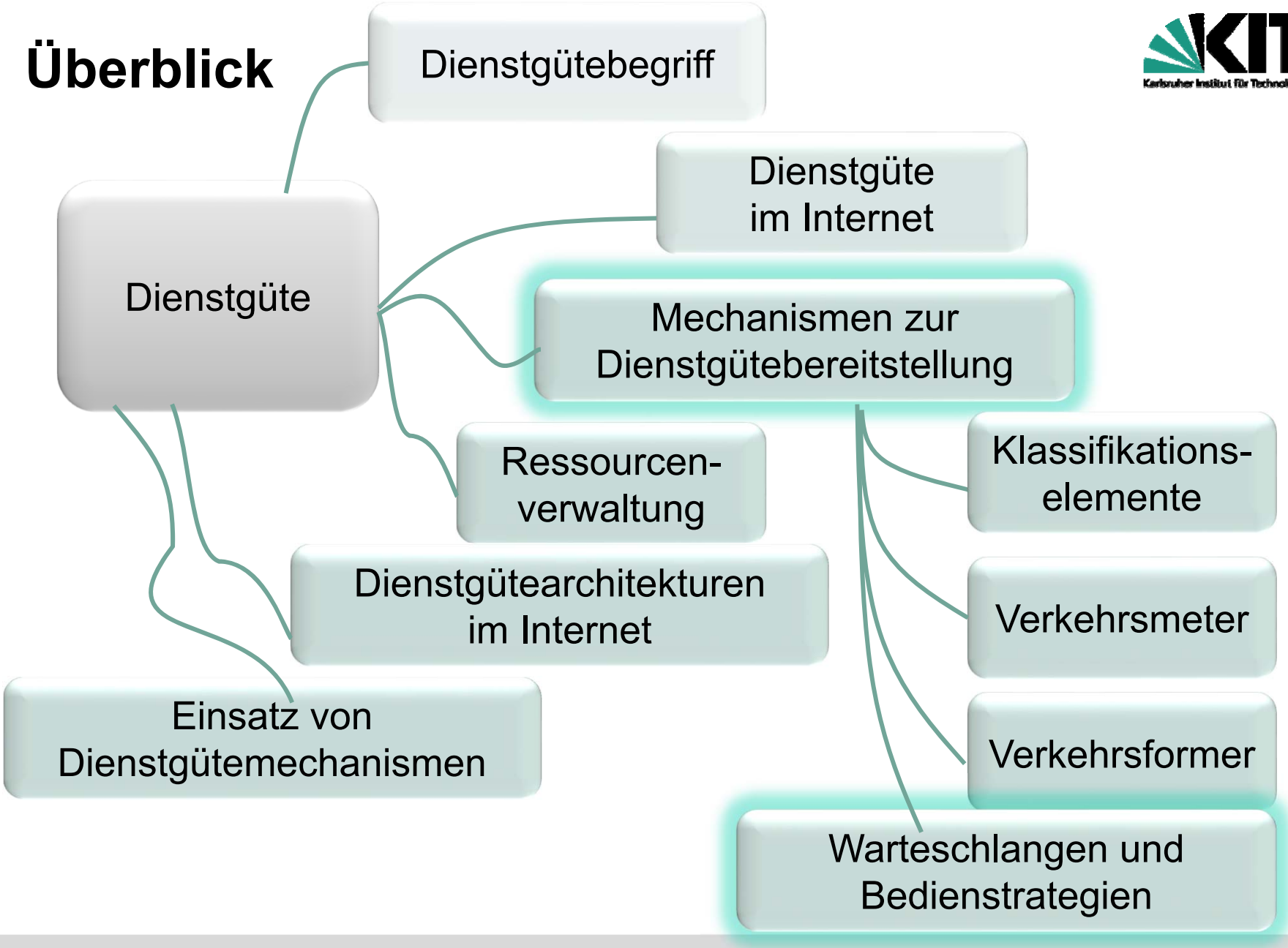
  - ordnet dem Datenstrom eine niedrigere Dienstkategorie zu

Verkehrsmeter und -former: Leaky Bucket

- Leaky-Bucket:
  - Eimer mit Größe B byte
  - Pakete werden in den Eimer gepackt und „tröpfeln“ mit der Rate R aus dem Eimer heraus (rinnender Eimer)
  - max. B byte im Eimer
  - überwacht die Einhaltung einer Rate R (bit/s) mit einer Toleranz (Burst) B (byte)
  - glättet den Ausgangsstrom auf die Rate R
  - Ein Paket der Größe L wird gesendet, wenn L byte aus dem Eimer getropft sind
  - Hat ein neu eintreffendes Paket keinen Platz mehr im Eimer, wird es verworfen, bzw. unterschiedlich behandelt
  - Pakete im Eimer werden so lange verzögert, bis das Senden konform zur Rate ist (zusätzliche Verzögerung evtl. auch von Nachteil!)

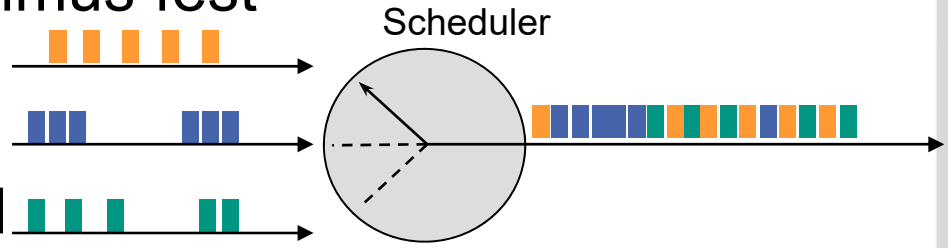


Überblick


Dienstgütebegriff
Dienstgüte
Dienstgüte im Internet
Mechanismen zur Dienstgütebereitstellung
Ressourcen-verwaltung
Klassifikations-elemente
Dienstgütearchitekturen im Internet
Verkehrsmeter
Einsatz von Dienstgütemechanismen
Verkehrsformer
Warteschlangen und Bedienstrategien

Warteschlangen und Bedienstrategien

- Warteschlangen speichern Pakete:
  - wie sie ankommen (FIFO - First In First Out)
  - nach zeitlicher Dringlichkeit (EDF - Earliest Deadline First)
  - nach Priorität (=verschiedene logische Warteschlangen)
- Bedienstrategien (Scheduling Algorithmen) bestimmen die nächste zu bedienende Warteschlange bzw. das nächste zu bedienende Paket:
  - Legt die Reihenfolge der exklusiven Ressourcennutzung (Übertragungszeit, CPU-Zeit, Speicher) abhängig von einem Scheduling-Algorithmus fest
  - Scheduler sind in allen Schichten erforderlich, in denen gemultiplext wird



Eigenschaften Scheduler

- Ressourcenzuteilung durch Scheduler kann
  - fair erfolgen
    - Definition von fair?
    - n Datenströme teilen sich Linkkapazität C Mbit/s
      → vereinfacht: jeder Datenstrom bekommt C/n Mbit/s im Mittel
    - Erzwingen von „Flowrate-Fairness“ durch das Netz
    - Sinnvoll für Best-Effort-Klasse
  - unfair erfolgen
    - Zwecks gezielter Bevorzugung bestimmter Datenströme
    - Oft durch Gewichtung realisiert
    - Sinnvoll für differenzierte Behandlung und Dienstgütegarantien

Beispiele für Bedienstrategien

- Round Robin (Reihum-Auswahl):
  alle nacheinander – keiner wird bevorzugt
- Simple Priority Queueing/Strict Priority Queueing:
  - ermittle Warteschlange höchster Priorität mit wartenden Anforderungen
  - bediene das wartende Paket dieser Warteschlange
  - führt zu permanenter Bevorzugung der hochprioren Warteschlange (wenn dort Anforderungen vorliegen)

- Weighted Fair Queueing:
  - Round Robin mit Gewichtung
  - Warteschlange mit hohem Gewicht wird öfter bedient

Scheduling-Algorithmen: Anforderungen und Eigenschaften

- Anforderungen
  - Einfache Implementierung
    - Nur wenig Zeit zur Bearbeitung bei Gbit/s
    - Zeitkomplexität möglichst $O(1)$, nicht $O(n)$, wobei n=Anzahl Datenströme
    - geringer Speicherbedarf
  - Fairness (für Best-Effort-Dienste)
    → wenn Kriterium „Max-min Fair Share“ erfüllt
  - Absicherung (gegen sich fehlverhaltende Datenströme)
- Eigenschaften
  - Arbeitserhaltend / Nicht-arbeitserhaltend
  - Verdrängend / Nicht-verdrängend
  - Leistungsgarantien

Max-min Fair Share (1)

- Formale Definition
  - Ressourcen werden gemäß steigenden Anforderungen zugeteilt
  - Keine Anforderung erhält mehr Ressourcen als benötigt
  - Anforderungen, die ungenügend bedient werden, erhalten gleichen Anteil an noch verfügbaren Ressourcen
- Vorgehensweise
  - Menge von Quellen $1, ..., n$ mit Ressourcenanforderungen $x_1, ..., x_n$. Die Anforderungen seien so angeordnet, dass gilt: $x_1 \leq x_2 \leq ... \leq x_n$
  - Der Server habe eine Kapazität C.
    Dann erhält x_1 den Anteil C/n zugeteilt.

Max-min Fair Share (2)

- Dieser Anteil kann mehr sein als tatsächlich benötigt wird. In einem solchen Fall steht $C/n - x_1$ als ungenutzte Ressource weiter zur Verfügung und wird auf die weiteren Anforderungen gleichmäßig aufgeteilt: Jede Quelle erhält $C/n + (C/n - x_1)/(n-1)$.
  Dies setzt sich solange fort, bis eine Anforderung nicht vollständig erfüllt werden kann.
- Ergebnis
  - Keine Anforderung erhält mehr als benötigt
  - Falls Anforderung nicht erfüllbar, erhält jede gleichen Anteil
  - Maximiert minimalen Anteil der Quellen, deren Forderung nicht vollständig erfüllt werden konnte
- Erweiterung: Einführung von Gewichten

Beispiel: Max-min Fair Share

- Aufgabe
  - Berechnen Sie die Allokation von Ressourcen gemäß Max-min Fair Share für vier Anforderungen von je 2, 2.6, 4 und 5 Anteilen einer Ressource der Kapazität 10
- Lösung
  - Vorgehen in mehreren Runden
  - Erste Runde
    - Aufteilen der Ressource in vier Teile à 2.5
    - Rest von 0.5 für die nächste Runde
  - Zweite Runde
    - ….

Conservation Law (1)

- Falls ein Scheduler **Work-Conserving** (arbeitserhaltend) ist, gilt folgendes
  - Die Summe der mittleren Warteschlangenverzögerungen einer Menge gemultiplexter Datenströme, gewichtet mit ihrem jeweiligen Anteil an der Last, ist unabhängig vom Scheduling-Algorithmus.
  - Work-Conserving-Eigenschaft:
    - Ein Scheduler ist nur dann im Leerlauf, wenn sich keine Anforderungen in der Warteschlange bzw. den Warteschlangen befinden.

Conservation Law (2)

- Formal
  - N Datenströme, jeweils mit einer mittleren Datenrate von λ_i und einer mittleren Bedienzeit pro Dateneinheit von x_i. Die mittlere Auslastung des Übertragungsabschnitts durch Datenstrom i ergibt sich als: $\rho_i = \lambda_i x_i$
    Sei q_i die mittlere Wartezeit am Scheduler, dann besagt das Conservation Law das folgende: $\sum_{i=1}^{N} \rho_i q_i = \text{Constant}$
- Folge: Scheduler kann die mittlere Warteschlangenverzögerung eines Datenstroms im Vergleich zum FIFO-Algorithmus nur zu Lasten anderer Datenströme reduzieren

Verdrängung

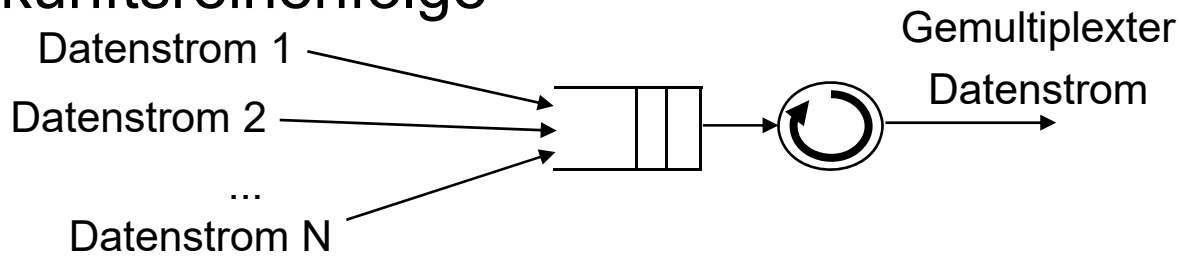
- Verdrängende Bedienstrategie:
  gerade bediente Anforderung wird sofort zu Gunsten einer anderen Anforderung unterbrochen und verdrängt
- Nicht-Verdrängend: Anforderung wird zuerst fertig bedient
- Verdrängung macht für paketbasierte Netze selten Sinn: gerade begonnenes Paket wird zuerst vollständig bedient
- Folge: für hochpriore Dienste ist Jitter von mindestens einer Paketzeit unvermeidbar

Beispiele zur Bedienreihenfolge

- Bedienreihenfolge für Best-Effort-Dienste
  - First In First Out (FIFO)
  - Generalized Processor Sharing (GPS)
  - Round Robin (RR)
  - Fair Queueing
- Bedienreihenfolge bei Dienstgarantien
  - Simple Priority Queueing
  - Weighted Round Robin (eingeschränkt)
  - Weighted Fair Queueing (WFQ)
  - Earliest Deadline First (EDF) / Earliest Due Date (EDD)
  - Deficit Round Robin

FCFS-Scheduling (1)

- FCFS (First-Come-First-Served) Strategie
  - Betrachtung nur einer Ausgangs-Warteschlange: FIFO-Queue (First-In-First-Out)
  - Bearbeitung der Dateneinheiten (oder Anforderungen) in Ankunftsreihenfolge



  - Ist kein Pufferplatz mehr frei, so werden neue Dateneinheiten verworfen („Tail-Drop“)
    - Verantwortung für Staukontrolle wird zu den Endsystemen verschoben
- Vorteil
  - Einfach zu implementieren

FCFS-Scheduling (2)

- Nachteil
  - Kann nicht zwischen verschiedenen Datenströmen unterscheiden → Nicht möglich, einzelnen Verbindungen unterschiedliche Verzögerung zuzuordnen
  - Datenströme mit langen Dateneinheiten erhalten besseren Service
  - „Gierige“ Verbindungen beeinflussen andere
- FCFS und Prioritäten
  - Warteschlangen mit unterschiedlichen Prioritäten. Innerhalb einer Warteschlange: FCFS-Scheduling
  - Höchste Priorität wird stets zuerst bedient (Simple Priority Scheduling oder Strict Priority Scheduling)
    - Keine definitive Zuordnung einer Verzögerung für einzelne Datenströme möglich

Generalized Processor Sharing (GPS)

- Ziel bei Best-Effort-Diensten
  - Erzielung von „Max-min Fair Share“, d.h. Fairness
- Generalized Processor Sharing (GPS)
  - Ideales, Work Conserving Scheduling. Nicht implementierbar.
  - Restbandbreite wird fair zwischen konkurrierenden Datenströme aufgeteilt
- Vorgehen
  - Dateneinheiten werden unterschiedlichen Warteschlangen zugeordnet
  - Jede nicht leere Warteschlange wird regelmäßig besucht und eine unendlich kleine Menge der Dateneinheit bedient (unmöglich in der Praxis)
  - In jeder endlichen Zeit können damit alle Warteschlangen besucht werden

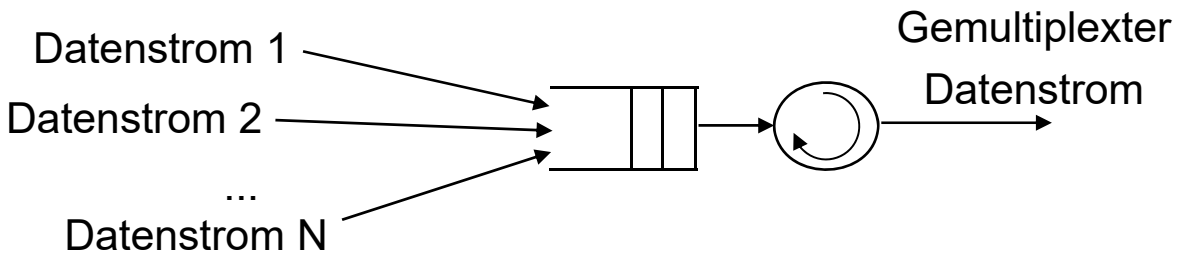
GPS formal betrachtet

- Formal
  - Datenstrom i erhält ein Gewicht $\phi(i)$
  - Server bedient $\Sigma(i, \tau, t)$ Daten des i-ten Datenstroms im Intervall $[\tau, t]$
  - Für alle anderen Datenströme j, die ebenfalls Daten zu bedienen haben, gilt:

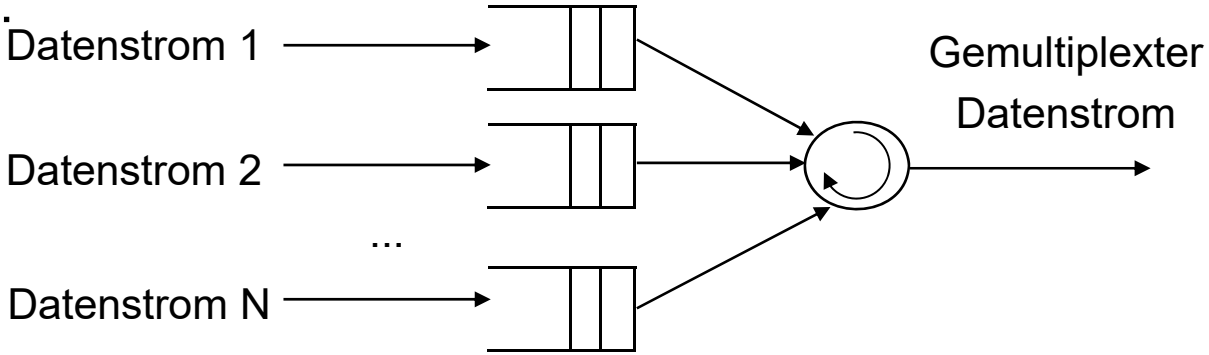
$$\frac{\Sigma(i,\tau,t)}{\Sigma(j,\tau,t)} \geq \frac{\phi(i)}{\phi(j)}$$

Round-Robin-Scheduling

- Vorgehen
  - Bedient in einer Runde eine Dateneinheit jeder nicht leeren Warteschlange (Reihumverfahren)
  - Emuliert GPS gut, wenn alle Datenströme gleiche Gewichte haben und die Dateneinheiten alle gleich lang sind
- FIFO versus Round-Robin
  - FIFO: Zeitpunkt der Ankunft entscheidet



  - Round-Robin: Reihum



Weighted Round-Robin (WRR)

- Berücksichtigt Gewichte der Datenströme
- Unfair, wenn Pakete unterschiedliche Länge besitzen oder Gewichte verschieden (oft beabsichtigt)
- Bei fester Paketgröße: es werden, dem Gewicht entsprechend, mehrere Pakete eines Datenstroms je Runde bedient. Gewichte werden auf Ganzzahlen normalisiert.
- Vorteil
  - Verkehr einer unfairen Quelle belastet andere Datenströme nicht
- Probleme
  - Verschieden lange Dateneinheiten

Fair Queueing (1)

- Approximation eines „Bit-für-Bit“-Round-Robin
  - Ermitteln des Zeitpunktes, zu dem das Senden einer Dateneinheit mit einem Bit-für-Bit Round-Robin theoretisch beendet wäre (Endezeit);
    Pakete werden dann in Reihenfolge ihrer virtuellen Endezeit bedient
- Vorgehensweise
  - Eine Rundenzahl wird bestimmt, welche die Anzahl der Bit-für-Bit-Runden angibt, die zu einem gegebenen Zeitpunkt beendet sind
    - Jede Runde nimmt eine variable (reale) Zeitspanne in Anspruch
    - Trifft Paket der Länge D auf
      - leere Warteschlange (inaktiver Datenstrom) bei Rundenzahl R, so ist seine Endezeit $R+D$
      - volle Warteschlange (aktiver Datenstrom), so ist seine Endezeit $F+D$, wenn F die Rundenzahl des vorhergehenden Pakets bezeichnet

Fair Queueing (2)

- Ist die Rundenzahl bekannt, so kann die Endezeit also folgendermaßen berechnet werden
  - $D(i,k,t)$: Länge der k-ten Dateneinheit, die zur (realen) Zeit t beim Datenstrom i ankommt
  - $R(t)$ sei die Rundenzahl zum (realen) Zeitpunkt t
  - $F(i,k\text{-}1,t)$ sei Endezeit der $k\text{-}1$-ten Dateneinheit des Datenstroms i zum Zeitpunkt t
  - Endezeit $F(i,k,t) = max\ \{\ F(i,k\text{-}1,t),\ R(t)\ \} + D(i,k,t)$
- Definition der Rundenzahl als Variable, die invers zur Anzahl aktiver Datenströme wächst, d.h. $R(t)$ wächst mit zunehmender Anzahl aktiver Datenströme langsamer
- $F(i,k,t)$ und $R(t)$ sind virtuelle Zeiten!

- Probleme: Zustandshaltung und keine Gewichtung

Weighted Fair Queueing (WFQ)

- Einführung einer Gewichtung pro Datenstrom ermöglicht Priorisierung
- Berechnung der Endezeit
  - $F(i,k,t) = \max\{F(i,k-1,t),\ R(t)\} + \frac{D(i,k,t)}{\phi(i)}$
- Rundenzahl
  - erhöht sich mit $\frac{1}{\sum_{i=1}^{N(t)} \phi(i)}$, $N(t)$ ist die zum Zeitpunkt t aktive Anzahl an Datenströmen
- Positive Eigenschaften
  - Gezielte Bevorzugung bestimmter Datenströme möglich
  - Datenströme sind voneinander abgesichert
  - Obere Schranke für Ende-zu-Ende-Verzögerung kann teilweise angegeben werden

Weighted Fair Queueing (Forts.)

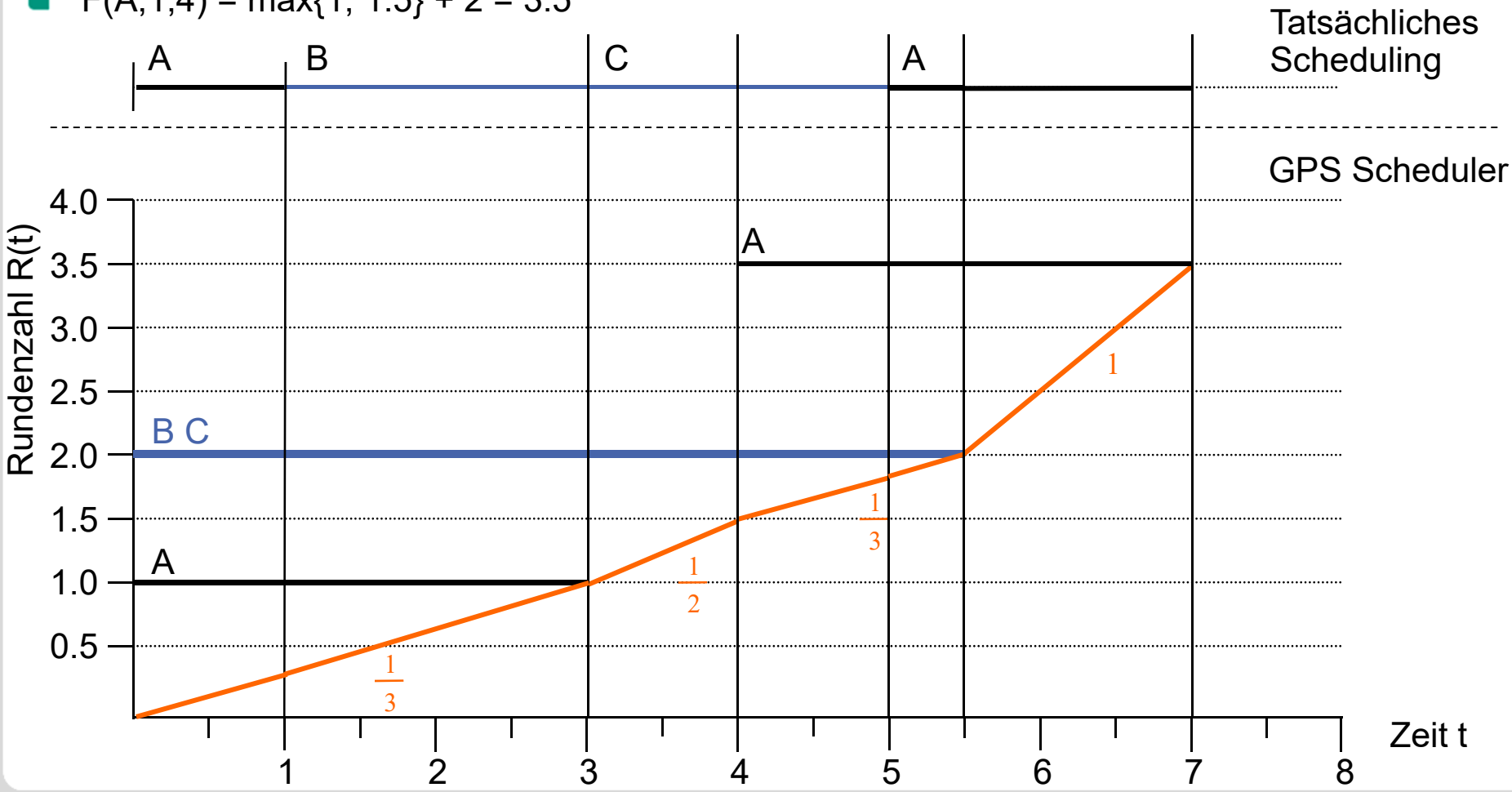
- Nachteile
  - Gewicht als zusätzliche Angabe je Datenstrom erforderlich
  - Geringfügig höherer Berechnungsaufwand als bei Fair Queueing, aber immer noch $O(n\,log(n))$
  - Benutzer sollten (ratenbasierte) Flusskontrolle implementieren, ansonsten können Verluste von Dateneinheiten die Folge sein

Beispiel: Weighted Fair Queueing

- Aufgabe
  - Dateneinheiten der Größen 1, 2, und 2 erreichen einen WFQ-Scheduler zum Zeitpunkt 0. Sie gehören zu den gleichgewichteten Datenströmen A, B und C. Für Datenstrom A wird zum Zeitpunkt 4 eine weitere Dateneinheit der Länge 2 empfangen. Die Datenrate sei eine Größeneinheit/Sekunde. Bestimmen Sie die Endezeiten der Dateneinheiten. Bei welcher Rundenzahl befindet sich das System im Leerlauf?
- Lösung
  - Endezeiten der Datenströme zum Zeitpunkt 0: 0
  - Endezeit der ersten Dateneinheit: max (0,0) + 1 = 1

WFQ: Beispiel 1

- Prinzip: Beendigungszeiten eines GPS-Scheduler bestimmt Bearbeitungsreihenfolge
- F(i,k,t) = max{ F(i,k-1,t), R(t) } + D(i,k,t)
- F(A,0,0) = 0 + 1 = 1, F(B,0,0) = 0 + 2 = 2, F(C,0,0) = 0 + 2 = 2
- F(A,1,4) = max{1, 1.5} + 2 = 3.5



WFQ: Beispiel 2

- Datenströme A, B und C haben folgende Dateneinheiten zu verschicken: D(A,0,0)=2, D(B,0,0)=2, D(C,0,1)=1, D(C,1,2)=1
- Das heißt: Datenstrom A und B haben jeweils zum Zeitpunkt 0 eine Dateneinheit der Größeneinheit 2 zu senden, Datenstrom C habe zu den Zeitpunkten 1 und 2 jeweils eine Dateneinheit der Größe 1 zu senden. Datenstrom C habe außerdem die Gewichtung $\phi(C)=2$, Datenströme A und B jeweils $\phi(i)=1$. Ausgangsdatenrate: eine Größeneinheit/s.

Noch zu sendende Datenmenge

A	2	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0
B	2	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0
C	0	1	1.5	1	0.5	0	0
Reale Zeit t[s]	0	1	2	3	4	5	6
Rundenzahl R(t)	0	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2

- F(A,0,0)= 2, F(B,0,0)= 2, F(C,0,1)= max(0,R(1))+1/2= max(0,0.5)+1/2=1
- F(C,1,2)= max(1,R(2))+1/2= max(1,0.75)+1/2=1.5
- Nach 6s ist der Scheduler fertig und die durch die berechneten Endezeitpunkte bestimmte Sendereihenfolge sieht folgendermaßen aus: C0,C1,A,B (alternativ: C0,C1,B,A)

WFQ – Verzögerungsgarantie (1)

- WFQ limitiert die den einzelnen Datenströmen zugeordnete Bandbreite, da dem Datenstrom i beim h-ten Hop bzw. Scheduler der folgende Anteil der Bandbreite zugeordnet wird: $\frac{\phi(i,h)}{\sum_{j=1}^{N_h}\phi(j,h)}$ (N_h : Anzahl der Datenströme im Scheduler h)
- Für die Ende-zu-Ende-Verzögerung lässt sich eine Schranke angeben
  - Voraussetzung: Quelle i kann zu jedem Zeitpunkt nur $\sigma(i) + \rho(i)t$ Bits senden, wobei σ (Bucket-Tiefe, max. Burstgröße) und ρ (Rate) die Parameter eines Token-Bucket sind
  - Für die Bedienrate $g(i,h)$, die einem Datenstrom i vom h-ten durchlaufenen Scheduler zugewiesen wird, gilt: $g(i,h) = r(h) \cdot \frac{\phi(i,h)}{\sum_{j=1}^{N_h}\phi(j,h)}$ $r(h)$ ist die Datenrate des Übertragungsabschnitts (Link)

WFQ – Verzögerungsgarantie (2)

- Annahme: $g(i) \geq \rho(i)$ wobei $g(i)$ das kleinste aller $g(i,h)$ ist, also $g(i) := min_{h=1..H}\, g(i,h)$
  - $g(i)$ ist minimal garantierte Datenrate entlang des Wegs
  - Ansonsten steigt die Warteschlange an einem Scheduler ohne Grenze
- L_{max}: größte erlaubte Dateneinheit, H: Anzahl der Scheduler
- Obere Schranke für die Verzögerung eines Pakets des Datenstroms i ist dann:

$$\frac{\sigma(i)}{g(i)} + \sum_{h=1}^{H}\left(\frac{L_{max}}{r(h)} + \frac{L_{max}}{g(i,h)}\right)$$

$\frac{\sigma(i)}{g(i)}$ Bedienzeit für maximalen Burst mit minimal garantierter Rate

$\frac{L_{max}}{r(h)}$ Übertragungsdauer eines Pakets mit max. Länge bei Linkspeed (nicht verdrängbares Paket das gerade zuvor bedient wird)

$\frac{L_{max}}{g(i,h)}$ Bedienzeit für maximal langes Paket mit zugesicherter Rate

- aber: Verzögerungsgarantie abhängig von Datenrate

Variante – Deficit Round Robin

- Quantum Q_i: definierte Größe in Bytes  [ShVa96]
- Defizit-Zähler DC_i pro Queue: wird mit 0 initialisiert
- Besuche reihum aktive Queues
  - addiere Q_i zu DC_i
  - Größe eines gesendeten Pakets wird von DC_i abgezogen
  - Solange Defizit nicht negativ wird, versende Pakete der Queue
  - Falls keine Anforderungen mehr vorhanden $DC_i := 0$, sonst verbleibt „Guthaben“ in DC_i für nächste Runde

Variante – Stochastic Fair Queueing

- (W)FQ:
  - Hoher Aufwand für Queue pro Datenstrom
  - Berechnung erfordert mindestens Aufwand $O(n \log(n))$
- Abbildung von mehreren Datenströmen auf wenige Queues (z.B. mittels Hashfunktion), dann Round Robin
- Kollisionen sehr wahrscheinlich, Hashfunktion wechselt
- Aufwand: $O(1)$, aber Fairness nur probabilistisch gegeben

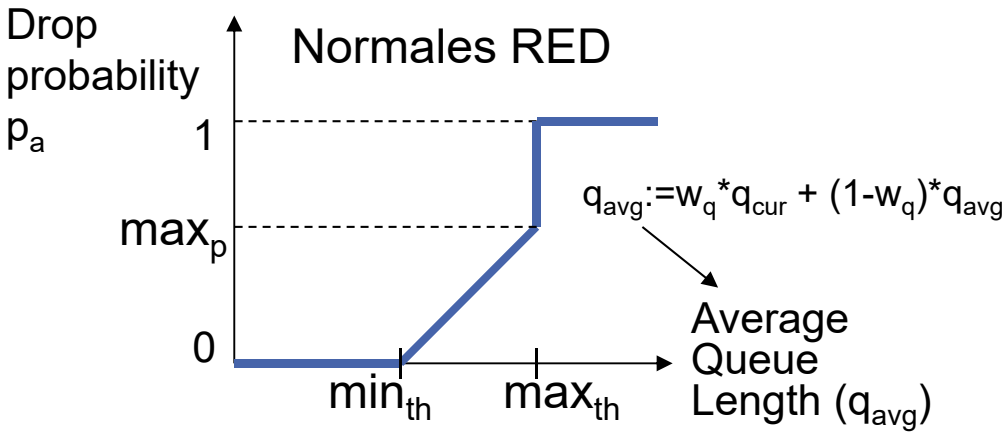
[McKe90]

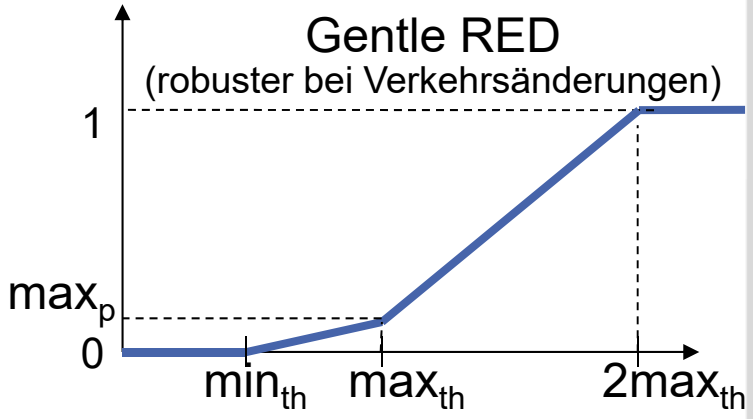
Earliest Deadline First (EDF)

- Problem
  - WFQ-Garantie für Verzögerung abhängig von zugesicherter Rate des Datenstroms
- Vorgehensweise EDF
  - Jeder Dateneinheit wird eine Deadline zugewiesen. Scheduler bearbeitet Dateneinheiten gemäß deren Deadline.
  - Beim Verbindungsaufbau wird ein Verkehrsvertrag mit dem Scheduler ausgehandelt auf der Basis der maximalen Rate (Peakrate) einer Verbindung
    - Begrenzung der Worst-case-Verzögerung wird garantiert
    - Nachteil: Ressourcenreservierung auf der Basis der Peakrate führt zu schlechter Ausnutzung der Bandbreite
- Vorteil
  - Garantie der Ende-zu-Ende-Verzögerung unabhängig von der Bandbreite des Datenstroms
- Nachteil
  - Aufwändige Implementierung (Zeitstempel, Sortierung)
  - Paketformat muss Zeitstempel mitführen

Active Queue Management

- Ursprung: normales Tail-Drop ruft teilweise Unfairness und Synchronisation von TCP-Strömen hervor [RFC2309]
- Idee: Aktives Warteschlangenmanagement verhindert, das WS in Überlastbereich kommt
  - frühzeitiges Verwerfen von Paketen, bevor WS maximal gefüllt: Warteschlangenlänge wird kürzer
  - Random Early Detection (RED) [FlJa93]





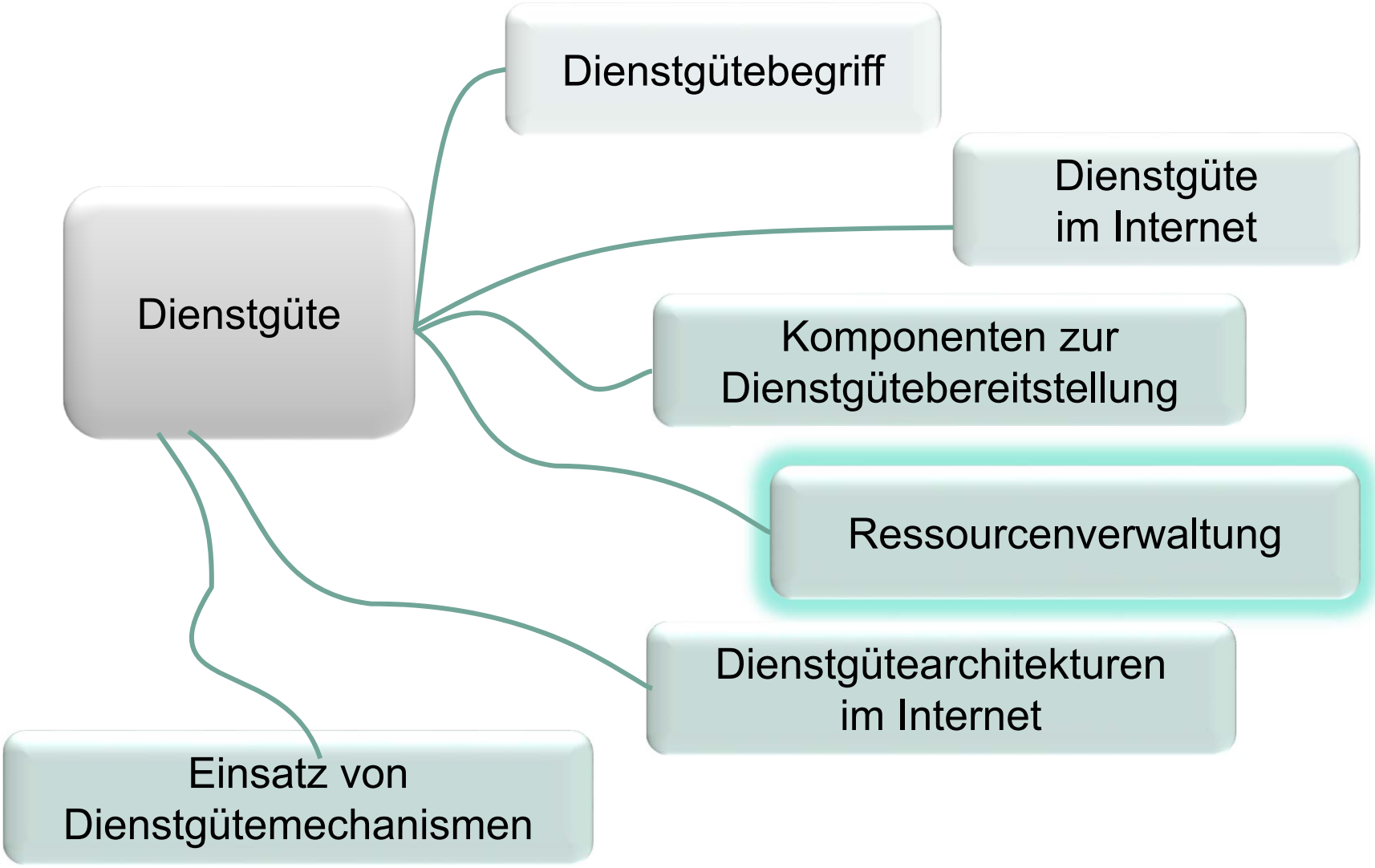
AQM – Diskussion

- Vorteile
  - Zufällige Auswahl sorgt für mehr Fairness, Desynchronisation der Paketverluste
  - Durchschnittliche Warteschlangenlänge ist kürzer
  - Stausituationen können frühzeitig erkannt werden → ECN
- Nachteile
  - Aufwändigerer Warteschlangenmechanismus
  - RED-Parameter sind nicht einfach zu setzen, d.h. stark anwendungsabhängig, welche Parameter jeweils gute Leistung liefern  [LAJS03]
- Zahlreiche Varianten existieren: u.a. Gentle RED, Adaptive RED (ARED), usw.
- Alternative AQM-Ansätze bedienen sich teilweise d. Verfahren aus der Regelungstechnik  [ZhLW03]

AQM – CoDel

- Controlling Queue Delay (CoDel) [NiJa12]
  - Vorschlag v. Van Jacobson/Kathie Nichols
  - Ziel: Abbau einer „Standing Queue“ (Bufferbloat)
- Bestimmung der Durchlaufzeit der Datenpakete in der Warteschlange
  - bei zu langer Durchlaufzeit → Verwerfen von Paketen
  - geringer zusätzlicher Aufwand beim En-/DeQueueing
  - auch für hohe Geschwindigkeiten sehr gut geeignet
- nur zwei anpassbare Parameter
  - Target (5 ms)
    - maximal tolerierte Zeitspanne für Aufenthaltszeit
  - Interval (100 ms)
    - Zeitspanne, in der Aufenthaltszeit beobachtet wird
- Bessere Ergebnisse mit FQ-CoDel

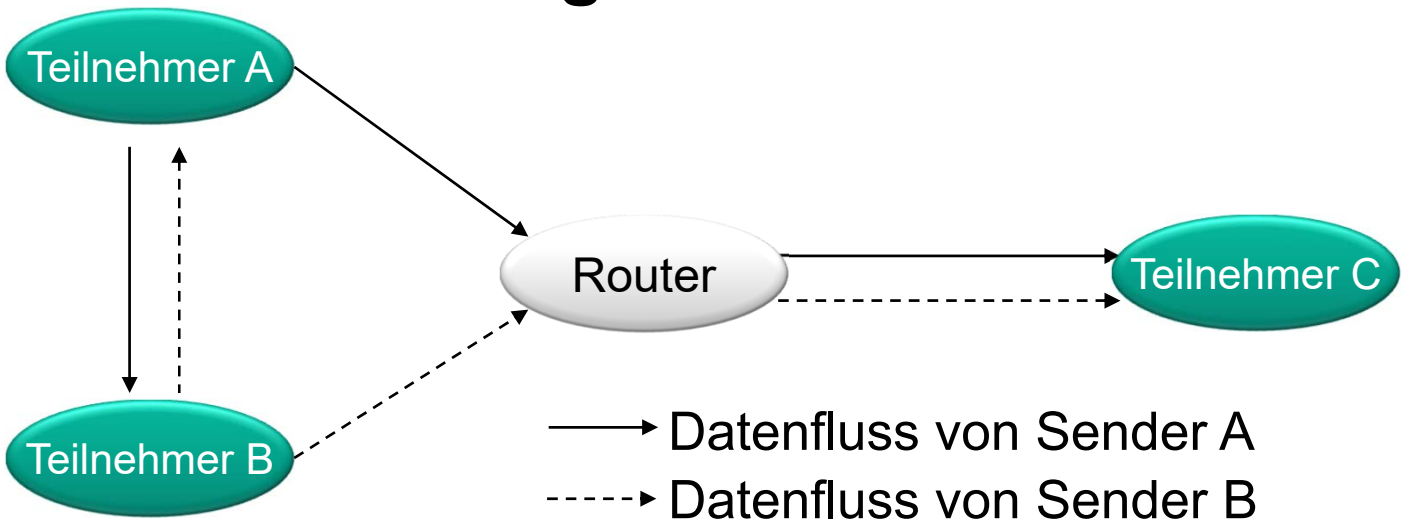
Überblick


Dienstgütebegriff
Dienstgüte im Internet
Dienstgüte
Komponenten zur Dienstgütebereitstellung
Ressourcenverwaltung
Dienstgütearchitekturen im Internet
Einsatz von Dienstgütemechanismen

Ressourcenverwaltung

- Problem
  - Bereitstehende Ressourcen sind beschränkt
  - Anwendungen konkurrieren um gemeinsam zu benutzende Ressourcen
  - Ressourcen: Übertragungskapazität („Bandbreite“), Pufferkapazität, Rechenzeit
- Aufgaben
  - Regelung, wer Ressourcen benutzen darf
    - Zugangskontrolle (vor Reservierung und Nutzung)
      → Kontrollebene
      - Ressourcen-basiert
      - Politik-basiert (Policy-based)
    - Nutzungskontrolle (während Nutzung, Policing)
  - Zugriff auf Ressourcen
    - Exklusiver Zugriff bei expliziter Reservierung von Ressourcen
    - Konkurrierender Zugriff: Bedienstrategien, Verteilstrategien, etc.

Gemeinsame Nutzung von Ressourcen



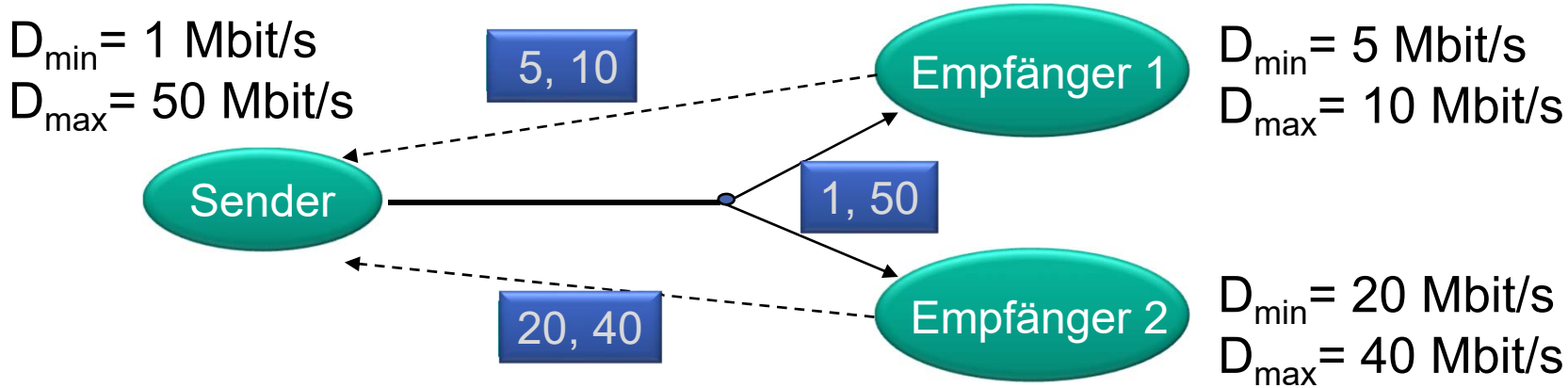
- Abhängig von der Kommunikationsbeziehung zwischen den Teilnehmern können reservierte Ressourcen gemeinsam genutzt werden
- Beispiel:
  - Audio-Konferenz: zu einem Zeitpunkt ist meist nur ein Sprecher aktiv
  - Ressourcen werden nur einmal reserviert, können jedoch von allen Sprechern genutzt werden

Dienstgüteaushandlung

- Problem
  - Kommunikationspartner müssen Dienstgüteanforderungen kommunizieren und die bereitstellbare Dienstgüte aushandeln

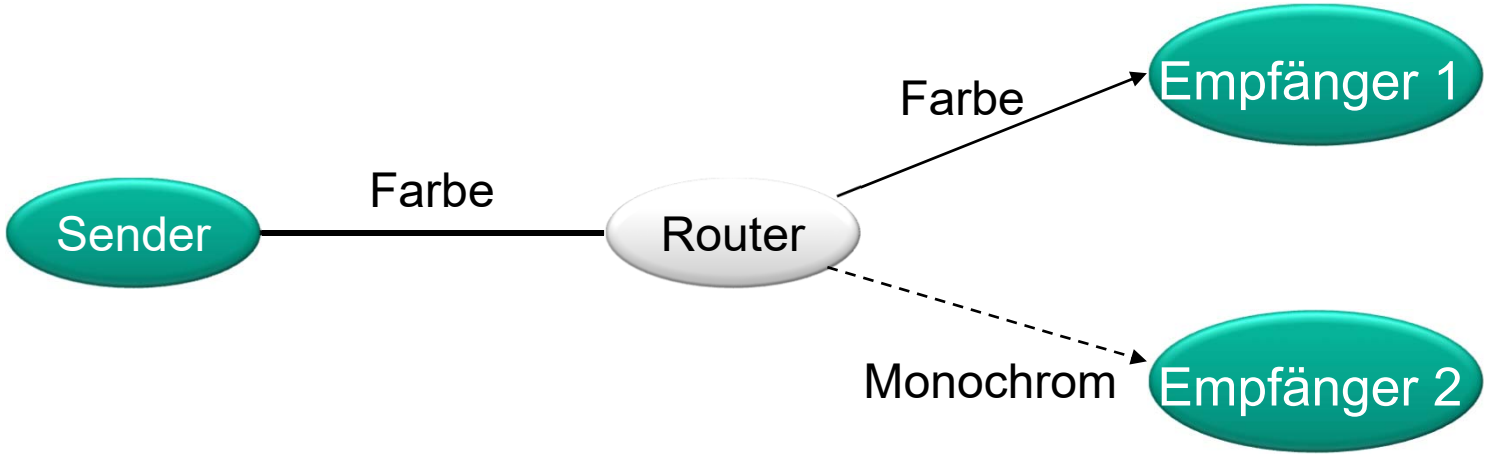
  - Was wird ausgehandelt? Parameterwerte eines Dienstes
  - Aushandlung könnte mehrere Iterationen benötigen
    - Besser: Intervall oder Liste diskreter akzeptabler Werte vorgeben, Antwort liefert tatsächlich reservierte Werte
- Ansätze
  - Reservierungen auf Anforderung, d.h. „On-Demand“ → Signalisierung
  - Langzeit-Reservierungen
    - Statische Reservierung, z.B. durch manuelles Einrichten
  - Vorab-Reservierungen
    - Reservierung erfolgt vor eigentlicher Nutzung

Dienstgüteaushandlung bei Gruppenkommunikation



- Bei mehreren Empfängern kann es während der Dienstgüteaushandlung zu Konflikten kommen
- Konfliktauflösung beim Sender gemäß der gewählten Gruppensemantik
  - Abweisung des Verbindungsaufbauwunsches
  - Ablehnung eines einzelnen Empfängers
  - Aufbau der Multicast-Verbindung mit unterschiedlicher Dienstgüte (erfordert entsprechende Unterstützung des Kommunikationssystems)

Unterschiedliche Dienstgüten bei Gruppenkommunikation (Multicast)



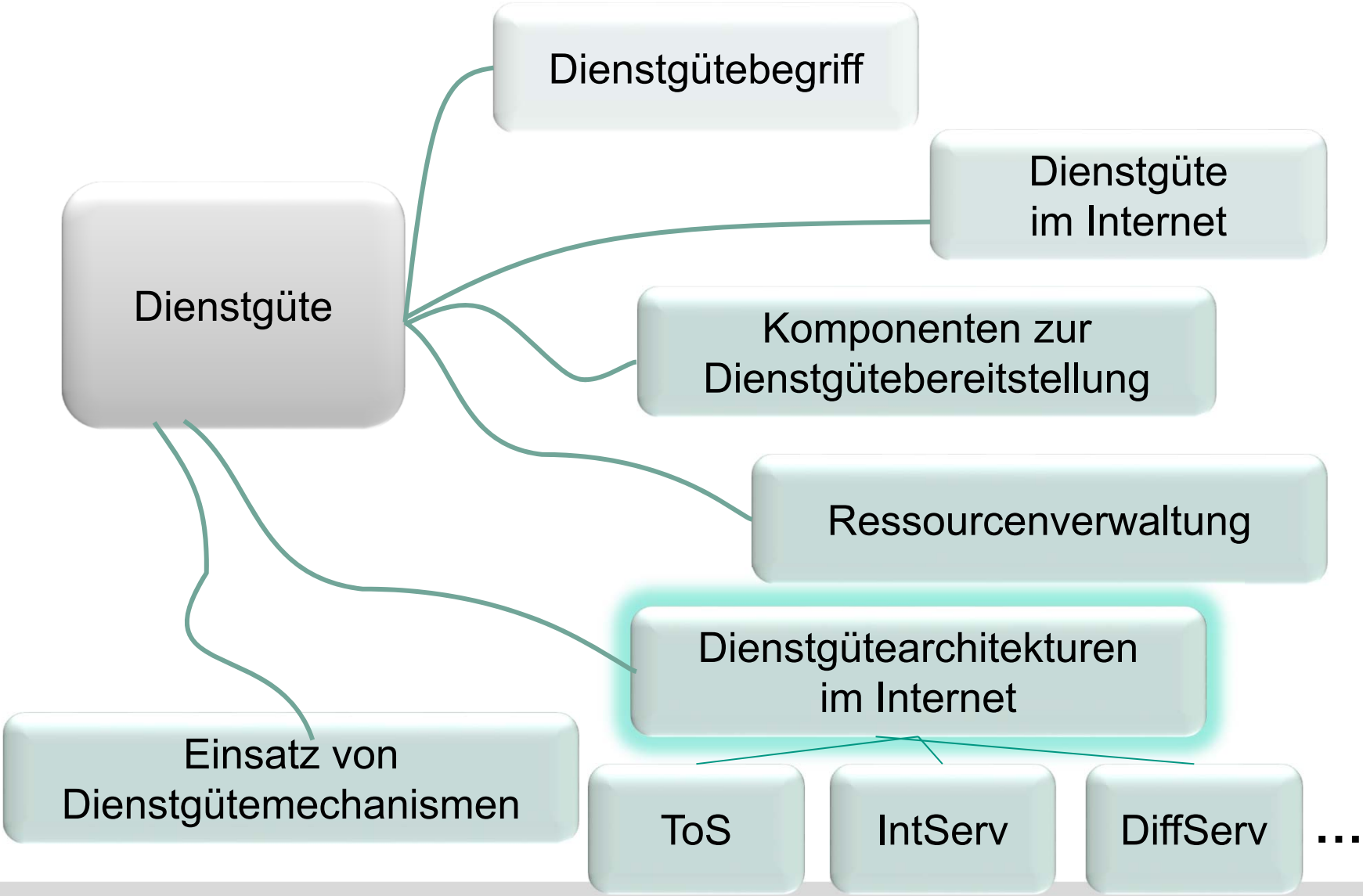
- Filtern eines Datenstromes in Zwischensystemen ermöglicht die Bereitstellung unterschiedlicher Dienstgüten für eine Multicast-Verbindung
- Das Filtern erfordert eine hierarchische Kodierung der Benutzerdaten, z.B.:
  - MPEG-kodierte Videoströme (z.B. MPEG-4 SVC)
  - Trennung von Film- und zusätzlicher Farb-Information
  - Filtern ermöglicht die effiziente Nutzung von Betriebsmitteln durch eine „maßgeschneiderte“ Reservierung
  - Filtern ermöglicht Konfliktauflösung bei Dienstgüteaushandlung

Layered Multicast

- Hierarchische Codierung des Datenstroms als Grundvoraussetzung
- Aufteilung des Datenstroms in mehrere Schichten, die sukzessive hinzugenommen werden können, um eine bessere Qualität zu erhalten, z.B. Basisschicht sowie 2 weitere Schichten zur Erhöhung der Auflösung (beispielsweise räumlich oder zeitlich)
- Je Schicht eine separate Multicast-Gruppe, d.h. Multicast-Datenstrom
- Empfänger mit geringerer Bandbreitenanforderung abonnieren nur wenige Datenströme
- Damit auch empfängerbasierte Staukontrolle möglich


[McJV96]

Überblick


Dienstgütebegriff
Dienstgüte im Internet
Dienstgüte
Komponenten zur Dienstgütebereitstellung
Ressourcenverwaltung
Dienstgütearchitekturen im Internet
Einsatz von Dienstgütemechanismen
ToS
IntServ
DiffServ
...

Dienstgütearchitekturen im Internet (1)

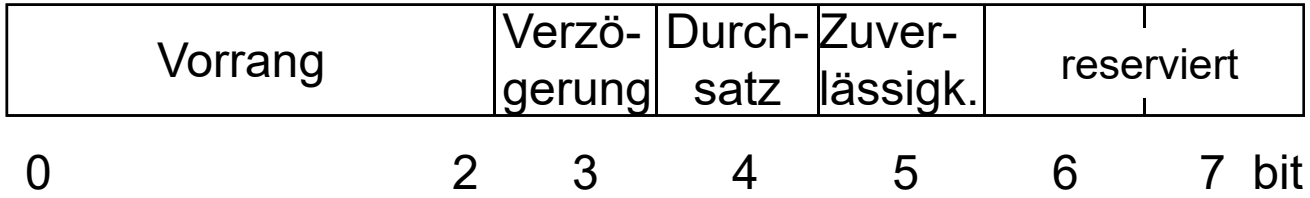
- Globale Einführung von Ende-zu-Ende-Dienstgütemechanismen schwierig und teuer
- Probleme:
  - Reservierung von Netzwerkressourcen → aufwändig
  - Abrechnung der genutzten Dienste → unklar
  - Architektur muss skalierbar sein → unklar
- Aber:
  - bessere Dienste für den Kunden (und mehr Geld für Provider)
  - besserer Schutz gegen Angriffe
  - Probleme beherrschbar in einzelnen Betreiberdomänen

Dienstgütearchitekturen im Internet (2)

- Bisher mehrere Ansätze:
  - IP Type of Service
  - Integrated Services
    - Drei festgelegte Dienste: Guaranteed Service, Controlled Load, Best-Effort
    - Empfängerorientiertes Signalisierungsprotokoll RSVP
    - Konzept für Multicast
    - Soft-State für Reservierungsinformation
  - Differentiated Services
    - Unterstützung für max. 64 verschiedene Dienstklassen
    - Implizite Signalisierung der Dienstklasse in der Dateneinheit, kein Signalisierungsprotokoll erforderlich
    - Heute einsetzbar, aber tatsächlich erreichbare Dienstgüte und Managementarchitektur unklar

Dienstgüte durch Type of Service-Feld

- Dienstqualität in IP-Datagrammen ursprünglich durch Type-of-Service vorgesehen: [RFC791]
  - Vorrang: verschiedene Prioritätsstufen
  - Verzögerung: normal (0), niedrig (1)
  - Durchsatz: normal (0), hoch (1)
  - Zuverlässigkeit: normal (0), hoch (1)



RFC 791: "The use of the Delay, Throughput and Reliability indications may increase the cost (in some sense) of the service. In many networks better performance for one of these parameters is coupled with worse performance on another."

- Es können mit dem Type of Service-Feld alleine keine Garantien gegeben werden. Weshalb?

Integrated Services Architecture

- Architektur für Integrierte Dienste (Mitte der 90er Jahre, RFC 1633):
  - Unterstützung multimedialer Anwendungen, z.B. Video-Konferenzen
  - Abkehr vom zustandslosen Router: Zustand je Datenstrom in jedem Router
    - besondere Behandlung der Pakete wie in Verkehrsprofil abgelegt
    - Erhalten der Robustheit durch „Soft State“-Reservierung
  - Ergänzung der bestehenden Internet-Architektur
  - Integration gruppenkommunikationsbasierter Anwendungen

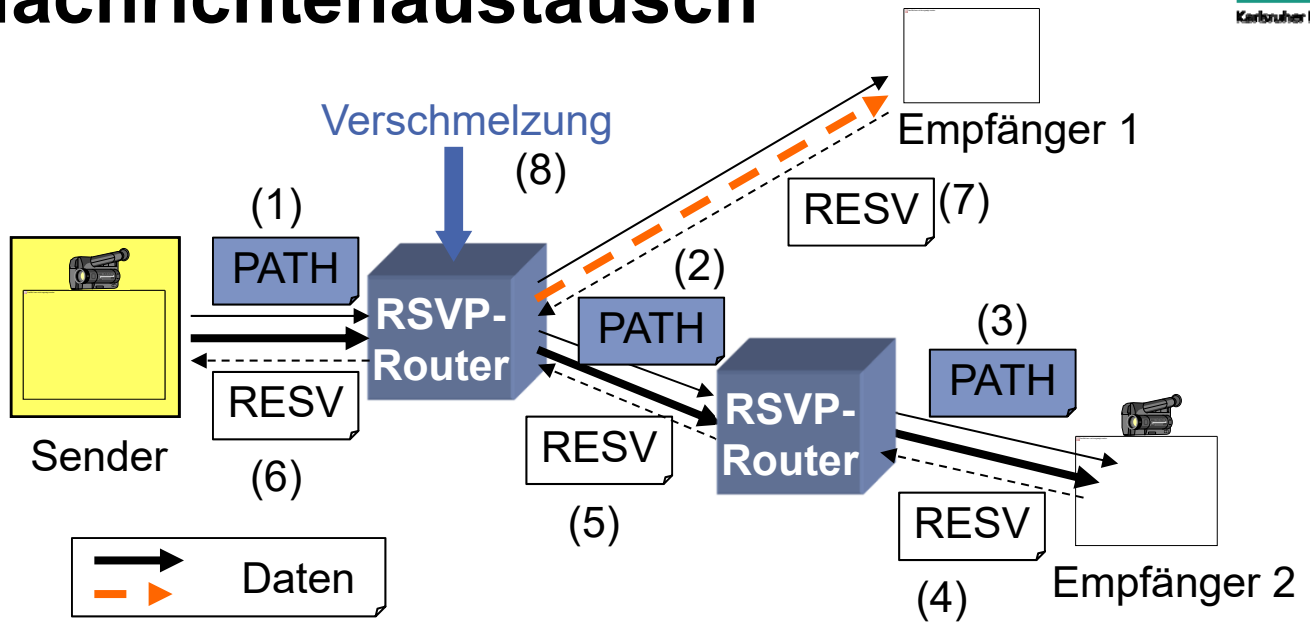
Das Signalisierungsprotokoll RSVP

- Ziel
  - Signalisierung von Reservierungsanforderungen in IP-basierten Netzen
  - Datentransfer findet weiterhin über IP statt
- Konzept  [RFC2205]
  - Empfängerbasierte Signalisierung von Reservierungsanforderungen für unidirektionalen Datenfluss
  - Unterstützung
    - Multicast-Kommunikation
    - heterogener Dienstqualität, d.h. unterschiedliche Empfänger können verschiedene Dienstqualität erfahren
    - verschiedener Reservierungsstile
  - Empfänger erhält keine positive Quittung für Reservierung

Grundlegende Konzepte

- Session
  - eine Menge von Datenströmen mit dem gleichen Ziel (Multipeer)
  - Definiert durch: Ziel-IP-Adresse, Ziel-Protokoll-Kennung, Ziel-Port
- Reservierungsanforderung
  - Wird vom Empfänger (Ziel) gesendet und als Flow Descriptor bezeichnet. Sie besteht aus:
    - FlowSpec
      - Beschreibt die gewünschte Dienstqualität
      - Der Inhalt der FlowSpec ist nicht Gegenstand von RSVP
    - FilterSpec
      - Beschreibt, welche Dateneinheiten einer Session die Reservierungen nutzen dürfen
    - Unterscheidung in FlowSpec u. FilterSpec ermöglicht explizite Trennung von Reservierung und Nutzung der Ressourcen

RSVP: Nachrichtenaustausch



- PATH-Dateneinheiten werden vom Sender verschickt. Verteilbaum wird dadurch aufgebaut (Soft-State), (1)–(3)
- RESV-Dateneinheiten (4)–(6) der Empfänger finden Weg zurück zur Quelle aufgrund der durch PATH-Nachrichten installierten Zustände
- Verschmelzung verschiedener Reservierungswünsche möglich

Probleme der Integrated Services Architektur

- Mangelnde Skalierbarkeit  [RFC2208]
  - Jeder Router verwaltet Zustandsinformationen (Qualitätsparameter, Timer, Sender- und Empfängeradressen) pro Datenstrom (Micro-Flow!)
    - Leistung des Routers sinkt bei großer Anzahl von Datenströmen mit Reservierungen
  - Paketweiterleitung (Forwarding) wird durch die Klassifizierung eines jeden Pakets komplexer
    - großer Aufwand in Hochleistungsnetzwerken (Anzahl der Pakete zur Weiterleitung und Anzahl der Reservierungen hoch)
- Qualitätsparameter je Datenstrom frei wählbar
  - Router muss eine sich dynamisch ändernde Anzahl von Dienstgüten unterstützen
    - Paket-Scheduling ist komplex und daher nicht so leistungsstark

Differentiated Services

- 1997 erste Vorschläge, um skalierbar Dienstgüte im Internet bereitzustellen
  - Diskussion von Differentiated Services in der IETF
    - Prinzip: Keep It Simple, Stupid (KISS)

Ähnliche Ansätze von Dave Clark und Van Jacobson

David Clark

Van Jacobson

- „A Two-Bit Architecture“ [RFC2638]
- Anfang 1998: Arbeitsgruppe „Differentiated Services“ in der IETF (bis 3/2003)
  - Ziel: nur Basismechanismen (Building Blocks) definieren, aber keine Dienste

DiffServ – Ziele

- Qualitativ bessere, anwendungsunabhängige Dienste mittels einfacher, skalierbarer Mechanismen
- Reduktion der Komplexität im Netzinnern
  - weniger Zustände
  - weniger Funktionalität
  - Vermeidung von Zuständen je Datenstrom
- Kompatibilität zu existierenden Anwendungen und Endsystemen (schnelle Etablierung)

DiffServ-Architektur – Konzepte (1)

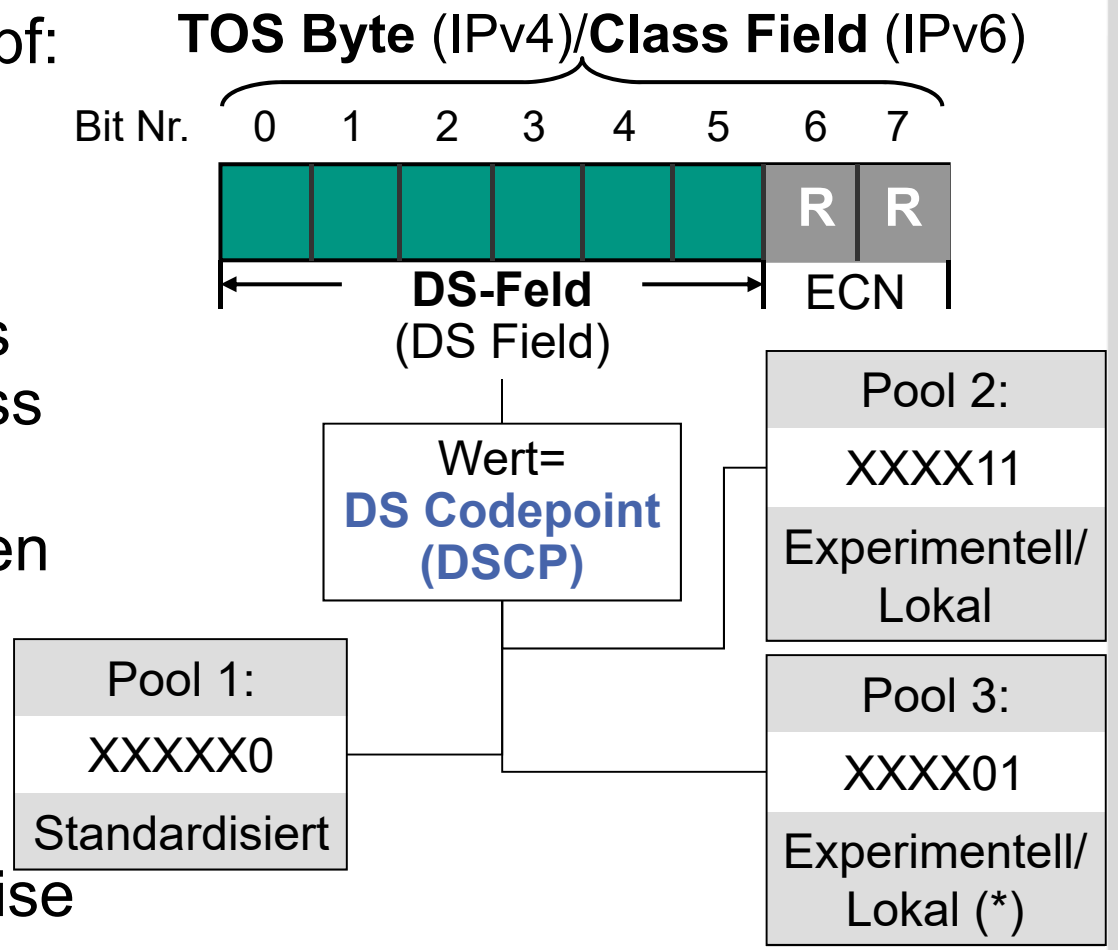
- Reduktion der Komplexität durch  [RFC2475]
  - Aggregation des Verkehrs im Netzinnern zu Dienstklassen
    - Pakete gleicher Dienstklasse tragen entsprechende Markierung
  - Vermeidung von Zuständen per Ende-zu-Ende-Datenstrom („Micro-Flow“) oder per Benutzer im Netzinnern
    - aggregierte Klassifikationszustände, einfache Paketklassifizierer
    - „Komplexere Funktionen“ wie Klassifizierung, Markierung, Überprüfung finden nur noch an Netzgrenzen statt
- Separation der eigentlichen Weiterleitungsmechanismen im Datenpfad von zugehörigen Verwaltungsmechanismen
  - z.B. Konfiguration, Ressourcenmanagement und -reservierung

DiffServ-Architektur – Konzepte (2)

- Abschnittweises Weiterleitungsverhalten (Per-Hop-Behavior – PHB)
  - bestimmt Behandlung für jedes Paket innerhalb eines Knotens
  - realisiert durch Warteschlangenmechanismen und Scheduling
- Kennzeichnung des PHB im IP-Paketkopf anhand DS Codepoint (DSCP) → einfache Klassifikation
- Verfeinerung des ungenauen ToS-Ansatzes:
  - Explizite Rolle von Grenzknoten und verkehrsbeeinflussenden Mechanismen
  - PHB-Modell ist flexibler als relative Prioritäten oder Dienstmarkierungen

DiffServ Codepoints

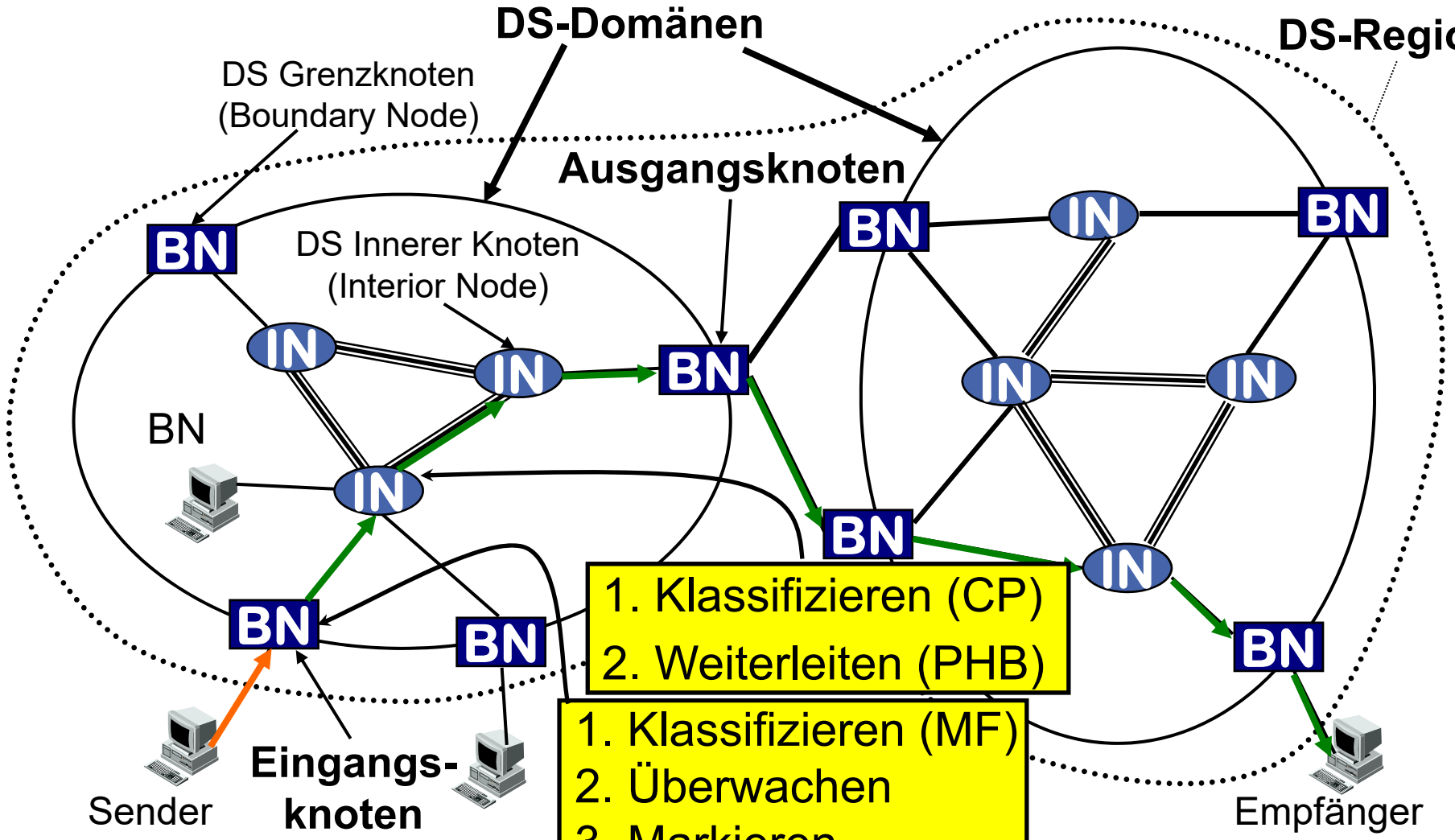
- Im IPv4- bzw. IPv6-Kopf:
- DS-Feld ist prinzipiell unstrukturiert!
- Wert des Codepoints ordnet entsprechendes PHB eindeutig zu (muss konfigurierbar sein)
- Mehrere DSCPs können auf das gleiche PHB verweisen
- Es kann mehr PHBs als DSCPs geben
- DSCP hat normalerweise keinen Einfluss auf die Wegewahl



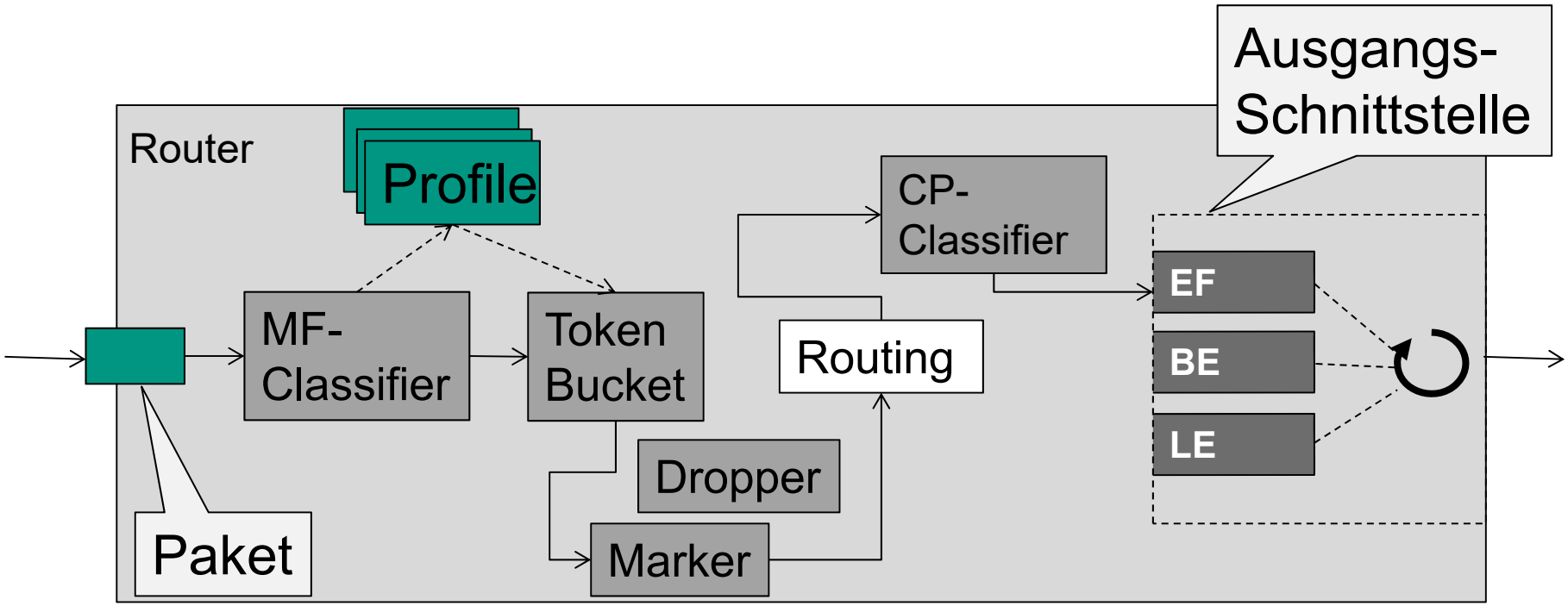
(*): Bereich kann bei Bedarf zur Standardisierung weiterer Werte herangezogen werden

ECN: Explicit Congestion Notification [RFC 3168]

Differentiated Services – Überblick



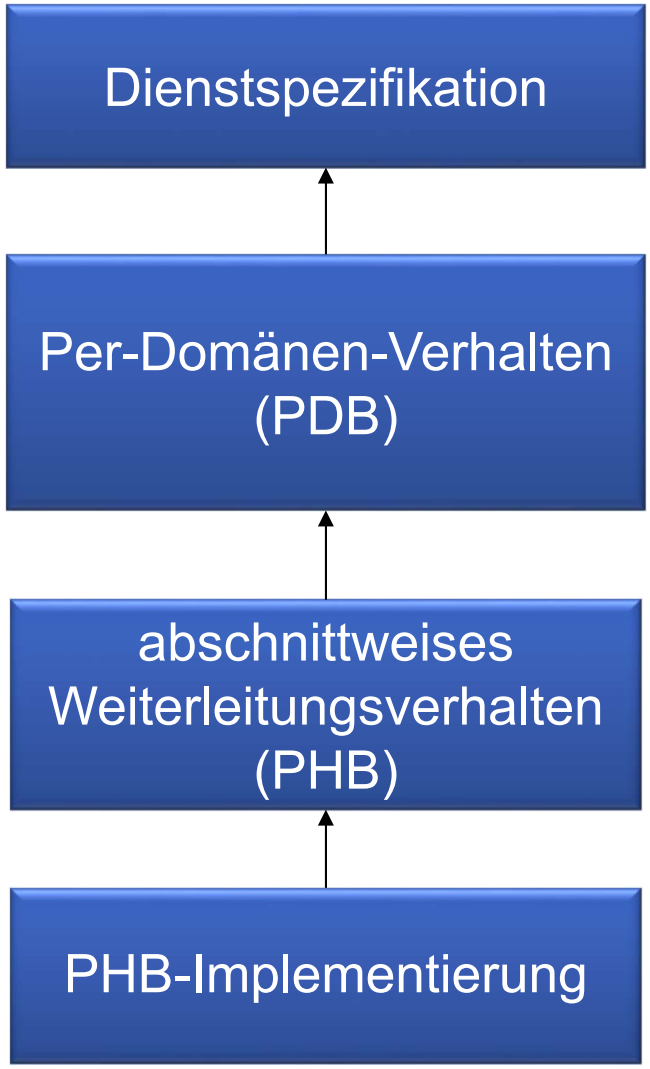
Weiterleitung in einem Grenzknoten



DiffServ – Ressourcenverwaltung

- Ressourcennutzung
  - Jedes DiffServ-Paket belegt die Ressourcen eines Knotens durch das zugeordnete jeweilige PHB
  - Überwachung (Policing) einzelner Ende-zu-Ende-Datenströme erfolgt üblicherweise nur im ersten Grenzknoten
- Ressourcenreservierungen
  - Üblicherweise per Aggregat
  - Manuell/statisch → dynamisch
  - Initiale, eher statische Aufteilung der Ressourcen zwischen den verschiedenen PHBs („Ressourcenpartitionierung“) für Knoten
  - Über belegte/freie Ressourcen müssen nicht die Knoten selbst Buch führen (vgl. dazu IntServ?)
  - Installation des Profils aktiviert Dienstnutzung

Differentiated Services – Dienste (1)



- Ende-zu-Ende-Dienste
- Spezifikation über Service Level Specification (SLS)
- Kombination aus den PDBs der besuchten Domänen

- Domänenweites Weiterleitungsverhalten
- PHB-Spezifikation + verkehrsbeeinflussende Mechanismen (Traffic Conditioning)
- Attribute beschreiben Eigenschaften
- Beschreibung von Aggregationseffekten

- Abschnittweises Paketweiterleitungsverhalten:
- Paketbearbeitung innerhalb eines Knotens

- bestimmte Warteschlangen- und Schedulingmechanismen

Differentiated Services – Dienste (2)

- Dienstleistungsvereinbarung (Service Level Agreement – SLA):
  - Dienstvertrag zwischen Dienstkunde und Dienstbetreiber,
  - legt Weiterleitungsdienst fest, welchen der Kunde erhalten sollte
  - beinhaltet u.a. Technical Service Level Specification
  - enthält darüber hinaus noch nicht-technische, d.h. geschäftliche bzw. wirtschaftliche Aspekte (z.B. Bedingungen für Regresszahlungen)
- Komponenten zur Realisierung eines Dienstes:
  - PHB-Implementierungen (konkrete Realisierung eines PHBs)
  - Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen (Traffic Conditioning)
  - Bereitstellungsstrategien und Abrechnungsmodelle

Differentiated Services – Dienste (3)

- Bilaterale Dienstverträge (SLAs) zwischen benachbarten Internet-Dienstbetreibern
  - statisch oder dynamisch
- Technische Dienstspezifikation (TSLS):
  - Leistungsparameter, z.B.: Durchsatz, Verzögerung, Verlust
  - Topologischer Gültigkeitsbereich
  - Verkehrsprofil (zeitl. Eigenschaften, z.B. Rate und Burst)
  - Markierungs- und Verkehrsformungsverhalten
  - Zusätzlich allgemeine Parameter, wie u.a.:
    - Verfügbarkeit
    - Zuverlässigkeit
    - Wegebeschränkungen

DiffServ-Bausteine: PHBs

- Per-Hop Behavior (PHB):  [RFC2474]
  - extern sichtbares Verhalten von Paketen (eines BA) in einem DS-Knoten
  - bestimmt Behandlung von Paketen anhand DSCP während der Weiterleitung innerhalb eines DS-Knotens
- Bisher standardisierte PHBs:
  - „Default PHB“ ist das bisherige Best-Effort-Verhalten (DSCP=000000)
  - Class Selector PHBs:  [RFC2474]
    - kompatibel zu IP-Precedence-Feld im ToS-Byte (DSCPs= XXX000)
    - größerer Wert = höhere Priorität
      → 8 relative Prioritätsklassen (inkl. Default-PHB)
  - Expedited Forwarding PHB
  - Assured Forwarding PHB

Expedited Forwarding PHB

[RFC3246]

- Ausgangspunkt: Idee der virtuellen Standleitung (garantierte Bandbreite, kein Jitter)
- Expedited Forwarding PHB als Basis für Dienste mit
  - garantierter Bandbreite, niedrigem u. begrenztem Jitter, geringer Verzögerung, geringen Paketverlusten
- Ziel
  - ankommende Pakete „sehen nur leere Warteschlange“
  - Paket verlässt den Router „sofort“ wieder → kein Stau!
- Summe der Ankunftsraten muss kleiner als die minimale Ausgangsrate sein → Zugangskontrolle notwendig (warum?)

EF PHB

- Implementierung z.B. durch Simple Priority Queueing oder WFQ
  - WFQ-Variante weist leicht höheren Jitter auf als Simple Priority Queue Implementierung (weshalb?)
  - Aber WFQ bietet niedrigeren Klassen Schutz vor permanenter Verdrängung
- Ursprüngliche Spezifikation in RFC 2598 ungenau, daher Neudefinition in RFC 3246 (weitere Erläuterungen dazu in RFC 3247) [RFC3247]
  - ursprüngliche Formulierung war genau genommen mathematisch nicht korrekt und daher nicht erfüllbar

EF PHB – Formale Definition

- EF-Knoten an einer Schnittstelle I mit konfigurierter Rate R muss folgende Gleichungen erfüllen

(1) $d_j \leq f_j + E_a \quad \forall j > 0$

(2) $f_0 = 0, d_0 = 0 \qquad f_j = \max(a_j, \min(d_{j-1}, f_{j-1})) + \frac{l_j}{R} \qquad \forall j > 0$

- d_j Zeit zu der das letzte Bit des j. zu verschickenden EF-Pakets den Knoten über I tatsächlich verlässt
- f_j Zielabgangszeit für das j. EF-Paket über I, d.h. die „Ideal-Zeit“ zu der (oder zuvor) das letzte Bit des Pakets den Knoten verlassen sollte
- a_j tatsächliche Ankunftszeit des letzten Bits des j. EF-Pakets am Knoten mit Zielausgang I
- l_j Größe (in Bits) des j. EF-Pakets, das über I verschickt werden soll, bezieht sich auf das IP-Datagramm (IP-Kopf plus Nutzlast) und enthält keinen darunter liegenden (z.B. MAC-Schicht) Overhead.
- R ist die für EF konfigurierte Rate am Ausgang I (in bits/s)
- E_a Fehlerterm, obere Grenze für d_j -f_j

Assured Forwarding PHB (1)

- Assured Forwarding PHB Group [RFC2597]
  - Definiert Eigenschaften für „AF-Typ“
  - Besser geeignet als EF für burst-artigen Verkehr
- AF-Klasse:
  - Instanz eines AF-Typs
  - Gruppe aus m PHBs mit je unterschiedlicher Verwurfspriorität
  - Vorgeschlagen: m=3, d.h. Verwurfsprioritäten niedrig, mittel, hoch; mindestens 2 unterschiedliche Prioritäten je AF-Klasse gefordert
  - keine Umordnung von Paketen eines Micro-Flows zugelassen
  - vollständig unabhängig von anderen AF-Klassen
- n unabhängige AF-Klassen (4 mit standardisierten DSCPs)

AF-Klasse

Verwurfspriorität (y)	AF 1y	AF 2y	AF 3y	AF 4y
Niedrig (1) ●	001010	010010	011010	100010
Mittel (2) ●	001100	010100	011100	100100
Hoch (3) ●	001110	010110	011110	100110

Assured Forwarding PHB (2)

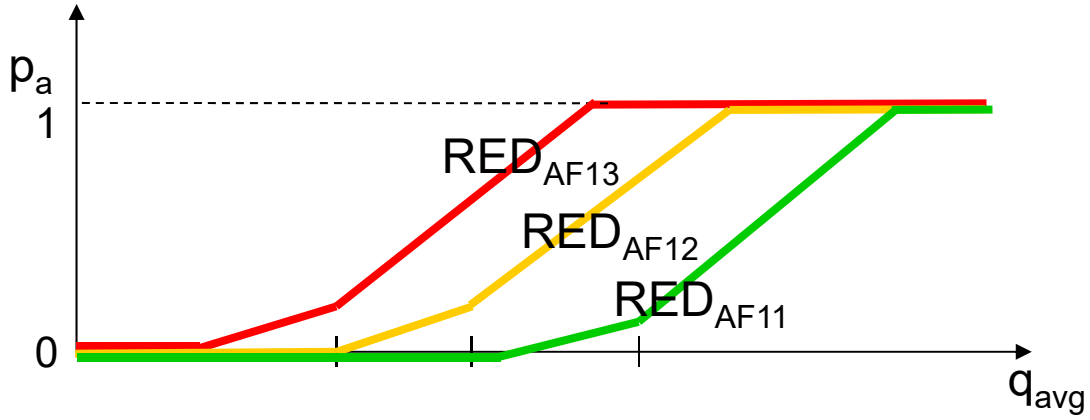
- Aktives Warteschlangenmanagement (z.B. RED) gefordert
- Verwurfswahrscheinlichkeiten für PHBs müssen zwischen Betreibern aus Konsistenzgründen abgestimmt werden (noch offener Punkt)
- Basis für Dienste mit
  - zugesicherter Bandbreite unterhalb vereinbarter Senderate (Garantie)
  - Nutzung weiterer Bandbreite, falls diese verfügbar
  - bevorzugtem Verwerfen von Paketen oberhalb der vereinbarten Senderate bei Ressourcenmangel
  - stoßartigem Verkehr, längere Bursts haben höhere Verwurfswahrscheinlichkeit

Assured Forwarding PHB (3)

- Oberhalb zugesicherter Rate (gelb):
  - statistisches Multiplexing zwischen Flows
  - Flows sollten sich diese Bandbreite fair teilen
  - Protokolle mit Staukontrolle gefragt: TCP, SCTP, DCCP
- Praktisches Problem: Pakete mit höherer Verwurfswahrscheinlichkeit (z.B. gelb/rot) beeinflussen solche mit niedriger (grüne), da in gleicher Warteschlange einsortiert. Auswirkungen?

Realisierung des AF PHB mit RED

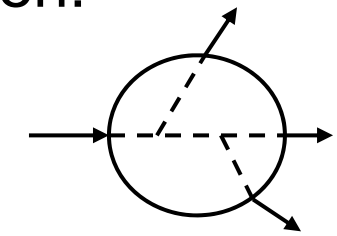
- Jeder Verwurfspriorität („Farbe“) werden andere RED-Parameter zugeordnet → Weighted RED



- Warteschlangenmanagement erhält Reihenfolge innerhalb einer AF-Klasse (nicht einfach möglich für mehrere Warteschlangen)

DiffServ-Bausteine: PDBs

- Per Domain Behavior (PDB): [RFC3086]
  - Per-Domain-Behavior beschreibt Verhalten, das Pakete auf ihrem Weg durch DS-Domäne erfahren:
    - beliebiger Eingang zu beliebigem Ausgang (One-to-One)
    - beliebiger Eingang zu jedem Ausgang (One-to-Any)
    - beliebiger Eingang zu bestimmten Ausgängen (One-to-Few)



  - Regeln zur Verkehrsbeeinflussung (Traffic Conditioning) und zu verwendende PHBs müssen angegeben werden
  - Berücksichtigung der Aggregationseffekte
  - Attribute, die PDB charakterisieren, messbar und quantifizierbar
  - „Vorstufe“ eines Dienstes

PDBs: Virtual Wire

- Nachbildung dedizierter physikalischer Leitung bestimmter Bandbreite
- Attribute:
  - garantierter Durchsatz
  - obere Schranke für Delay-Jitter
- Verkehrsbeeinflussung:
  - Strikte Überwachung (Policing) am Eingang (nicht-konforme Pakete verwerfen)
  - Shaping am Ausgang einer Domäne
- Ziel: Einhalten eines so genannten Jitter-Windows, so dass obere Jitter-Schranke garantiert wird
- Vorgehen: Verzögern des ersten Pakets um maximales Jitter-Window → Zeit zum Ausgleichen von Schwankungen wird gewonnen, aber: zusätzliche u.U. unnötige Verzögerung der Pakete
- basierte auf alter EF-PHB-Definition, daher überholt

PDBs: Assured Rate (1)

- Zugesicherte Rate wenn Sender bis zu dieser Rate (Committed Information Rate – CIR) sendet
- Attribute:
  - zugesicherte Rate
  - niedrige Verwurfswahrscheinlichkeit für ratenkonformen Verkehr
- keine Zusicherung von Delay- oder Jitter-Schranken
- Ausnutzung weiterer verfügbarer Bandbreite möglich (aber nicht garantiert)
- Zugesicherte Rate wird unabhängig vom Verkehrstyp (z.B. UDP/TCP) erbracht, Trennung von UDP/TCP möglich
- Nutzung einer AF-Klasse

PDBs: Assured Rate (2)

- Ermittlung und Anpassung an zusätzlich nutzbaren Bandbreitenanteil gut mit TCP möglich
- Verkehrsbeeinflussung:
  - Klassifizierung, Messen (genaue Methode muss spezifiziert werden) und Markieren am Eingang
  - Traffic Shaping am Eingang nicht notwendig
- Messmethoden für zugesicherte Rate „CIR“:
  - Committed Burst Size (CBS) über Zeitintervall T1
  - Peak Information Rate (PIR), Peak Burst Size (PBS), Excess Burst Size (EBS), ggf. weiteres Zeitintervall T2
- Markierung als „grün“, „gelb“ und „rot“:
  - Verwerfen roter Pakete am Eingang durch Überwacher (Policer) möglich
  - Verwerfen gelber Pakete erfolgt hingegen nicht durch Eingangsüberwachung (Ingress-Policer), sondern nur durch PHB-Mechanismus
  - Verwerfen grüner Pakete erst nachdem alle gelben und roten Pakete verworfen wurden

PDBs: Lower Effort (LE)

- RFC 3662 (Bless, Wehrle)  [RFC3662]
- Grundidee: Verkehrsklasse mit niedrigerer Priorität als Best-Effort zum Schutz der Best-Effort-Klasse (Q-Bone: Non-Elevated Services)
- Bei zunehmender Last wird LE von BE aus dem Netz verdrängt → prima, um Schutzkapazität zu füllen
- Im Unterschied zu normalem Best-Effort, darf Lower-Effort-Verkehr auch „verhungern“, d.h. es können sämtliche Pakete verworfen werden
- Alternativ kann auch eine Mindestbandbreite für das LE PDB vorgehalten werden

PDBs: Lower Effort (2)

- Anwendung
  - Werkzeug für Netzadmins, um Auswirkungen auf BE zu begrenzen, ohne Verkehr komplett aus dem Netz zu verbannen (z.B. File-Sharing etc.), „Penalty-Box“
  - aber: nicht als Ersatz für das Verwerfen bei unautorisiertem Verkehr gedacht
  - Ähnlich wie Hintergrundpriorität für Prozesse (nice)
- Extrem einfach zu konfigurieren (zwei Warteschlangen BE/LE, Strict Priority Scheduling zwischen diesen beiden)
  - Class Selector PHB 1 mit niedrigerer Priorität oder AF PHB → CS1 ist Problem → draft-ietf-tsvwg-le-phb
  - Kein Traffic Conditioning notwendig

Beispieldienste

- Anwendung Assured-Rate-basierter Dienste
  - Datenübertragung mit zeitlicher Obergrenze
  - Video-Playback: variable Bitrate, Jitter-Kompensation möglich
  - Kopplung virtueller privater Netze mit Mindestgarantie
- Anwendung Virtual-Wire-basierter Dienste
  - Kopplung virtueller privater Netze mit Qualität einer dedizierten Standleitung
  - Voice over IP
  - Interaktive (Audio/Video-) Anwendungen

Betreiberaspekte

- Notwendige Schritte beim Betreiber:
  - Auswahl der PHBs, ihrer Implementierung und deren Parameter, Verhältnis zu anderen PHBs festlegen (Ressourcen-Partitionierung)
  - Auswahl konkreter „Traffic Conditioning“-Mechanismen
  - SLA und „Traffic Conditioning Agreement“ mit anderen Betreibern und Kunden abstimmen
  - Routerkonfiguration (PHBs und Profile)
  - Messung und Überwachung der erreichten Qualität

DiffServ-Architektur – Management

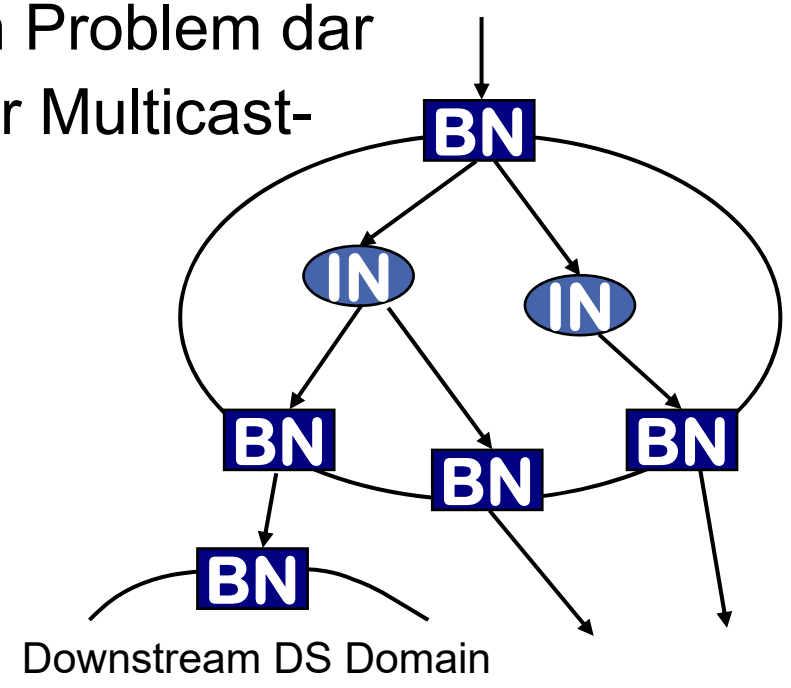
- Beispiel „Virtual Wire“:
  - Zugangskontrolle notwendig
- Dynamische Aushandlung von SLAs
  - Kunde ↔ ISP, ISP ↔ ISP
  - Automatische Einrichtung/Anpassung der Profile
- Managementeinheit: Bandwidth Broker (Van Jacobson)  [RFC2638]
  - Agent für das Bandbreitenmanagement pro Domäne
  - Bilaterale Dienstaushandlung (dynamische Dienstverträge)
  - Installation von Verkehrsprofilen in Grenz-Routern
  - Ursprünglich Einsatz im QBone (Internet-2) vorgesehen

DiffServ Management

- DiffServ Control Plane Elements
  - Welche Komponenten sind sinnvoll für ein Management einzusetzen?
    - z.B. Kommunikation mit Routern zwecks Installation von Verkehrsprofilen
  - Bislang aber kein Standardisierungsbedarf…
- Signalisierung: Nachfolger von RSVP in der IETF WG NSIS entwickelt
  Ansatz: 2-schichtige Architektur
  Transport/Signalisierungsanwendung
- Skalierbarkeit der Kontrollebene wichtig!

DiffServ-Architektur & Multicast

- Multicast: IP-Paket mit Multicast-Zieladresse (=Gruppenadresse) wird im Netz repliziert
- DiffServ-Mechanismen sind orthogonal zu Multicast-Mechanismen
  - Im Datenpfad stellt dies kein Problem dar
  - Dienstgüten werden auch für Multicast-Datenströme erbracht

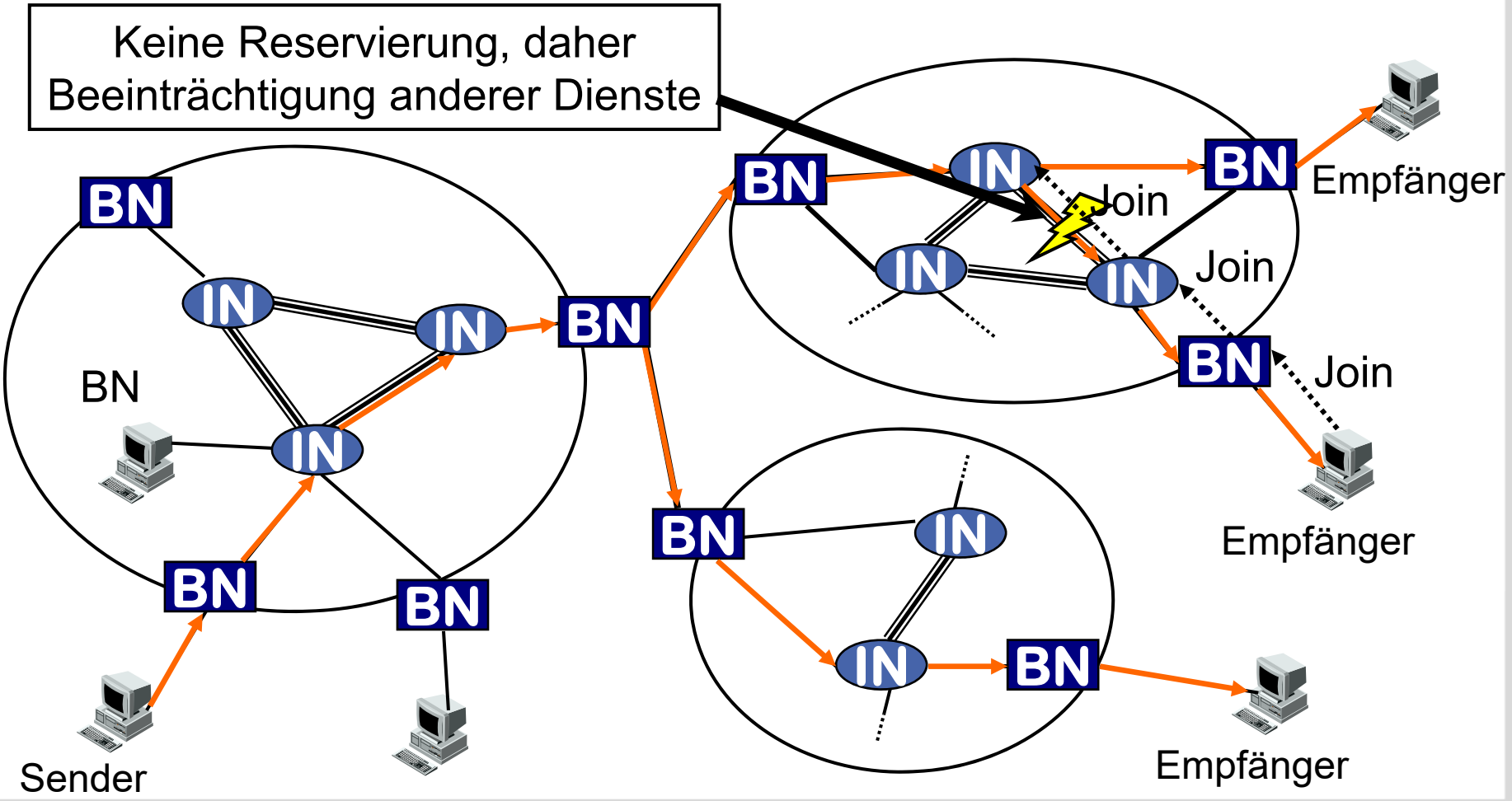


DiffServ & Multicast: Probleme (1)

- Probleme entstehen im Kontrollpfad durch die dynamische Gruppenzugehörigkeit  [RFC3754]
  - jeder kann sich einer Gruppe anschließen
  - es entstehen plötzlich „Verkehrsquellen“ im Netzinnern
  - u.U. können andere Teilnehmer in der Qualität ihres Dienstes beeinträchtigt werden (NRS-Problem)
- Empfänger haben unterschiedliche Anforderungen
  - Wie können heterogene Gruppen unterstützt werden?
- Wechselnde Sender
  - Prinzipiell kann jeder Rechner Daten an eine Gruppe schicken
  - Welche erhalten Dienstgüte?

DiffServ & Multicast: Probleme (2)

- Neglected Reservation Subtree Problem (NRS-Problem)



NRS Problem

- NRS-Problem entsteht sobald neuer Zweig im Multicast-Baum entsteht, für den
  - ankommende Pakete für ein besseres PHB markiert wurden
  - noch keine Zugangskontrolle durchgeführt wurde
  - damit unkontrolliert Ressourcen verbraucht werden
- Das heißt aber auch sobald RSVP verwendet wird:
  - vor Reservierung mit RSVP muss der Empfänger PATH-Nachrichten empfangen
    - damit er RESV-Nachrichten schicken kann
  - PATH-Nachrichten werden per Multicast verteilt
    - der Empfänger muss der Multicast-Gruppe beitreten
    - NRS-Problem entsteht, falls PATH-Nachrichten nicht speziell gefiltert werden

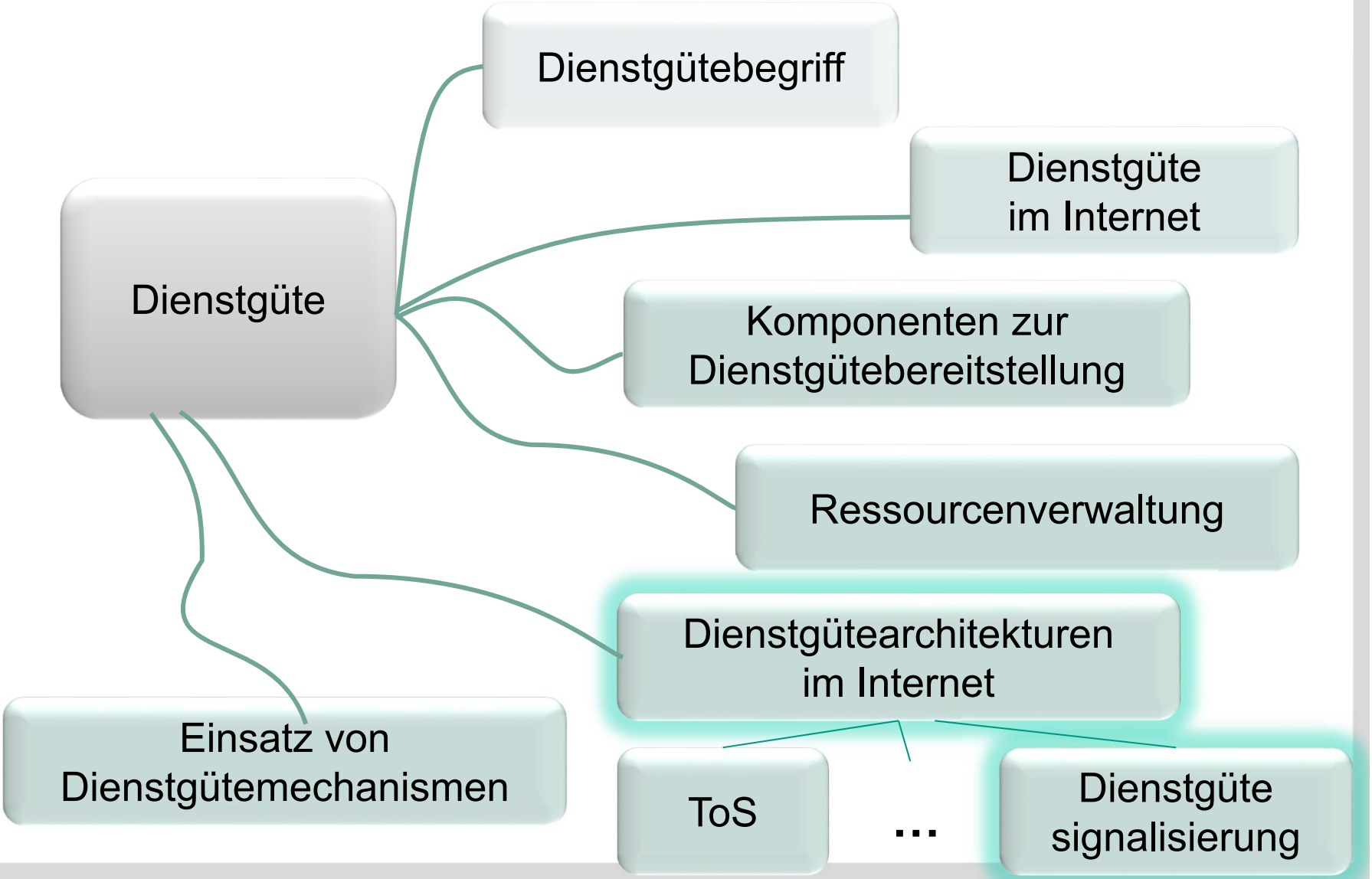
DiffServ-Multicast Lösung

- Vorschlag zur Lösung des Problems durch das ITM
  - Ergänzen der Multicast-Routing-Tabelle um einen Eintrag (neuer Codepoint)
  - bei neuen Gruppenmitgliedern wird der Codepoint zunächst auf Best-Effort umgesetzt
  - nur bei Reservierung der Bandbreite wird der Codepoint des besseren Dienstes gesetzt
  - Diese Lösung ermöglicht die Verwendung von RSVP und erlaubt ein "Schnuppern" in eine Gruppe, d.h. Empfangen der Daten mit Best-Effort

Differentiated-Services vs. Integrated-Services

	Best-Effort	Integrated-Services	Differentiated Services
QoS-Garantie	keine	pro Datenstrom (Microflow)	für aggregierte Datenströme
Konfiguration	keine	pro Datenstrom bzw. Sitzung	pro Aggregat zwischen Domänen
Typ der Garantie	keine	individuell per Datenstrom	aggregiert
Dauer der Garantie	keine	kurzlebig (Sitzungsdauer)	langfristig(er)
Zustandshaltung	keine	pro Datenstrom	pro aggregierter Reservierung
Signalisierung	keine	RSVP	Keine, bzw. noch nicht definiert
Multicast-Unterstützung	IP-Multicast	empfänger-orientiert, heterogen	IP-Multicast, aber Ressourcen-Reservierungs-probleme

Überblick


Dienstgütebegriff
Dienstgüte im Internet
Dienstgüte
Komponenten zur Dienstgütebereitstellung
Ressourcenverwaltung
Dienstgütearchitekturen im Internet
Einsatz von Dienstgütemechanismen
ToS
...
Dienstgüte signalisierung

Dienstgütesignalisierung

- „Signalisierung“: Austausch von Daten zwischen Knoten, um Zustände in Netzknoten einzurichten, zu verwalten oder zu löschen

- Beispiele:
  - Klassisch: SS7 – Zeichengabe zur Leitungsvermittlung
  - Zugangskontrolle und Ressourcenreservierung für Dienstgüte (Quality-of-Service) → RSVP
  - Dynamische Konfiguration von Firewall-Löchern oder NAT Bindings
  - Dynamische Etablierung von Messpunkten

RSVP-Probleme

- RSVP hauptsächlich für Multicast ausgelegt
  - Per-Flow, Zusammenlegen von Reservierungen, …
  - Einfacher Transport über IP oder UDP → Einschränkungen, z.B. Nachrichtengröße
  - Kaum Verbreitung von Multicast, Unicast dominiert
- RSVP-Erweiterungen zur Leistungssteigerung: Zuverlässigkeit, Summary Refreshes, Bündeln, usw.
- RSVP-TE für MPLS (im breiten Einsatz)
- Fehlende Berücksichtigung mobiler Knoten

Next Steps in Signaling (NSIS)

Signalisierung im Internet:

Router, Ressourcen in der IP-Schicht

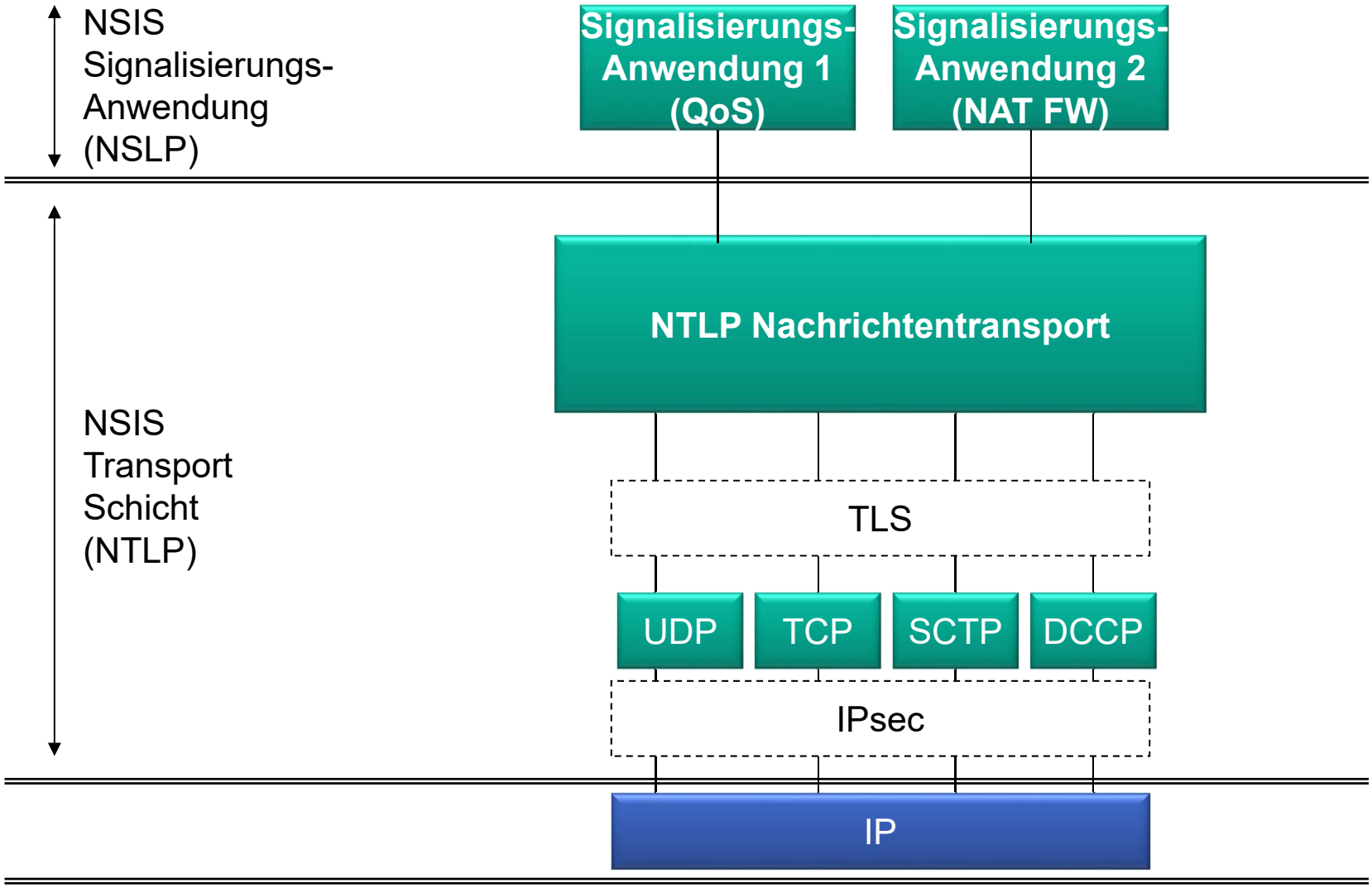
Entwicklungsziele:

- Interworking zwischen verschiedenen QoS-Lösungen
- Unterstützung von Mobilität und drahtlosen Netzen der nächsten Generation
- Vereinfachte Lösung zur QoS-Signalisierung
- Wiederverwendung von Teilen existierender Lösungen, vorhandene IETF Signalisierungsprotokolle sollen als Basis dienen

NSIS

- NSIS Requirements  [RFC3726]
- Aus RSVP-Erfahrung gelernt:
  - RSVP bietet keine effiziente Unterstützung von Unicast-Reservierungen
  - Einsatz in sehr unterschiedlichen Umgebungen, war bei Definition noch nicht vorhersehbar
- Weitere Annahmen:
  - Pfad-gekoppelte Signalisierung:
    Signalisierungsnachrichten folgen Datenpfad
  - Normales Routing (kein QoS Routing oder Load Balancing etc.)
  - Keine Multicast(!)-Unterstützung

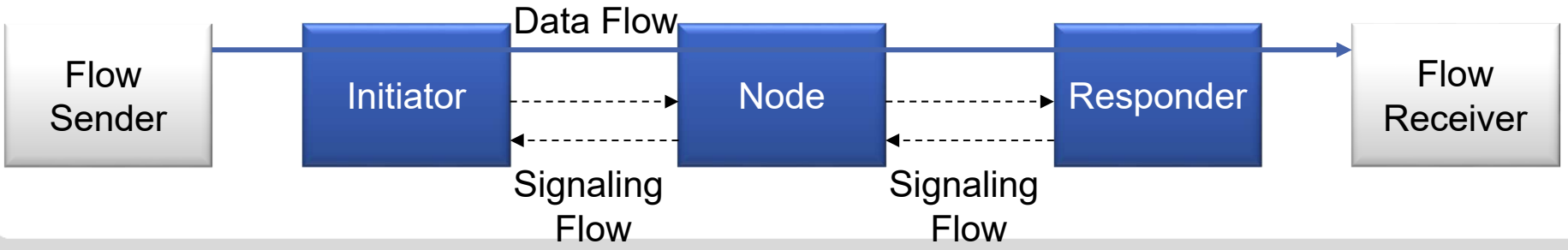
NSIS: Aufteilung in zwei Schichten



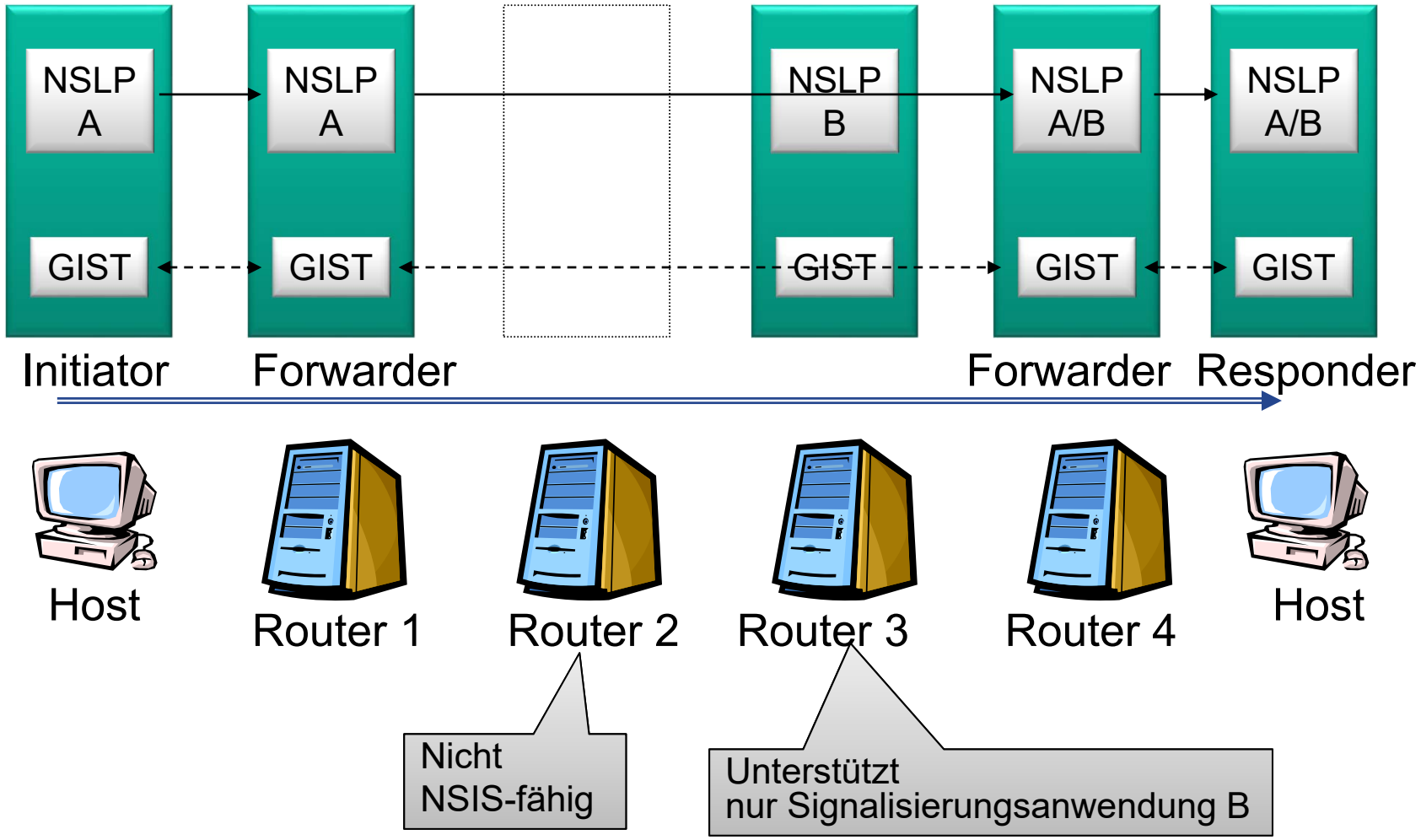
NTLP: GIST Eigenschaften

General Internet Signaling Transport (GIST) [RFC5971]

- Gemeinsamer Signalisierungstransportdienst für verschiedene Signalisierungsanwendungen
- Einfacher Nachricht-für-Nachricht-Übertragungsdienst (Inhalt ist transparent für GIST)
- Aufspüren und Management von Routen für Signalisierungsnachrichten (Installation von NSIS-Routing-Information)
- Etablierung von Signalisierungsnachrichtenassoziationen (Soft-State)
- Einfacher Schutz gegen DoS beim Aufsetzen einer Assoziation



NTLP Szenario



NTLP-Nachrichten

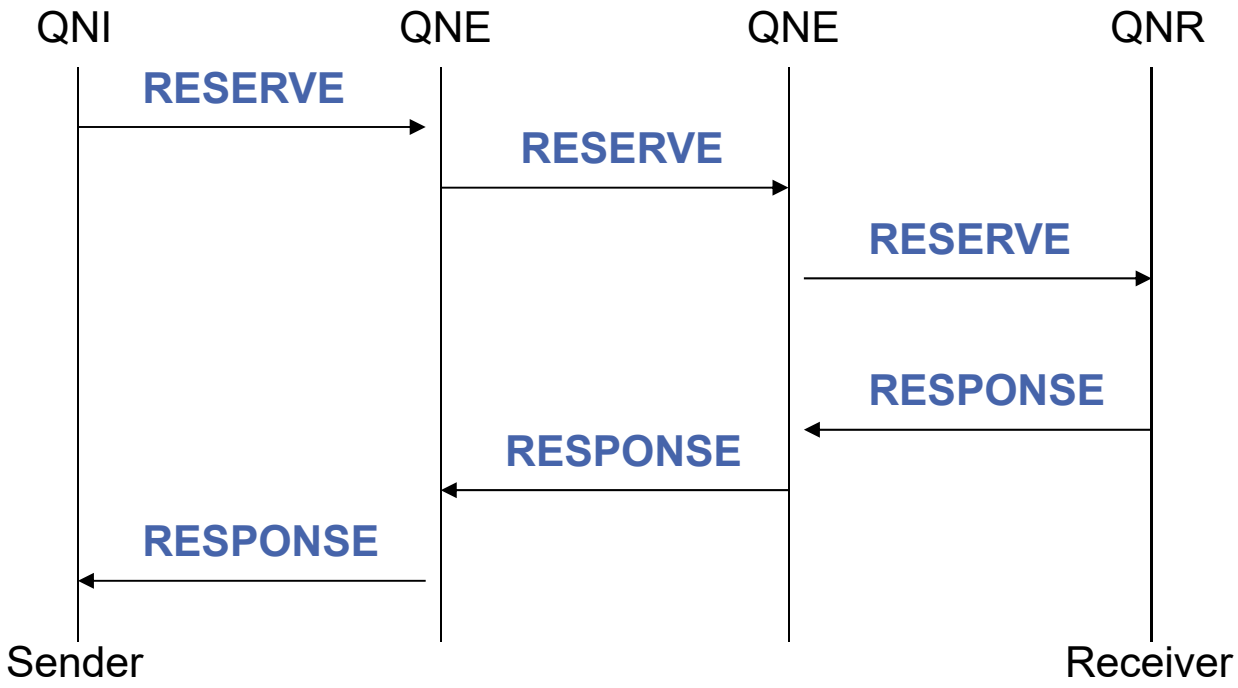
- Router Alert Option zum Abfangen von Signalisierungsnachrichten, d.h. NSIS-fähige Knoten erkennen und verarbeiten NSIS-Nachrichten → praktische Probleme mit RAO-Nutzung
- Gemeinsamer Kopf und TLV (Type-Length-Value) Kodierung
- Query/Response/(Confirm)
  - Auffinden einer Route
  - Mit optionalen Cookies beim Assoziationsaufbau
  - Zum Auffrischen von Zuständen
  - Aushandlung von Transportprotokollen
- MA Hello
  - Zum Aufrechterhalten von längerfristigen Verbindungen

QoS NSLP

- Ähnliche Funktionalität wie RSVP (aber unterstützt nur Unicast)  [RFC5974]
- Unabhängigkeit von spezifischen QoS-Modellen wie IntServ oder DiffServ
- Nachrichten:
  - RESERVE: erzeugt, verändert oder löscht einen Reservierungszustand
  - QUERY: versuchsweise Anfrage (Probing)
  - RESPONSE: Antwort auf RESERVE oder QUERY

QoS NSLP Beispiel

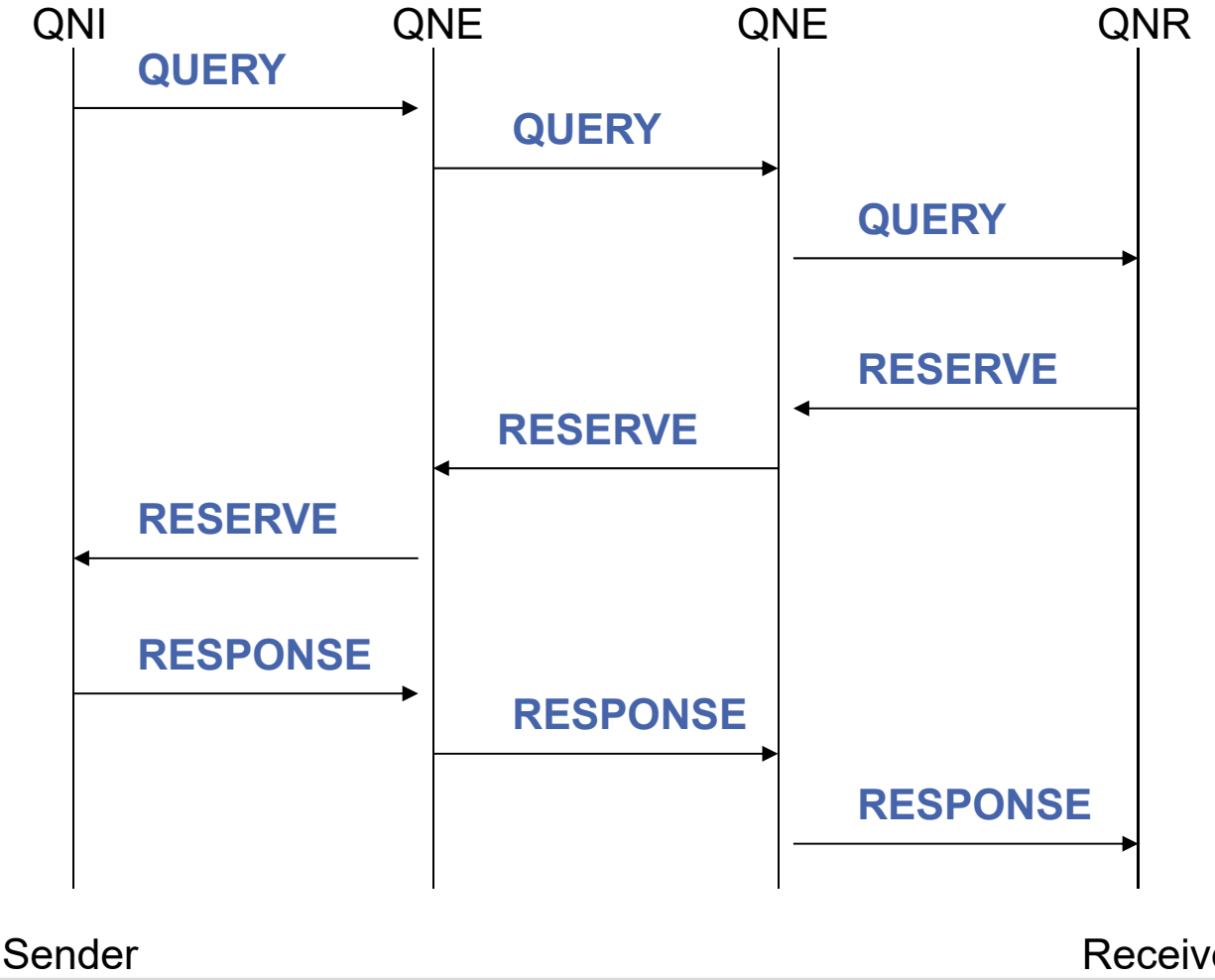
- Sender-initiierte Reservierung:



QNI: QoS NSLP Initiator
QNE: QoS NSLP Entity
QNR: QoS NSLP Responder

QoS NSLP – Bsp. für empf.-initiierte Reservierung

- Empfänger-initiierte Reservierung:



QoS-NSLP QSPEC Template

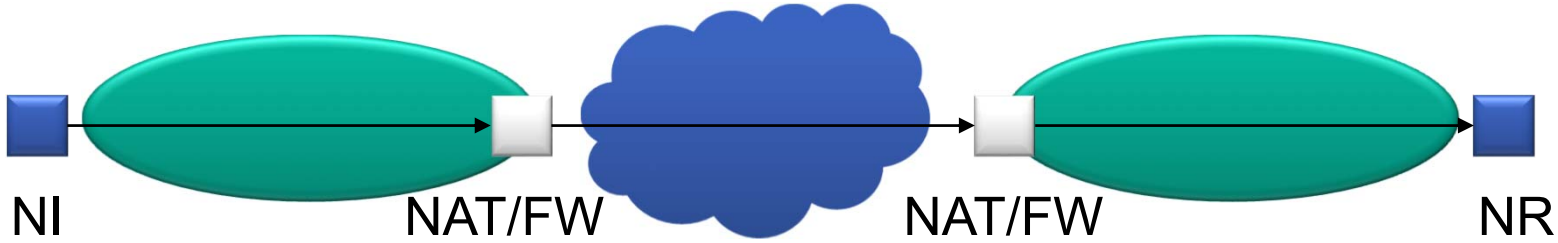
[RFC5975]

- Allgemeine Darstellung von QoS Parametern
- Verkehrsbeschreibung und einzuhaltende Grenzen
- Verkehrsbeschreibung durch Traffic Model
  - rate (r)
  - bucket size (b)
  - peak rate (p)
  - minimum policed unit (m)
- Einzuhaltende Grenzen: <Path Latency>, <Path Jitter>, <Path PLR> und <Path PER>
  - PLR: Packet Loss Ratio
  - PER: Packet Error Ratio
- Einhaltung d. Grenzen kann durch beliebiges QoS Model realisiert werden

NAT/FW NSLP

[RFC5973]

- Firewalls und NAT-Gateways erschweren Kommunikation für zahlreiche Anwendungen
- Aufgabe NAT/FW NSLP: Dynamische Konfiguration von NATs und/oder Firewalls entlang des Datenpfads
  - Etablierung eines Bindings
  - Gezieltes Öffnen der Firewalls

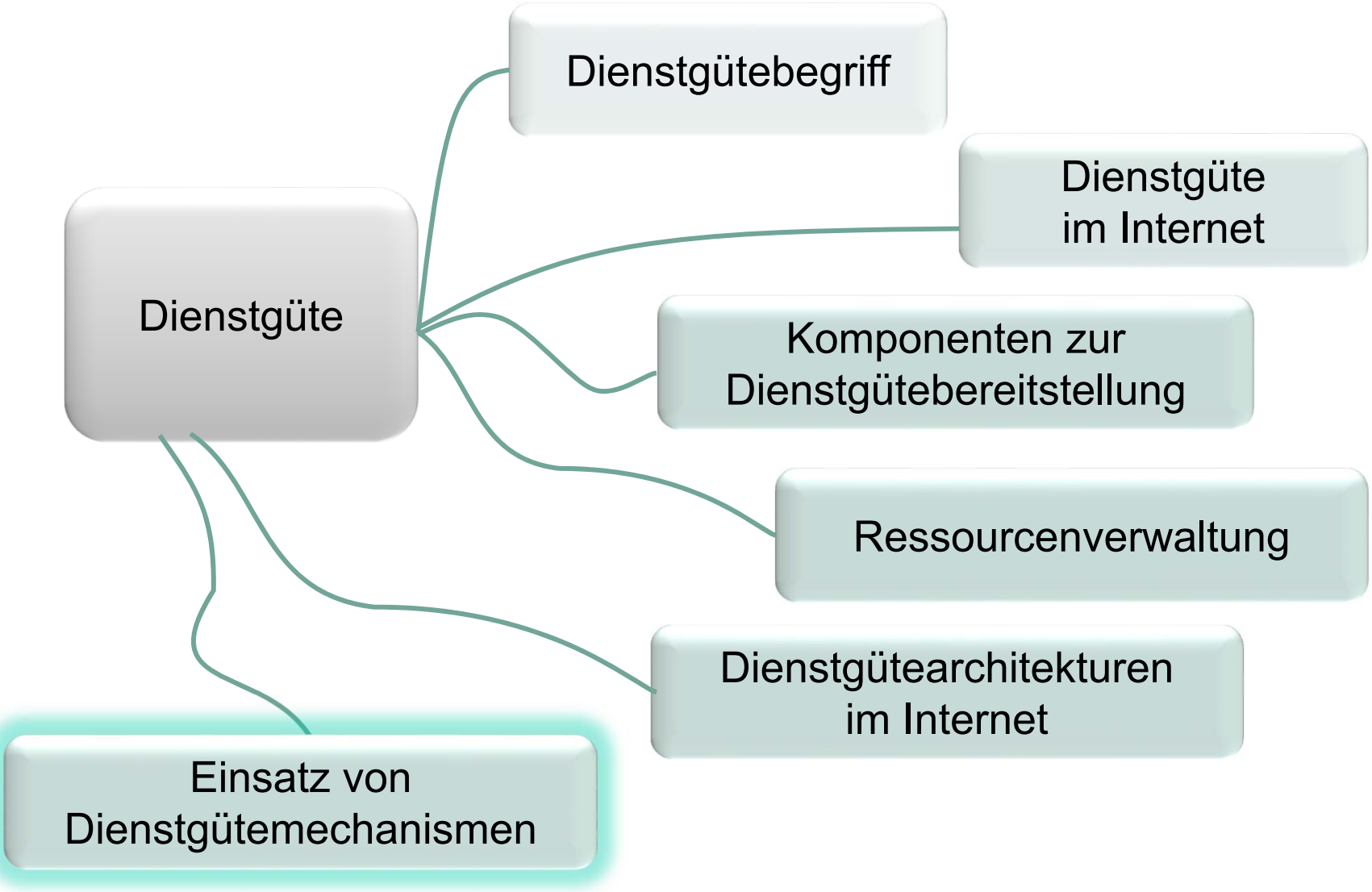


NSIS-ka: Implementierung des KIT

Implementierte Protokolle:

- GIST (UDP, TCP, TLS/TCP, SCTP), IPv4 + IPv6
- QoS NSLP + QSPEC Template
  - + Multicast-Erweiterungen
  - + Mobilitätserweiterungen
- NAT/FW NSLP
- Session Authorization Object  [RFC5981]
- C++-basiert
- Multi-threaded
- Linux
- Frei verfügbar http://nsis-ka.org/

Überblick


Dienstgütebegriff
Dienstgüte im Internet
Dienstgüte
Komponenten zur Dienstgütebereitstellung
Ressourcenverwaltung
Dienstgütearchitekturen im Internet
Einsatz von Dienstgütemechanismen

Einsatz von Dienstgütemechanismen

- Einige Betreiber (u.a. Sprint) stehen auf dem Standpunkt, dass Sie keine Dienstgüteunterstützung benötigen:
  - Sorgfältig dimensioniertes Netz garantiert niedrige Auslastung („Overprovisioning“) und max. Verzögerung
  - Netzdurchleitung ohne Paketverluste und mit Delay-Garantie
- Heutige Produkte verfügen standardmäßig über DiffServ-Mechanismen, größere Betreiber nutzen diese auch (aber: DSCP-Bleaching)
- Einsatz v. DiffServ-Mechanismen am Rand in Zugangsnetzen spart ggf. Kosten

DiffServ Service Classes (1)

- Vorschlag zwölf verschiedene DiffServ-basierte Dienstklassen bereitzustellen  [RFC4594] (inklusive Konfigurationshinweisen):
- Zwei Dienstklassen zur Netzsteuerung
  - Network Control: Routing und Netzwerksteuerung → CS 6
  - OAM (Operations, Administration and Management): Netzwerkkonfiguration und -Management → CS 2 (SR-BS)
- Zehn Nutzerdienstklassen (s. nächste Folie)

DiffServ Service Classes (2)

- Nutzerdienstklassen:
  - Telefon → EF m. Single Rate, Burst Size Token Bucket Control (SR-BS)
  - Signalisierung → CS 5 (SR-BS)
  - Multimediakonferenz → AF41,42,43 mit Two-Rate Three Color Marker
  - Echtzeit-Interaktiv (interaktiv, variable Rate, niedriger Jitter, niedriger Verlust, sehr niedrige Verzögerung) → CS 4 (SR-BS)
  - Multimedia Streaming (Variable Rate) → AF31,32,33 mit Two-Rate TCM
  - Broadcast Video → CS 3 (SR-BS)
  - Niedrige Verzögerung → AF21,22,23 mit Single-Rate TCM
  - Hoher Durchsatz → AF11,12,13 mit Two-Rate TCM
  - Standard (Best-Effort) → Default-PHB
  - Niedrige Priorität → CS 1  [RFC3662]

Aktuelles Problem fehlender Standards

- „Real time communications in the web browser“ (webRTC/RTCweb) fordert QoS-Unterstützung im Internet
  - Ansatz soll so einfach wie möglich sein → Verzicht auf Signalisierungslösungen
  - Idee: Endsystem setzt DSCP passend zur Anwendung
- Problem:
  - Keine klaren Zuordnungen DSCP → PHB
  - Unklar, ob Betreiber Markierung honorieren
  - DSCP Bleaching: ohne Absprache werden DSCPs auf Default PHB zurückgesetzt

Übungen (1)

4.0 Welches sind die grundlegenden Mechanismen, die man zur Bereitstellung einer Dienstgüteunterstützung benötigt?

4.1 Welche Funktion hat ein Scheduler?

4.2 Mit welchen Scheduling-Verfahren lassen sich QoS-Garantien erreichen

4.3 Wie bestimmt WFQ die Bedienreihenfolge der Pakete?

4.4 Welche Vorteile hat WFQ gegenüber gewichtetem Round-Robin?

4.5 Welchen Vorteil hat ein EDF-Scheduler gegenüber einem FWQ-Scheduler für die Zusicherung einer maximalen Verzögerung?

4.6 Berechnen Sie die Max-min Fair Share der Datenströme A, B, C, D und E mit Anforderungen der Größe 2, 3, 4, 4, 5 bei einer Kapazität von 15.

4.7 An einem Scheduler mit Fair Queueing kommen Dateneinheiten der Länge 100 bzw. 200 Bit der Datenströme A und B an. Die Datenrate der abgehenden Leitung betrage100 Bit/s. Zu welchem Zeitpunkt sind die beiden Dateneinheiten bedient? Welche Rundenzahl ist erreicht nach Ende der Bedienung der Dateneinheiten?

Übungen (2)

4.8 Was versteht man unter Traffic Conditioning?

4.9 Erläutern Sie anhand der Weiterleitung eines Pakets wie die grundlegenden DiffServ-Mechanismen funktionieren.

4.10 Welche prinzipiellen Unterschiede existieren zwischen DiffServ und IntServ?

4.11 Welches PHB eignet sich besonders gut für VoIP? Begründen Sie!

4.12 Was sind die Unterschiede zwischen einem PHB und einem PDB?

4.13 Für welches PHB ist Zugangskontrolle eine notwendige Voraussetzung?

4.14 Worin unterscheiden sich Zugangskontrolle und Policing?

Literatur (1)

- Bücher zum Thema QoS
  - G. Armitage: „Quality of Service in IP Networks“, Macmillan Technical Publishing, 2000
  - K. Kilkki: „Differentiated Services for the Internet“, Macmillan Technical Publishing, 1999
  - B. Peterson, B. Davie: Computer Networks, Morgan Kaufmann, 2003, 3rd Ed., Kap. 6.1 (Ressourcen), 6.2 (Scheduling/Queuing), 6.5 (QoS)
  - J.F. Kurose, K.W. Ross; Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring the Internet. Pearson, 2013, 6th Edition, ISBN 978-0-273-76896-8, Kap. 7.6–7.9 (QoS, Scheduling, DiffServ/IntServ, RSVP)
  - S. Keshav: „An Engineering Approach to Computer Networking“, Addison Wesley, Kap. 9 zu Scheduling
  - J. Liu: „Real-time systems“, Prentice Hall, 2000, zu Scheduling allgemein

Literatur (2)

- Z. Wang: „QoS – Architectures and Mechanisms for Quality of Service“, Morgan Kaufmann, 2001

- Papers
  - A. Demers, S. Keshav, S. Shenker: „Analysis and simulation of a fair queueing algorithm“, Proceedings of the ACM SIGCOMM 1989, http://dl.acm.org/citation.cfm?id=75248 (zugreifbar innerhalb der Universität)

Literatur (3)

[FlJa93] Floyd, S., and Jacobson, V., Random Early Detection gateways for Congestion Avoidance, IEEE/ACM Transactions on Networking, V.1, N.4, August 1993, pp. 397-413. Also available from http://ftp.ee.lbl.gov/floyd/red.html

[JaHC84] R. Jain, W. Hawe, D. Chiu, "A Quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in Shared Computer Systems", DEC-TR-301, September 26, 1984

[JGKT03] Ping Ji, Zihui Ge, Jim Kurose, Don Towsley, A Comparison of Hard-state and Soft-state Signaling Protocols, Proceedings of ACM SIGCOMM 2003, http://www.acm.org/sigs/sigcomm/sigcomm2003/papers/p251-ji.pdf

[GoJS03] J. Gozdecki, A. Jajszczyk, R. Stankiewicz, Quality of service terminology in IP networks, Communications Magazine, IEEE, Mar 2003, Vol. 41 No. 3, p.153 – 159, Doi: 10.1109/MCOM.2003.1186560

[GeNi11] J. Gettys, K. Nichols: Bufferbloat: Dark Buffers in the Internet. ACM Queue, Vol. 9, Issue 11, pp. 40–54, Nov. 2011. http://queue.acm.org/detail.cfm?id=2071893

Literatur (4)

[LAJS03] Long Le, Jay Aikat, Kevin Jeffay, F. Donelson Smith, The Effects of Active Queue Management on Web Performance, Proceedings of ACM SIGCOMM 2003, http://www.acm.org/sigs/sigcomm/sigcomm2003/papers/p265-le.pdf

[McJV96] S. McCanne, V. Jacobson, and M. Vetterli, "Receiver-driven Layered Multicast", SIGCOMM '96, August 1996, pp. 117-130.

[McKe90] P. E. McKenney, "Stochastic fairness queueing," Proceedings of INFOCOM '90, IEEE , pp.733–740, vol.2, June 1990

[NiJa12] K. Nichols, V. Jacobson. Controlling Queue Delay. ACM Queue, Networks, Vol. 10 No. 5 , May 2012, http://queue.acm.org/detail.cfm?id=2209336

[RFC 791] J. Postel. Internet Protocol. RFC 791 (Standard), September 1981. Updated by RFC 1349. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc791.txt

[RFC 2205] R. Braden, L. Zhang, S. Berson, S. Herzog und S. Jamin. Resource ReSerVation Protocol (RSVP) Version 1 Functional Specification. RFC 2205 (Proposed Standard), September 1997. Updated by RFCs 2750, 3936, 4495. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc2205.txt

Literatur (5)

[RFC 2208] A. Mankin, F. Baker, B. Braden, S. Bradner, M. O'Dell, A. Romanow, A. Weinrib und L. Zhang. Resource ReSerVation Protocol (RSVP) Version 1 Applicability Statement Some Guidelines on Deployment. RFC 2208 (Informational), September 1997. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc2208.txt

[RFC 2210] J. Wroclawski. The Use of RSVP with IETF Integrated Services. RFC 2210 (Proposed Standard), September 1997. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc2210.txt

[RFC 2215] S. Shenker, J. Wroclawski. General Characterization Parameters for Integrated Service Network Elements. RFC 2215 (Proposed Standard), September 1997. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc2215.txt

[RFC 2212] S. Shenker, C. Partridge und R. Guerin. Specification of Guaranteed Quality of Service. RFC 2212 (Proposed Standard), September 1997. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc2212.txt

[RFC 2386] E. Crawley, R. Nair, B. Rajagopalan und H. Sandick. A Framework for QoS-based Routing in the Internet. RFC 2386 (Informational), August 1998. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc2386.txt

Literatur (6)

[RFC 2474] K. Nichols, S. Blake, F. Baker und D. Black. Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers. RFC 2474 (Proposed Standard), Dezember 1998. Updated by RFCs 3168, 3260. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc2474.txt

[RFC 2475] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang und W. Weiss. An Architecture for Differentiated Service. RFC 2475 (Informational), Dezember 1998. Updated by RFC 3260. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc2475.txt

[RFC 2598] V. Jacobson, K. Nichols und K. Poduri. An Expedited Forwarding PHB. RFC 2598 (Proposed Standard), Juni 1999. Obsoleted by RFC 3246. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc2598.txt

[RFC 2638] K. Nichols, V. Jacobson und L. Zhang. A Two-bit Differentiated Services Architecture for the Internet. RFC 2638 (Informational), Juli 1999. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc2638.txt

[RFC 3086] K. Nichols und B. Carpenter. Definition of Differentiated Services Per Domain Behaviors and Rules for their Specification. RFC 3086 (Informational), April 2001. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc3086.txt

Literatur (7)

[RFC 3246] B. Davie, A. Charny, J.C.R. Bennet, K. Benson, J.Y. Le Boudec, W. Courtney, S. Davari, V. Firoiu und D. Stiliadis. An Expedited Forwarding PHB (Per-Hop Behavior). RFC 3246 (Proposed Standard), Marz 2002. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc3246.txt

[RFC 3247] A. Charny, J. Bennet, K. Benson, J. Boudec, A. Chiu,W. Courtney, S. Davari, V. Firoiu, C. Kalmanek und K. Ramakrishnan. Supplemental Information for the New Definition of the EF PHB (Expedited Forwarding Per-Hop Behavior). RFC 3247 (Informational), März 2002. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc3247.txt

[RFC 3662] R. Bless, K. Nichols und K. Wehrle. A Lower Effort Per-Domain Behavior (PDB) for Differentiated Services. RFC 3662 (Informational), Dezember 2003. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc3662.txt

[RFC 3726] M. Brunner. Requirements for Signaling Protocols. RFC 3726 (Informational), April 2004. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc3726.txt

Literatur (8)

[RFC 3754] R. Bless und K. Wehrle. IP Multicast in Differentiated Services (DS) Networks. RFC 3754 (Informational), April 2004. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc3754.txt

[RFC 4594] J. Babiarz, K. Chan und F. Baker. Configuration Guidelines for DiffServ Service Classes. RFC 4594 (Informational), August 2006. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc4594.txt

[RFC 5971] H. Schulzrinne und R. Hancock. GIST: General Internet Signalling Transport. RFC 5971 (Experimental), Oktober 2010. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc5971.txt

[RFC 5973] M. Stiemerling, H. Tschofenig, C. Aoun und E. Davies. NAT/Firewall NSIS Signaling Layer Protocol (NSLP). RFC 5973 (Experimental), Oktober 2010. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc5973.txt

[RFC 5974] J. Manner, G. Karagiannis und A. McDonald. NSIS Signaling Layer Protocol (NSLP) for Quality-of-Service Signaling. RFC 5974 (Experimental), Oktober 2010. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc5974.txt

Literatur (9)

[RFC 5975] G. Ash, A. Bader, C. Kappler und D. Oran. QSPEC Template for the Quality-of-Service NSIS Signaling Layer Protocol (NSLP). RFC 5975 (Experimental), Oktober 2010. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc5975.txt

[RFC 5981] J. Manner, M. Stiemerling, H. Tschofenig und R. Bless. Authorization for NSIS Signaling Layer Protocols. RFC 5981 (Experimental), Februar 2011. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc5981.txt

[ShVa96] M. Shreedhar, G. Varghese: Efficient fair queuing using deficit round-robin, IEEE/ACM Transactions on Networking, vol.4, no.3, pp.375,385, June 1996, doi: 10.1109/90.502236,

[StJC11] R. Stankiewicz, P. Cholda, A. Jajszczyk, QoX: What is it really? Communications Magazine, IEEE, April 2011 Vol. 49 No. 4, pp. 148 – 158, DOI: 10.1109/MCOM.2011.5741159

[ZhLW03] Z. Heying, L. Baohong, D. Wenhua, Design of a Robust Active Queue Management Algorithm Based on Feedback Compensation, Proceedings of ACM SIGCOMM 2003, http://www.acm.org/sigs/sigcomm/sigcomm2003/papers/p0802-zhang.pdf