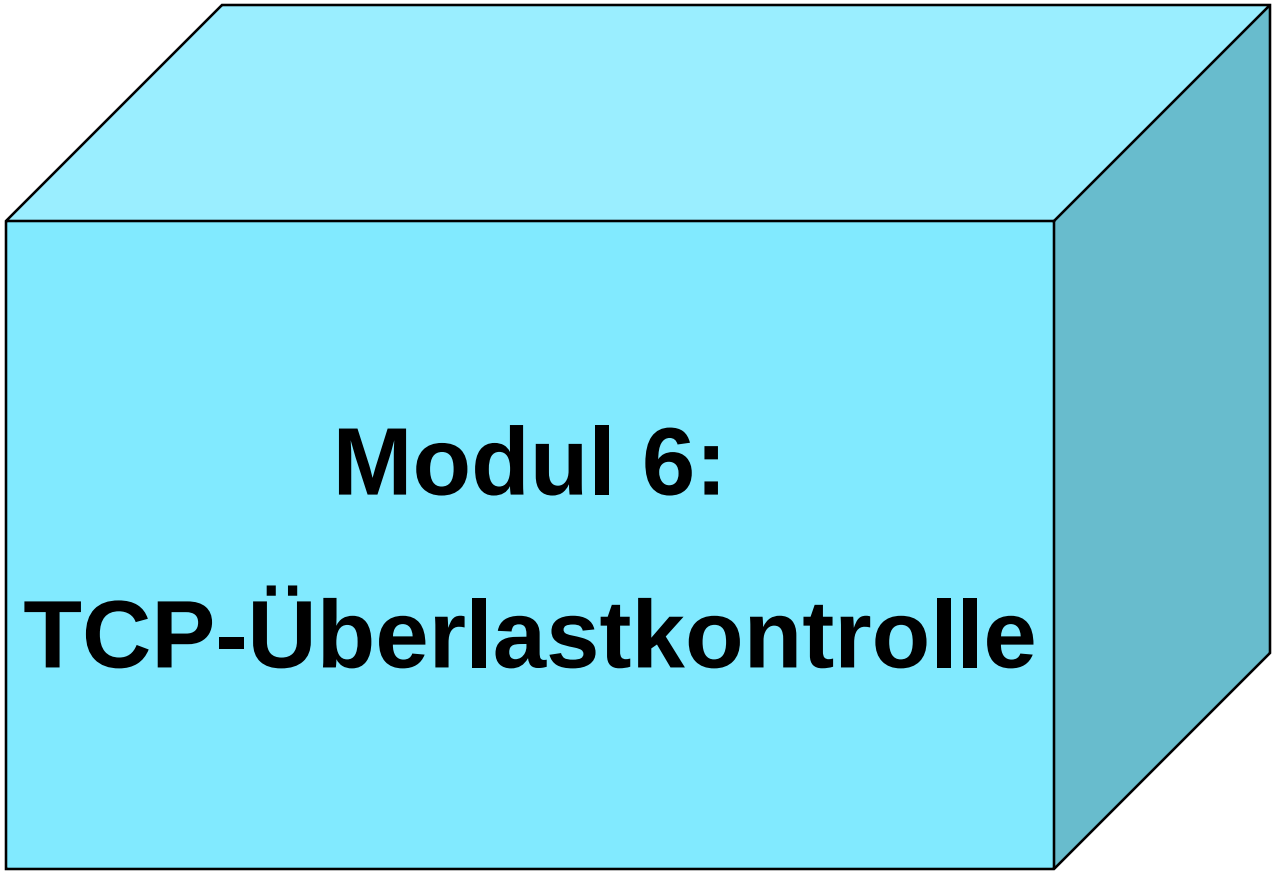
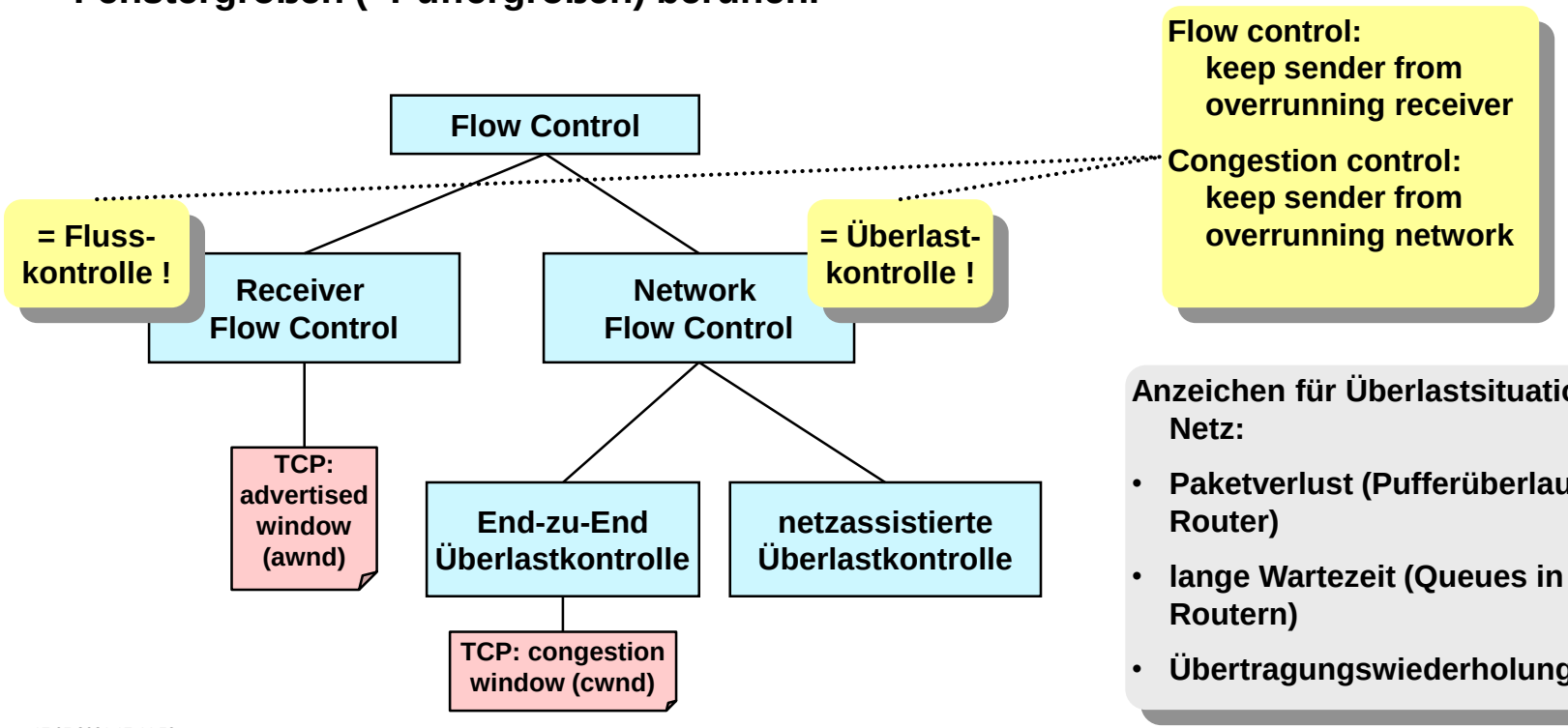


Begriffsklärung: Überlast- und Flusskontrolle

Definition (vgl. Steven Low)

- **Mit *Flusskontrolle* werden (oft, aber nicht immer) alle Methoden zur effizienten Nutzung der Bandbreite (eines verbindungslosen Netzes) bezeichnet.**
- **Mit *Fenster-Flusskontrolle* bezeichnen wir Flusskontrollmechanismen, die auf Fenstergrößen (=Puffergrößen) beruhen.**



Anzeichen für Überlastsituationen im Netz:

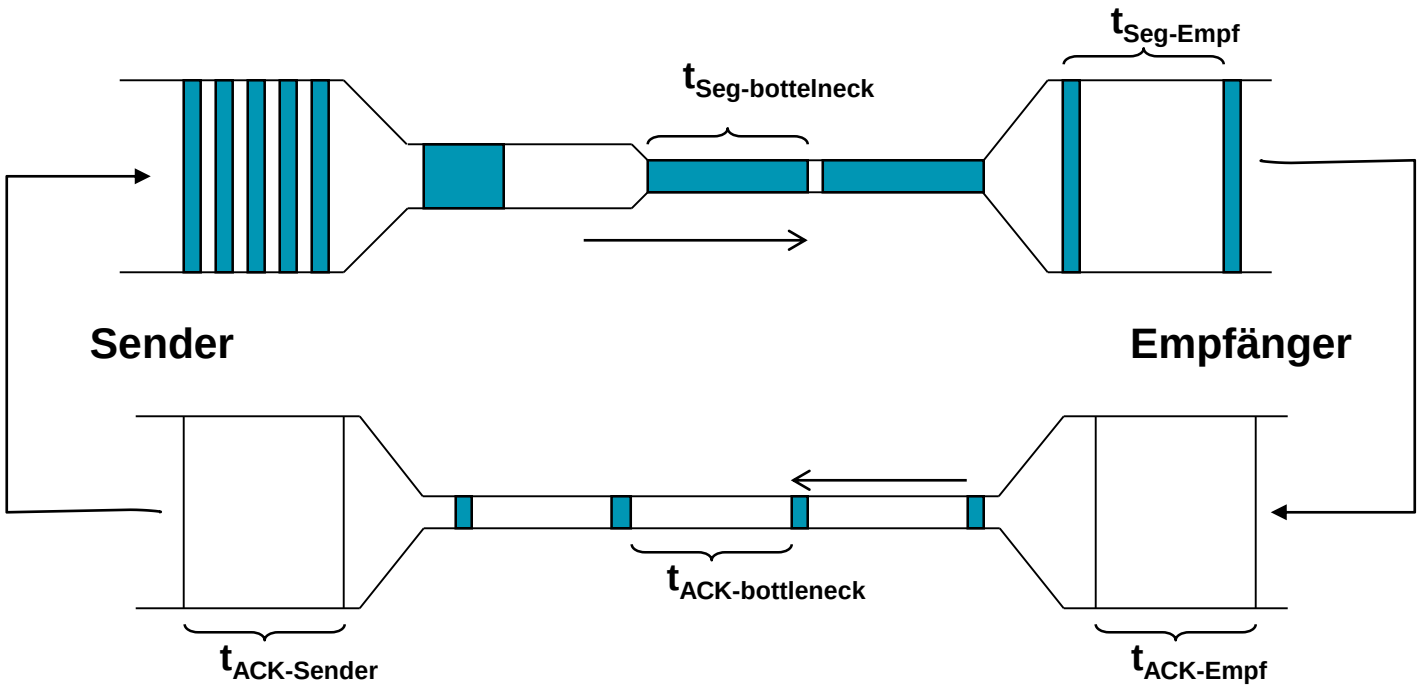
- **Paketverlust (Pufferüberlauf Router)**
- **lange Wartezeit (Queues in den Routern)**
- **Übertragungswiederholungen**

Prinzip: Self-Clocking

Equilibrium durch "Conservation of Packets" (robust gegen congestion collapse)

- **Problem 1: Erreichen eines Equilibriums**
- **Problem 2: Schneller Übergang zu neuem Equilibrium bei Änderungen der Netzauslastung („Konvergenz“)**
- **Problem 3: Stabilität bei Netzstörungen und Netzverzögerungen**

} dynamische Eigenschaften



TCP Selfclocking –> Anpassung der Ü-Rate auf langsamsten Verbindungsteil

Kernfrage Congestion Avoidance:

Wie wird Equilibrium sichergestellt?

TCP-Überlastkontrolle

TCP versucht durch Überlastkontrolle zu erreichen:

(1) eine hohe Nutzung des Netzes (–> hohes Equilibrium)

(2) möglichst keine Überlast (–> stabiles Equilibrium)

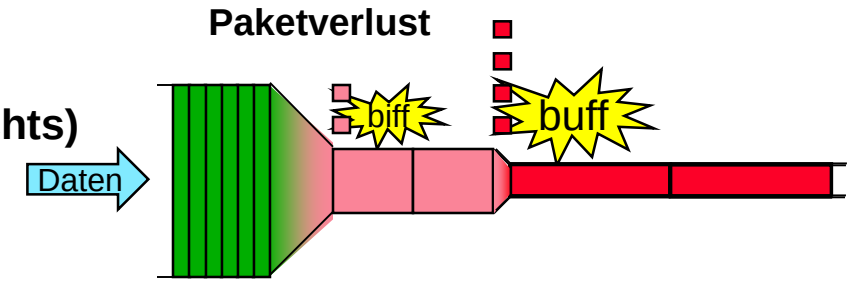
(3) gerechte Aufteilen der verfügbaren Bandbreite (–> gerechtes Equilibrium)

TCP verwendet hierfür zwei Flusskontrollmechanismen:

- **Receiver Flow Control**
  - **Vermeidung der Überlast beim Empfänger**
  - **Gesteuert durch den Empfänger**
  - **Verwendete Fenstergröße: AdvertisedWindow (awnd)**
- **Network Flow Control**
  - **Gewinne Information über Belastbarkeit des Netzes (Verlust, Verzögerung, Hinweise) –> (1)**
  - **Vermeide Überlastung des Netzes –>(2)**
  - **Gesteuert durch den Sender**
  - **Verwendete Fenstergröße: CongestionWindow (cwnd)**

Effektiv verwendetes Fenster: wnd = min(awnd, cwnd)

Kritische Phasen, Equilibrium und Algorithmen



Start der TCP-Übertragung

- **Slow Start (Aufbau eines Gleichgewichts)**

Erhalt des Gleichgewichts

- **Einstellung des RTOs (Jacobson/Karel Algorithmus)**
- **Maximierung der Auslastung (–> Additive Increase)**

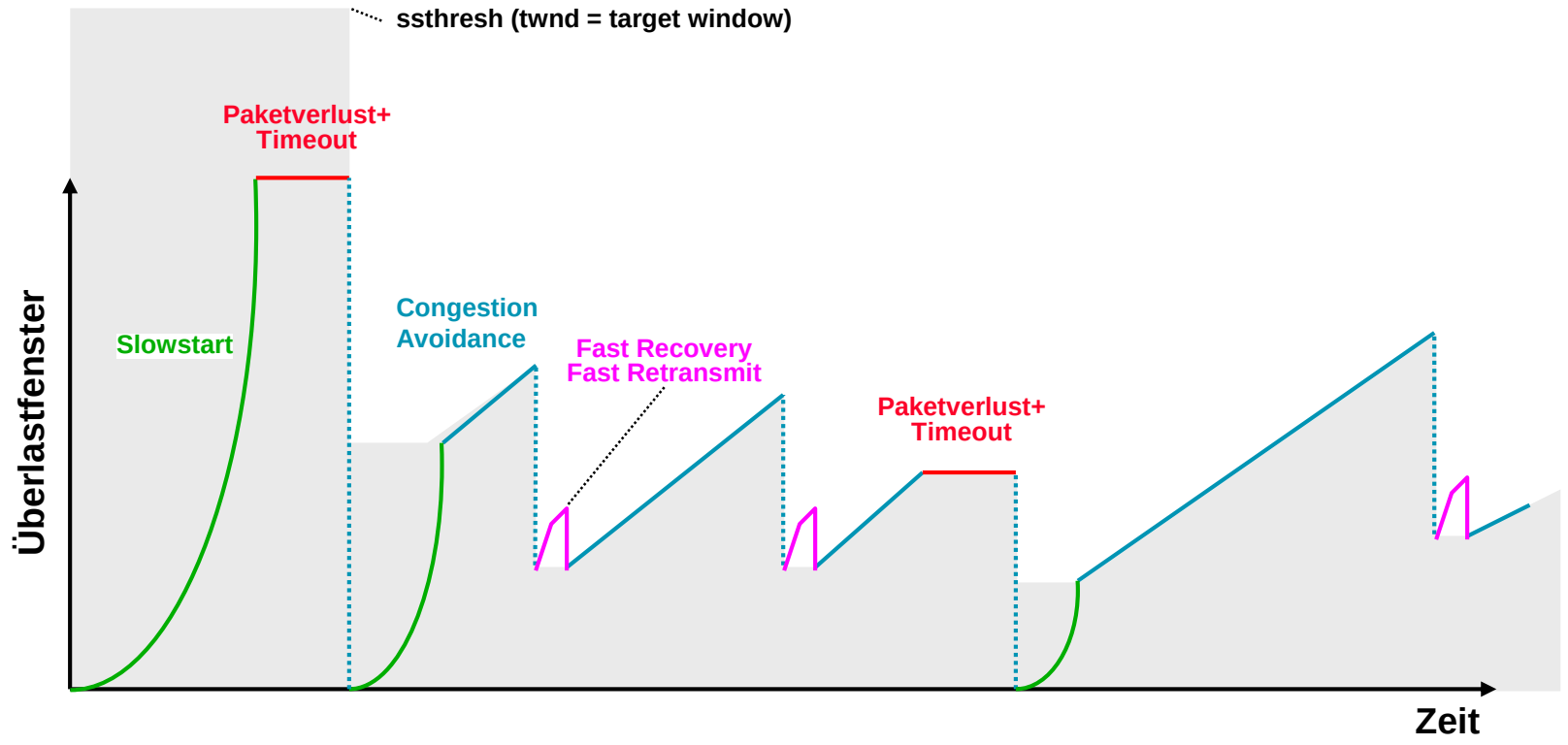
Reaktion auf Überlastungsanzeichen

- **Stabilisierung der Situation (–> Multiplicative Decrease, Karn-Algo.)**
- **Sicherstellung einer kontinuierlichen, unterbrechungsfreien Datenflusses (–> Fast Retransmit, –>Fast Recovery, ...)**

Fairness der Resourcenverteilung

- **automatisch (?) durch AIMD (= Additive Increase / Multiplicative Decrease)**

TCP Sägezahnverhalten



Slow Start

Ziel von Slow Start:

- **Rasches Heranführen der TCP-Verbindung an das Equilibrium**

Strategie:

- **Progressives Testen der Belastbarkeit der Strecke Sender-Empfänger (bis in die Überlast hinein)**
- **Paketverluste (–> Retransmission Time Out) werden als Kennzeichen für eine Überlastsituation gewertet.**
  (Dies ist kritisch für mobile TCP –> niedrige Übertragungsrate)
- **Beruhigung des Netzes nach dem Eintreten einer Überlastsituation (Leeren der Router-Queues am Engpass)**

Einsatz:

- **Beim Start einer Verbindung**
- **nach Ablauf des Retransmission-Timers**
- **nach langer passiver TCP-Phase**

Slow Start-Algorithmus

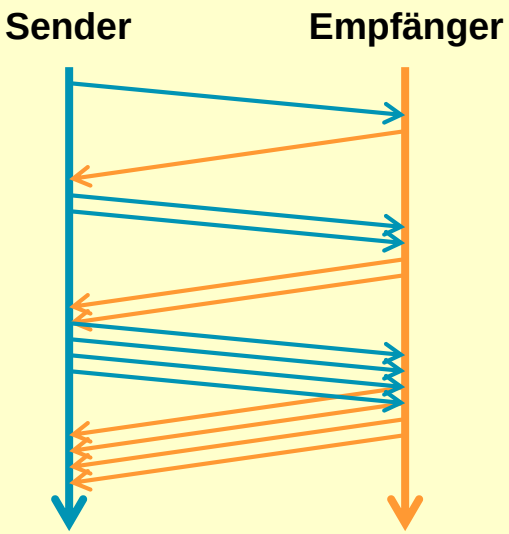
Slow Start

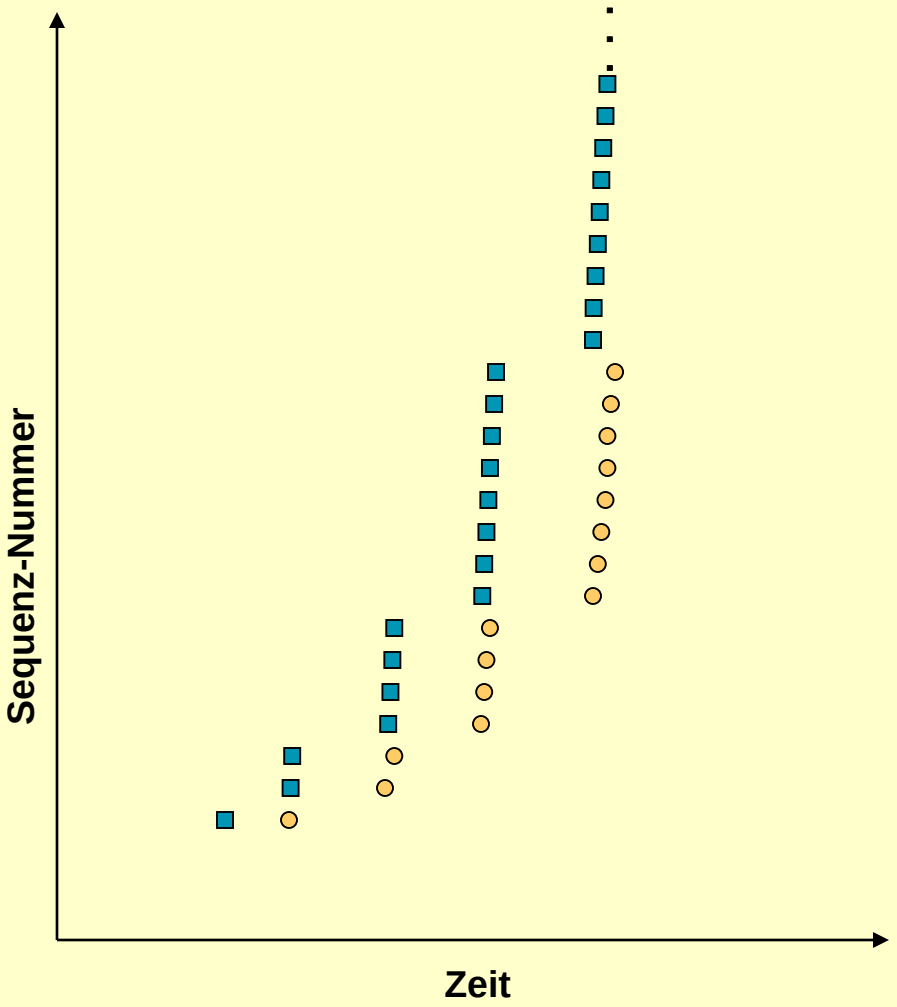
```
cwnd = SMSS
FOR EACH received(ACK)
   cwnd := cwnd + SMSS
UNTIL cwnd >= twnd OR RTO
```

- **SMSS Sender Maximum Segment Size**
  größtes Segment, das ein Sender senden kann
  (536 Bytes nach RFC 1122, 1024 Byte bei den meisten Implementierungen).
- **Der Startwert für cwnd kann auf bis zu 2 SMSS gesetzt werden (nach RFC 2581)**
- **Für den ersten Slow Start kann das Zielfenster (twnd = ssthresh = slow start threshhold) beliebig hoch gesetzt werden (z.B. auf awnd)**
- **(näherungsweises) Wachstum von cwnd als Funktion der Zeit gemessen in RTT:**

$$cwnd(t) = \sum_{i=0}^{t} 2^i = 2^{t+1} - 1$$

Veranschaulichung des Slow Start Algorithmus





Congestion Avoidance

Ziel

- **möglichst gute Ausnutzung der verfügbaren Bandbreite (greedy, gefräßig), aber Überlast möglichst vermeiden.**

Strategie

- **Kontinuierliches zeitlich lineares Vergrößern des cwnd , solange keine Überlastsituation eintritt (Addieren von 1 SMSS pro RTT)**
  –> Additive Increase
- **Halbieren des cwnd, falls Überlastsituation eintritt.**
  Eine Überlastsituation wird z.B. nach Ablaufen des Retransmissiontimers angenommen.
  –> Multiplicative Decrease
- **AIMD = Additive Increase / Multiplicative Decrease**

Congestion Avoidance-Algorithmus

additive increase

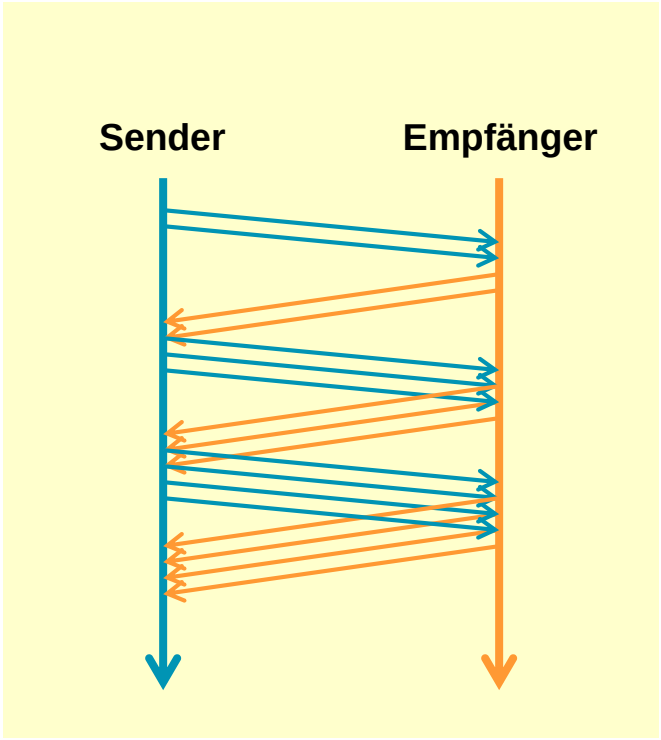
multiplicative decrease

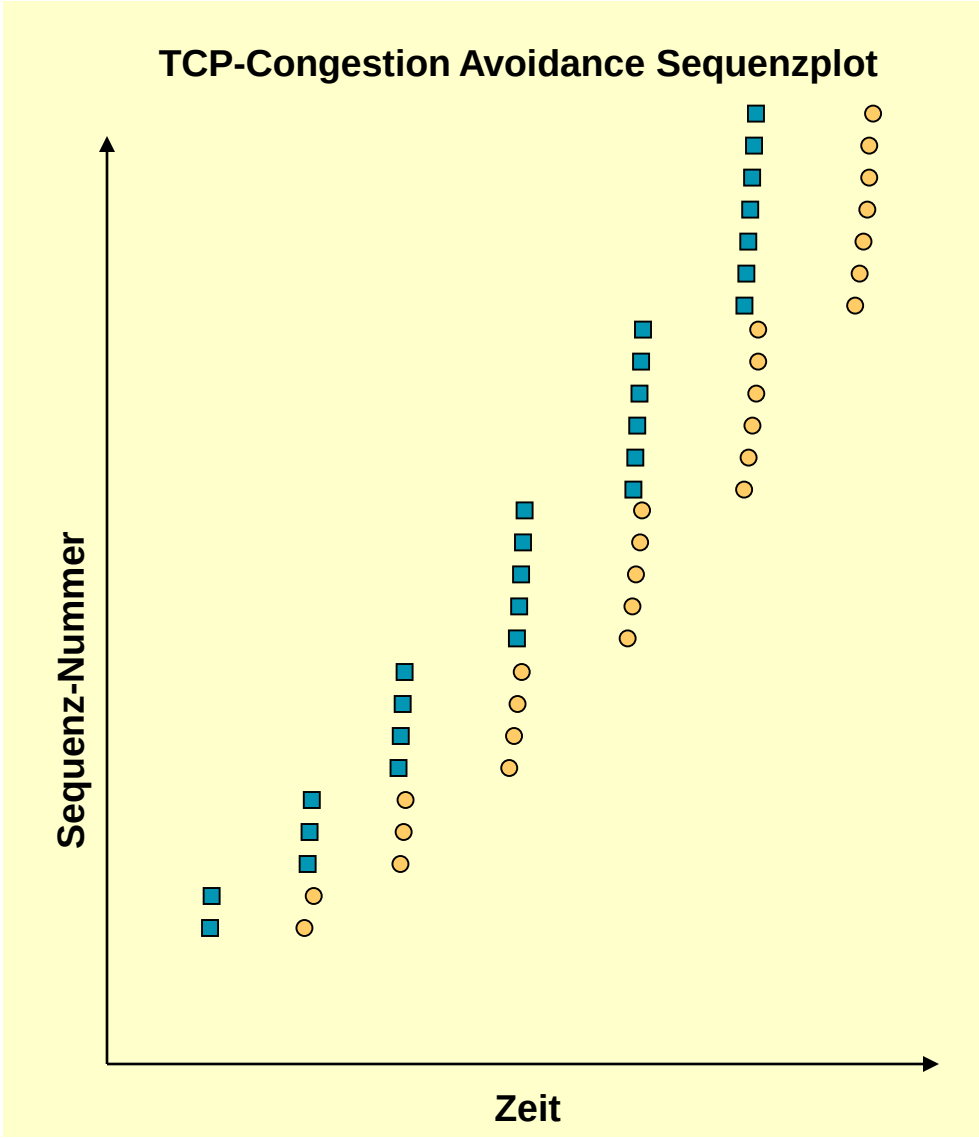
Congestion Avoidance

```
UNTIL LossEvent
   FOR EACH received(ACK)
      cwnd := cwnd + SMSS * (SMSS/cwnd)
   ENDFOR
ENDUNTIL
twnd := cwnd/2

IF intelligent
   Perform Fast Retransmit or Fast Recovery
ELSE
   cwnd :=1 * SMSS
   Perform SlowStart
ENDIF
```

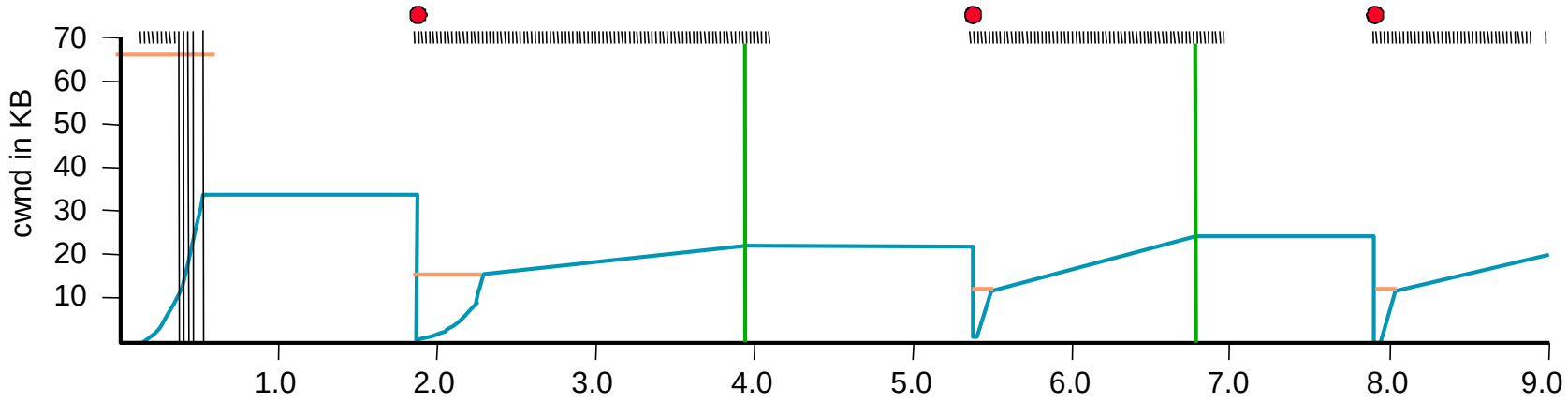
LossEvent kann durch drei dupACKs oder RTO angezeigt werden

Veranschaulichung des Congestion Avoidance Algorithmus





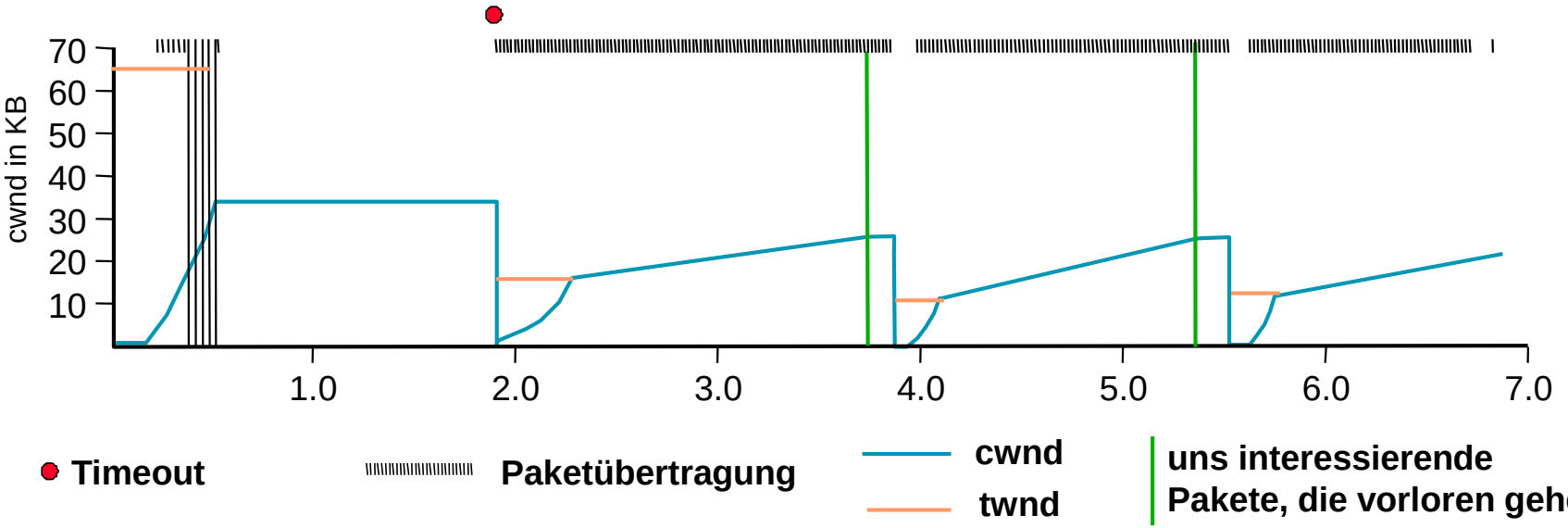
Beispiel (ohne Fast Retransmit)



Timeout Paketübertragung cwnd twnd uns interessierende Pakete, die vorloren gehen

- **Problem**: nach Paketverlust ("grüne" Pakete), wird auf RTO gewartet.
  Es findet keine Erhöhung des cwnd mehr statt (warum?)
- **Folge**: relativ lange Wartezeiten ohne Paketübertragung, Pipeline läuft leer.
- **Lösung**: Anpassen des twnd und Retransmission wird durch ein Fast Retransmit (= 3 dupACKs) getriggered an Stelle von RTO.

Beispiel (mit Fast Retransmit)



- **Verbesserung: jetzt keine Wartephase bedingt durch RTO**
- **noch Problem: Leerlaufen der Pipeline, Neustart des Selfclockings durch Slow Start.**
- **Folge: kurzzeitiger Einbruch der Übertragungsleistung.**
- **Lösung: direkte Reduzierung des twnds unter gleichzeitiger gezielter Steuerung des cwnd. (Ziel: kontinuierliches unterbrechungsfreies Herunterfahren der Pipe auf den neuen twnd-Wert.)**

–> Fast Recovery

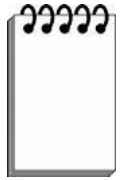
Fast Recovery (nach RFC 2581)

Fast Recovery

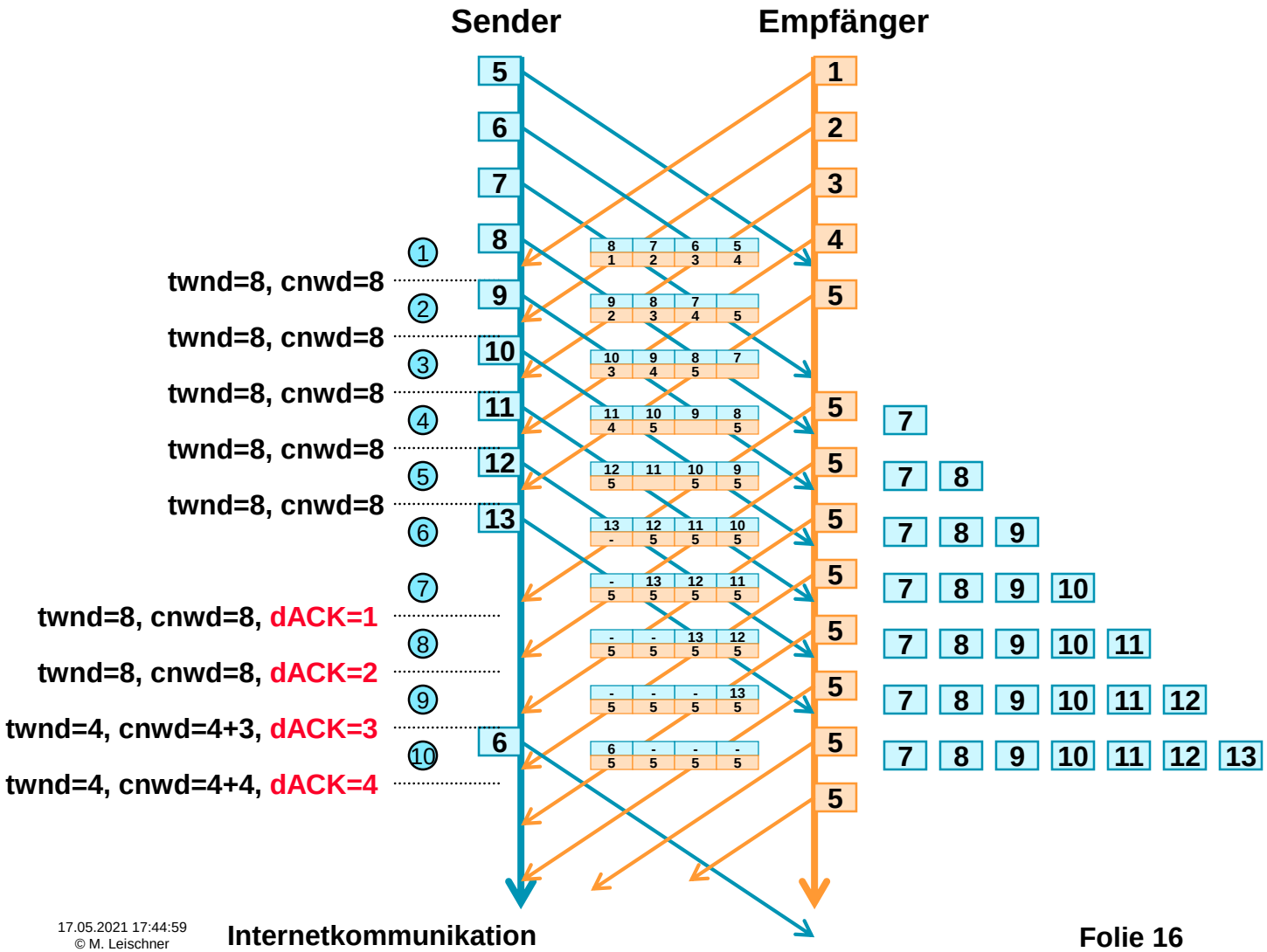
```
AS-SOON-AS  #dACK=3
   twdn := 0.5 * cwdn  -- multiplik. decrease
   cwnd := twnd + 3 * SMSS -- inflating
   send(LostSegment)
END AS-SOON-AS

FOR-EACH-ADDITIONAL dACK
   cwnd := cwnd + SMSS
END-FOR-EACH ADDITIONAL

AS-SOON-AS regular-ACK
   cwnd := twnd -- deflating
END AS-SOON-AS
```

Strategie:

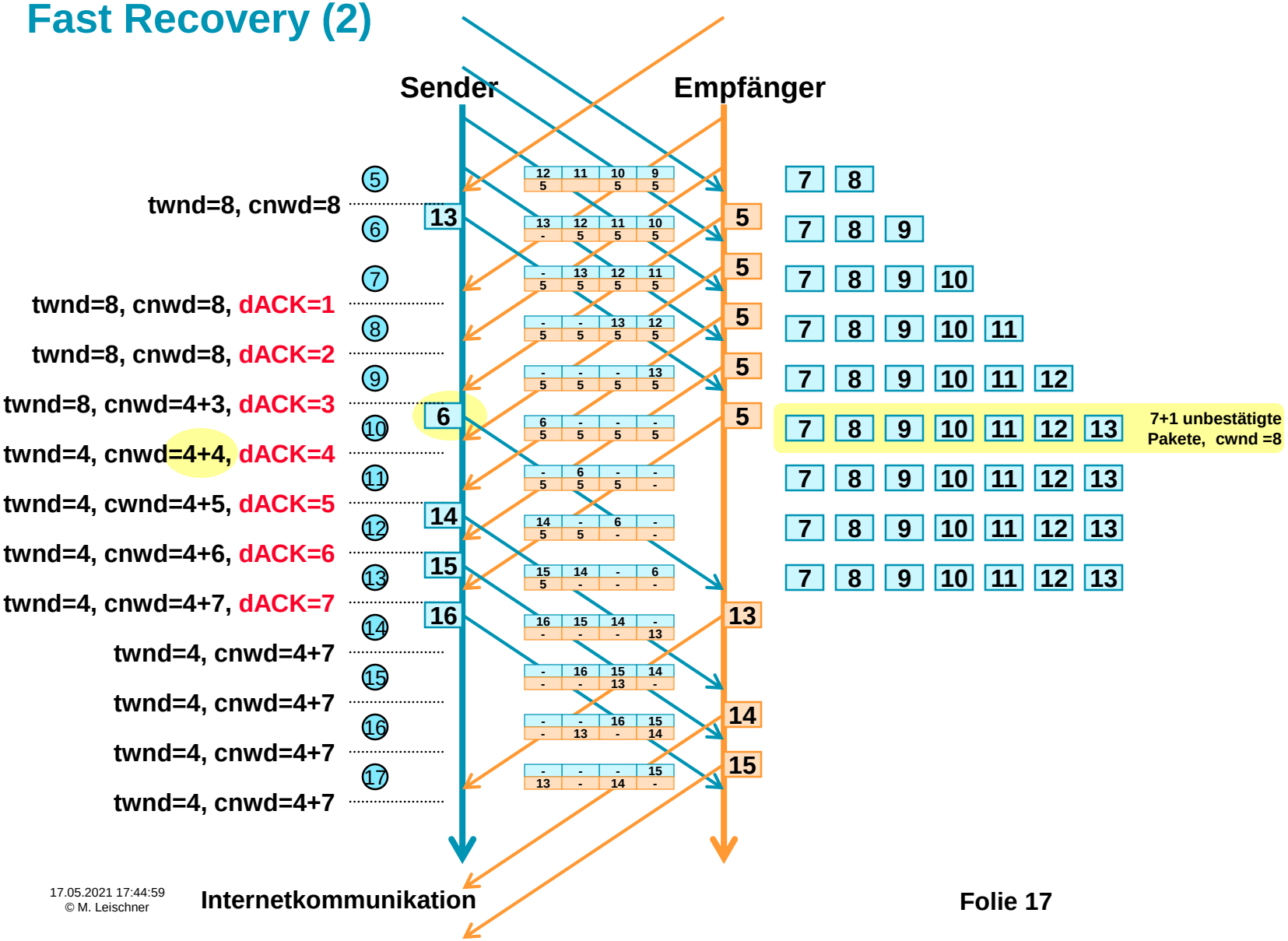
Zusätzliches Öffnen des cwnd gemäß "Equilibrium-Konzept" soll kontinuierliches unterbrechungsfreies Herunterfahren der Pipe auf den neuen Soll-Wert des twnd steuern.



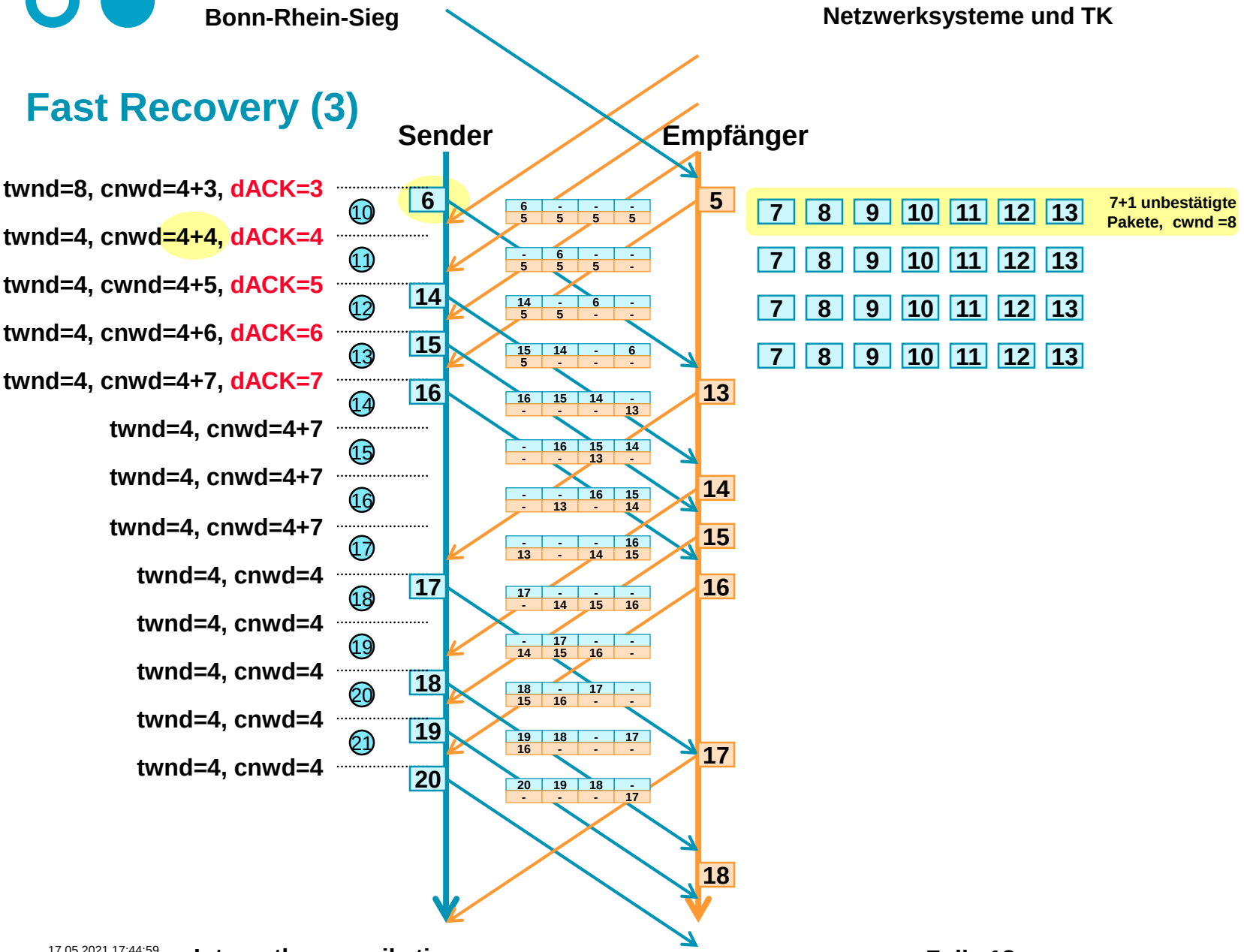
Fast Recovery (1)



Fast Recovery (2)

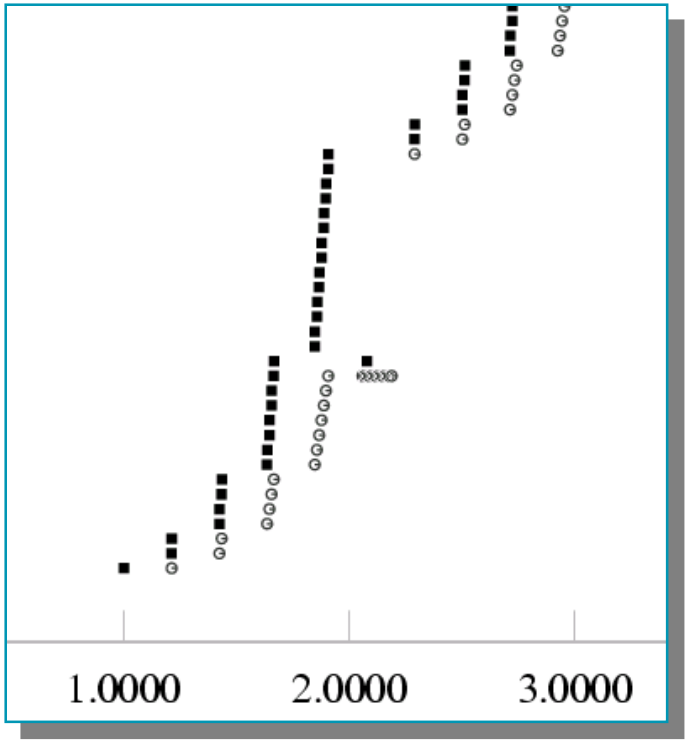


Fast Recovery (3)



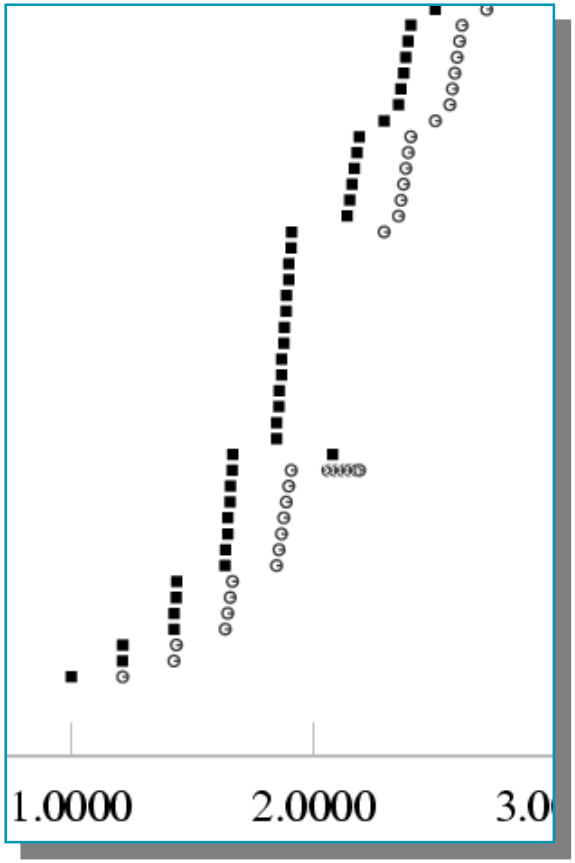
Sequenz-Plots für Fast Retransmit und Fast Recovery

Fast Retransmit



due to: Ramesh Govindan
University of Southern California
http://netweb.usc.edu

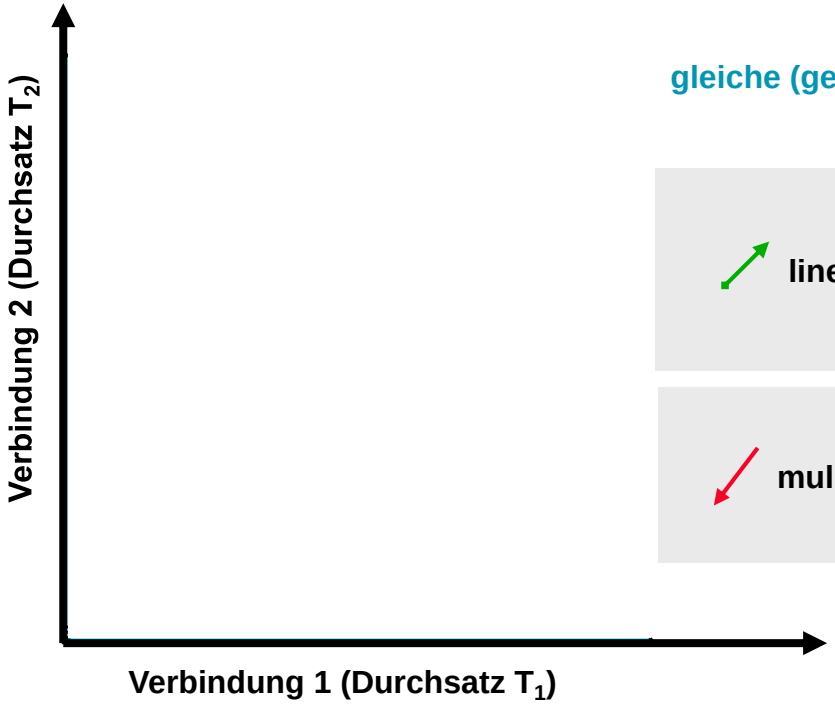
Fast Recovery



Warum ist TCP fair?

Zwei gleichzeitige TCP-Sessions

- Additive Increase --> Neigung 1
- Multiplicative Decrease --> proportionale Neigung



gleiche (gerechte) Aufteilung der Bandbreite

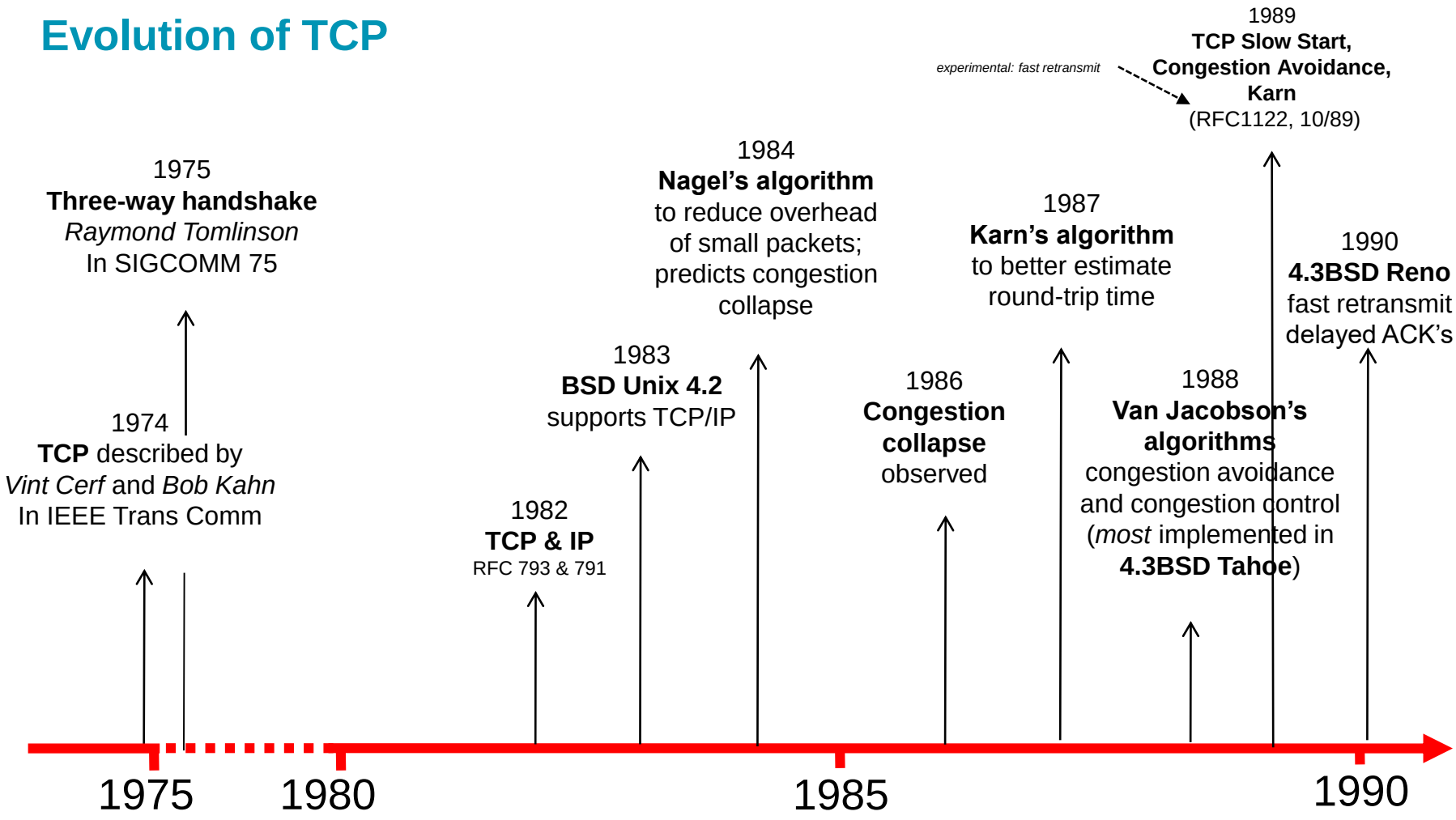
linear Increase $\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = 1$

mulitiplikative decrease $\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \frac{T_1}{T_2}$

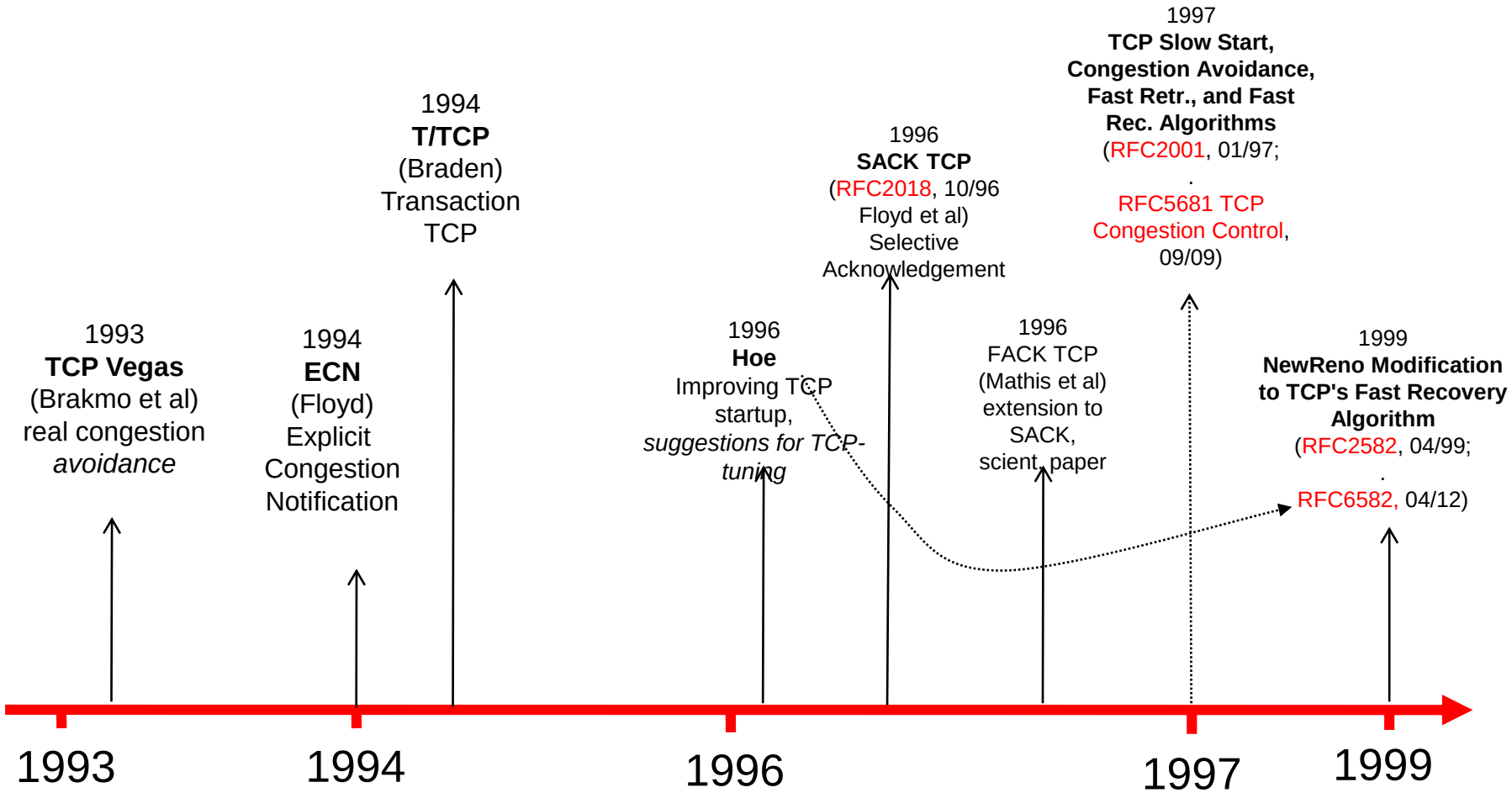
Verschiedene Implementierungen von TCP

- TCP Tahoe (1988)
  - BSD (Berkeley Software Distribution) Network Release 1.0
  - enthält AIMD, fast retransmit, Slow Start, RTT nach Jacobson)
  - aber noch kein Fast Recovery.
- TCP Reno (1990)
  - BSD Network Release 2.0
  - mit Fast Recovery
  - Implementiert in den meisten Betriebssystemen
- TCP Vegas (1993)
  - BSD Network Release 4.3
  - Senderbasierte Überlastvermeidung durch Monitoring des erwarteten und des gemessenen Durchsatzes.
  - Verwendung von Zeitstempeln bei den Paketen.

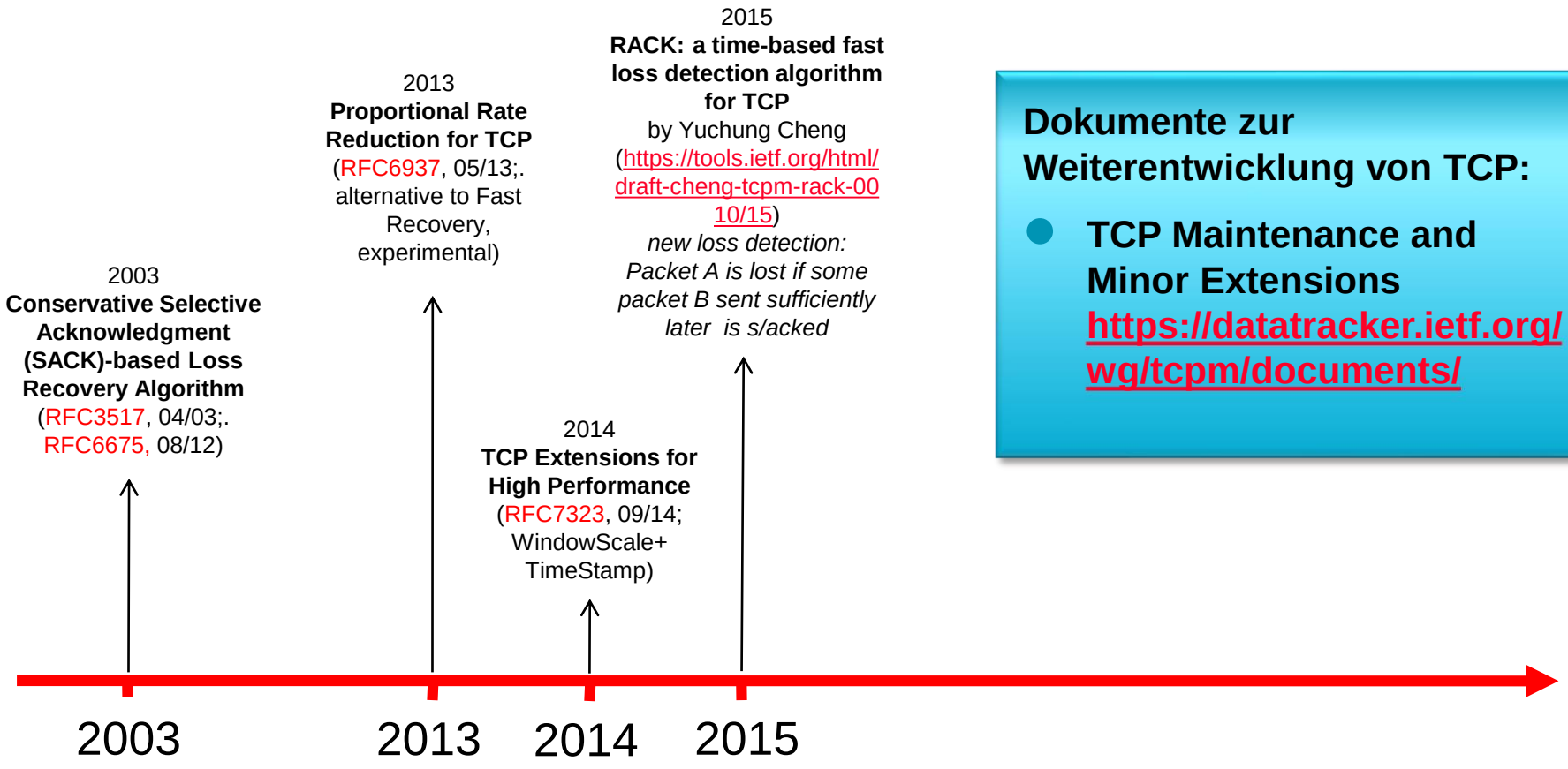
Evolution of TCP



TCP Through the 1990s



TCP Through the 2000s



Dokumente zur Weiterentwicklung von TCP:

- **TCP Maintenance and Minor Extensions**
  https://datatracker.ietf.org/wg/tcpm/documents/

Hochschule
Bonn-Rhein-Sieg

Prof. Dr. Martin Leischner
Netzwerksysteme und TK

A Deterministic TCP Bandwidth Sharing Model

W. Lautenschlaeger, A Deterministic TCP Bandwidth Sharing Model, 2014, online at http://arxiv.org/pdf/1404.4173v1

Traditionally TCP bandwidth sharing has been investigated mainly by stochastic approaches due to its seemingly chaotic nature. Even though of great generality, the theories deal mainly with expectation values, which is prone to misinterpretation with respect to the Quality-of-Experience (QoE). We disassemble TCP operating conditions into dominating scenarios and show that bandwidth sharing alone follows mostly deterministic rules. From the analysis we derive significant root causes of well-known TCP aspects like unequal sharing, burstiness of losses, global synchronization, and on buffer sizing. We base our model on a detailed analysis of bandwidth sharing experiments with subsequent mathematical reproduction.

Problem

Lösung

Methodik

aus: https://www.bell-labs.com/usr/wolfram.lautenschlaeger

self-clocking creates a smooth end-to-end packet flow at the bottleneck's capacity limit.

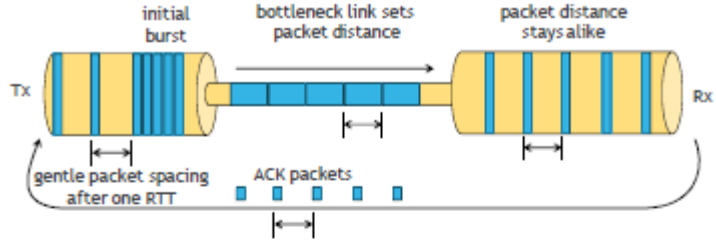


Fig. 1. Adaptation to bottleneck capacity by self-clocking

In case of bandwidth sharing the link capacity is not a bottleneck for a single flow. Other flows might constrict the available bandwidth, so that a single flow experiences macroscopically the equivalent of a bottleneck. On smaller time scales, however, there exists a remarkable difference: Self clocking, as in a hard bottleneck, does not necessarily occur, as illustrated in Fig. 2. Bursts of packets from different flows traverse sequentially the shared link. They are preserved on the reverse acknowledgement chain, and finally reproduce themselves in the next round.

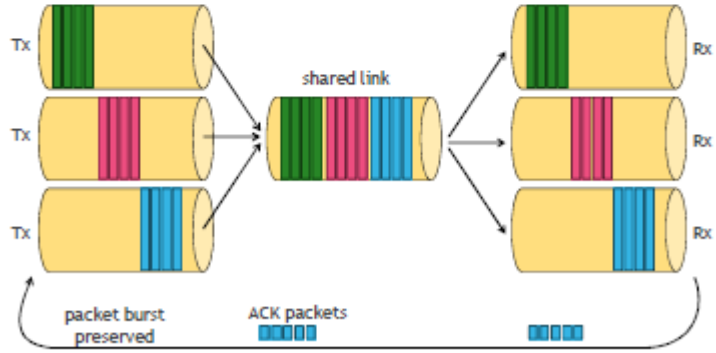


Fig. 2. Burst conservation in case of bandwidth sharing (no self-clocking)

The effect is well known [5], [6]. It can be easily