

Internet Protocols II

Thomas Fuhrmann



Network Architectures
Computer Science Department
Technical University Munich

Medienzugriffsverfahren



Motivation

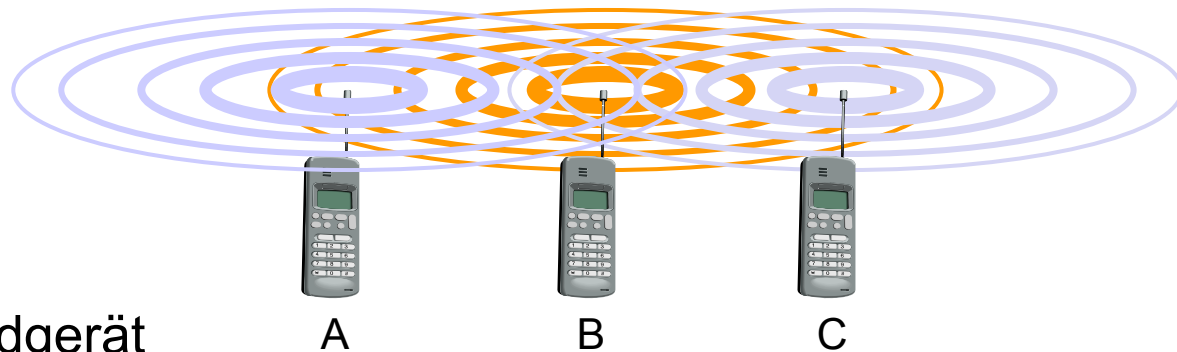
- Medienzugriffsverfahren sind nötig, um geregelten Zugriff auf ein für mehrere Geräte gemeinsam genutztes Medium zu ermöglichen
- Medienzugriffsverfahren vom Festnetz können meistens nicht im drahtlosen Bereich angewendet werden

Beispiel CSMA/CD (Ethernet IEEE 802.3)

- **C**arrier **S**ense **M**ultiple **A**ccess with **C**ollision **D**etection
- Senden, sobald das Medium frei ist und hören, ob eine Kollision stattfand
- Signalstärke nimmt quadratisch mit der Entfernung ab
- Somit Senden und Empfangen in der Praxis nicht gleichzeitig möglich
- CS und CD würden beim Sender eingesetzt, aber Kollision geschieht beim Empfänger
- Kollision ist dadurch u.U. nicht mehr beim Sender hörbar, d.h. CD versagt
- Auch CS kann falsche Ergebnisse liefern, z.B. wenn ein Endgerät „versteckt“ ist

Versteckte und „ausgelieferte“ Endgeräte

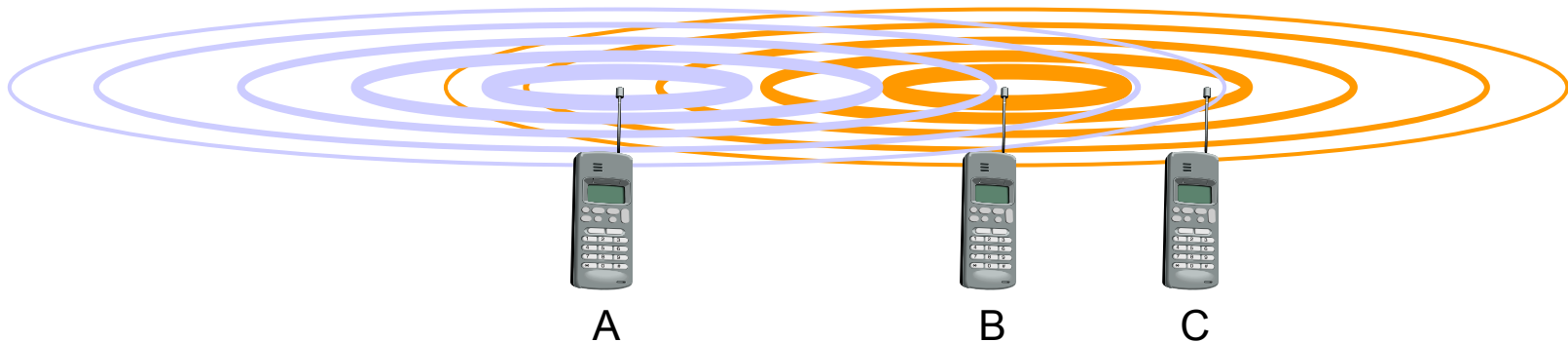
- Verstecktes Endgerät
 - A sendet zu B, C empfängt A nicht mehr
 - C will zu B senden, Medium ist für C frei (Carrier Sense versagt)
 - Kollision bei B, A sieht dies nicht (Collision Detection versagt)
 - A ist „versteckt“ für C



- „Ausgeliefertes“ Endgerät
 - B sendet zu A, C will zu irgendeinem Gerät senden (nicht A oder B)
 - C muß warten, da Carrier Sense ein „besetztes“ Medium signalisiert
 - da A aber außerhalb der Reichweite von C ist, ist dies unnötig
 - C ist B „ausgeliefert“

Nahe und ferne Endgeräte

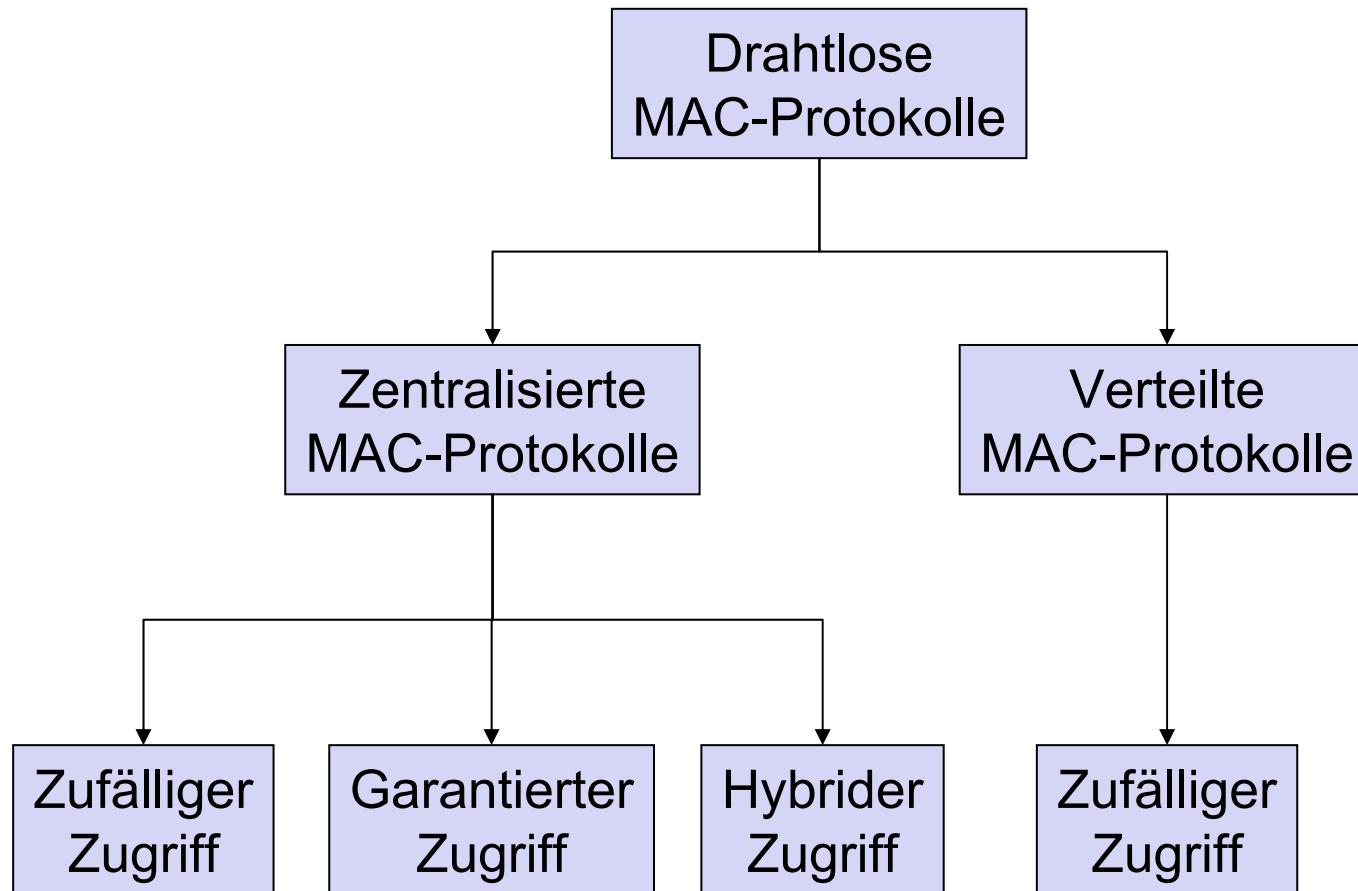
- Endgeräte A und B senden, C soll empfangen
 - die Signalstärke nimmt quadratisch mit der Entfernung ab
 - daher „übertönt“ das Signal von Gerät B das von Gerät A
 - C kann A nicht hören



- Würde beispielsweise C Senderechte vergeben, so könnte B die Station A rein physikalisch überstimmen
- Auch ein großes Problem für CDMA-Netzwerke - exakte Leistungskontrolle notwendig!

- Halbduplex Betrieb
 - Realisierung von Transceiver, die gleichzeitig senden und empfangen ist sehr schwierig
 - Eigene Sendeleistung stört beim Empfang (Self-Interference)
 - Somit CSMA/CD nicht möglich
- Zeitvarianter Kanal
 - Durch Mehrwegausbreitung (Reflektion, Beugung und Scattering) kann die Signalstärke am Empfänger zeitlich sehr stark variieren (Fading)
 - Dadurch Verwendung von
 - kleineren Paketen
 - Forward Error Correction
 - Übertragungswiederholung auf Schicht 2
- Zentralisiert vs. verteilt arbeitende Protokolle
- Synchron vs. Asynchron
 - Kanal kann in Zeitschlitz eingeteilt werden
 - Vereinfacht Management von Bandbreite und QoS
 - Aber alle Geräte müssen zeitlich synchronisiert sein
 - Alternative: asynchrone, paketbasierte Protokolle

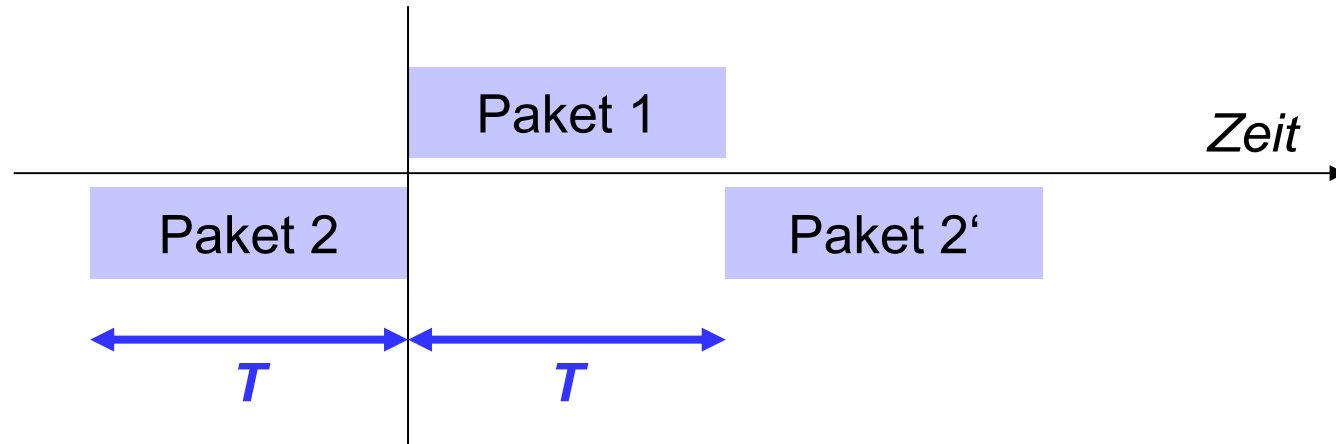
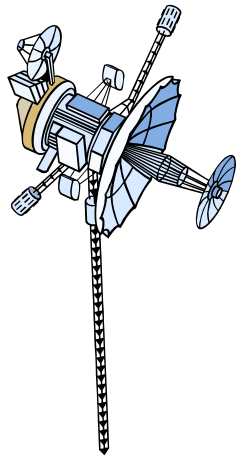
Klassifizierung MAC-Protokolle



Aloha – Der Urahn verteilter Verfahren

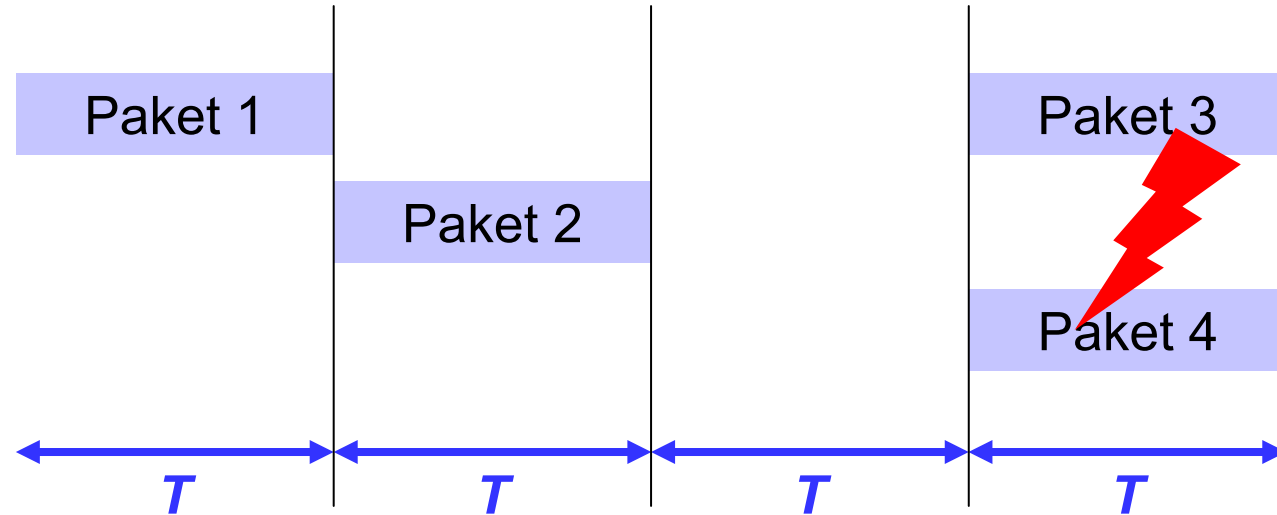
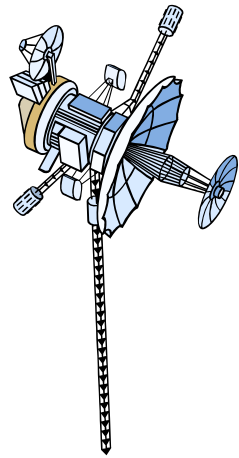


Reines Aloha



- Im ursprünglichen Aloha-Netz wurden Pakete gleicher Länge zu *beliebigen Zeitpunkten* über einen Satelliten verschickt.
- Da die Round-Trip-Time mit ca. 500ms deutlich länger als die Paketzeit T ist, müssen alle Stationen „auf gut Glück“ senden.
- Überlappen sich zwei Pakete werden beide Pakete zerstört und müssen erneut übertragen werden.
- Stationen warten vor einer Wiederholung eine zufällige Zeit.

Slotted Aloha



- Beim Slotted Aloha Verfahren wird durch den Satelliten für alle Stationen ein Takt vorgegeben.
- Alle Stationen sind synchron im Takt.
- Überlappen sich zwei Pakete werden beide Pakete zerstört und müssen erneut übertragen werden.

Analyse: Reines Aloha

- Poisson-Prozess: Wahrscheinlichkeit P für keine Sendung während Zeitraum $2T$

$$P = \exp(-2\lambda T)$$

- Durchsatz = Gesamtverkehr mal Wahrscheinlichkeit für ungestörte Übertragung

$$D = \lambda P$$

- Maximaler Durchsatz: Ableiten und nach Null auflösen

$$d/d\lambda \lambda \exp(-2\lambda T) = \exp(-2\lambda T) - 2\lambda T \exp(-2\lambda T)$$

$$\exp(-2\lambda T) (1 - 2\lambda T) = 0$$

- Somit maximaler Durchsatz bei $\lambda T = \frac{1}{2}$ mit $D = 1/(2e) \sim 18\%$

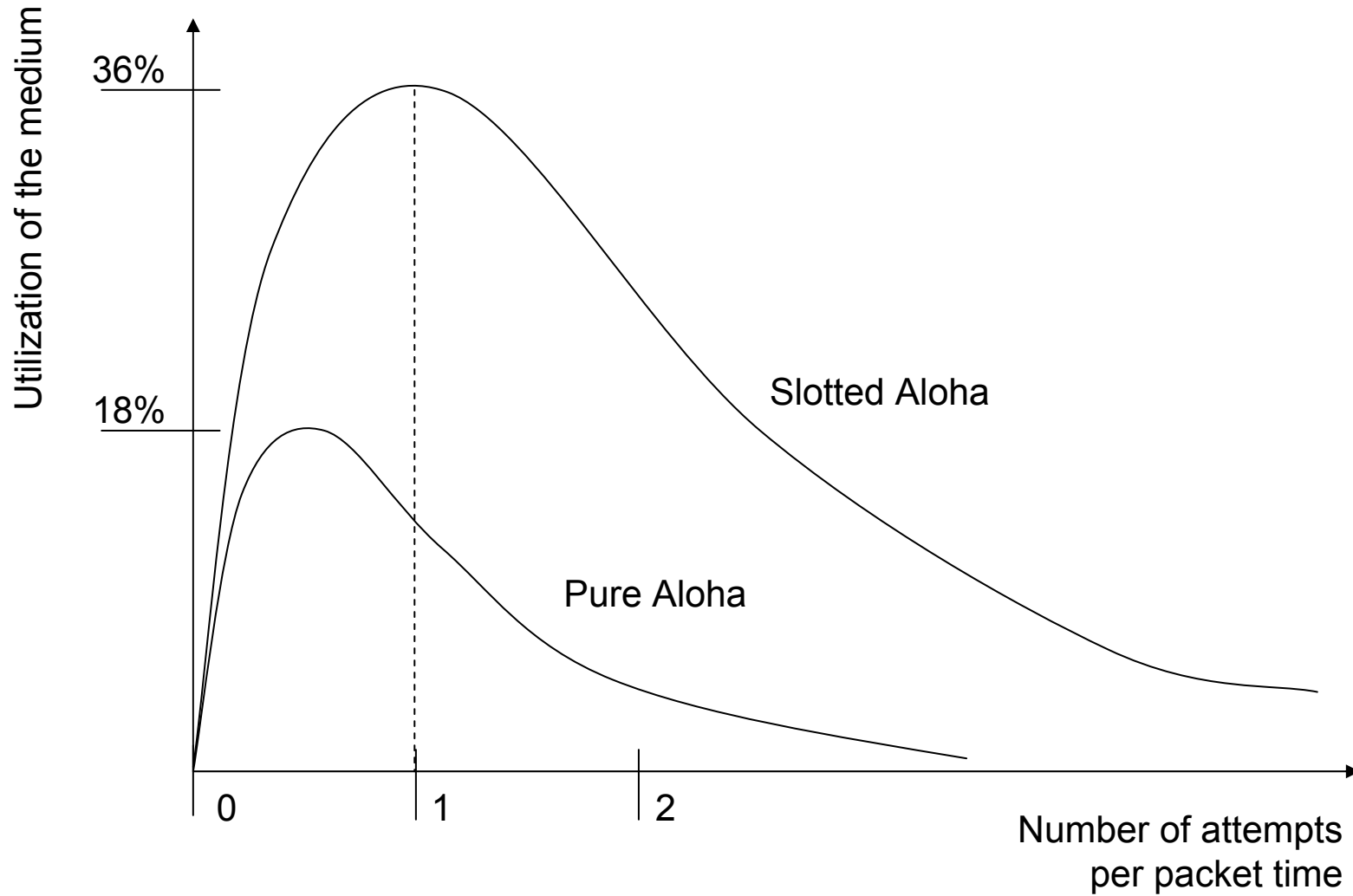
Analyse: Slotted Aloha

- Poisson-Prozess:
Kritische Zeit nur noch T statt $2T$, somit $D = \lambda \exp(-\lambda T)$ und

$$D_{\max} = 1/e \sim 36\%$$

- Alternative Herleitung:
 - N Stationen erzeugen Gesamtverkehr G
 - Wahrscheinlichkeit dafür dass eine Station sendet ist G/N
 - Wahrscheinlichkeit dafür dass alle anderen nicht senden ist $(1-G/N)^{N-1}$
 - Somit:
$$\frac{S}{N} = \frac{G}{N} \cdot \left(1 - \frac{G}{N}\right)^{N-1}$$
 - Im Grenzwert $N \rightarrow \infty$ hat man $S = G \exp(-G)$
 - Übereinstimmung mit $D = \lambda \exp(-\lambda T)$ aus Herleitung mit Poisson

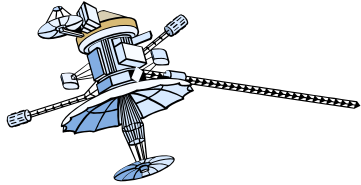
Aloha versus Slotted Aloha



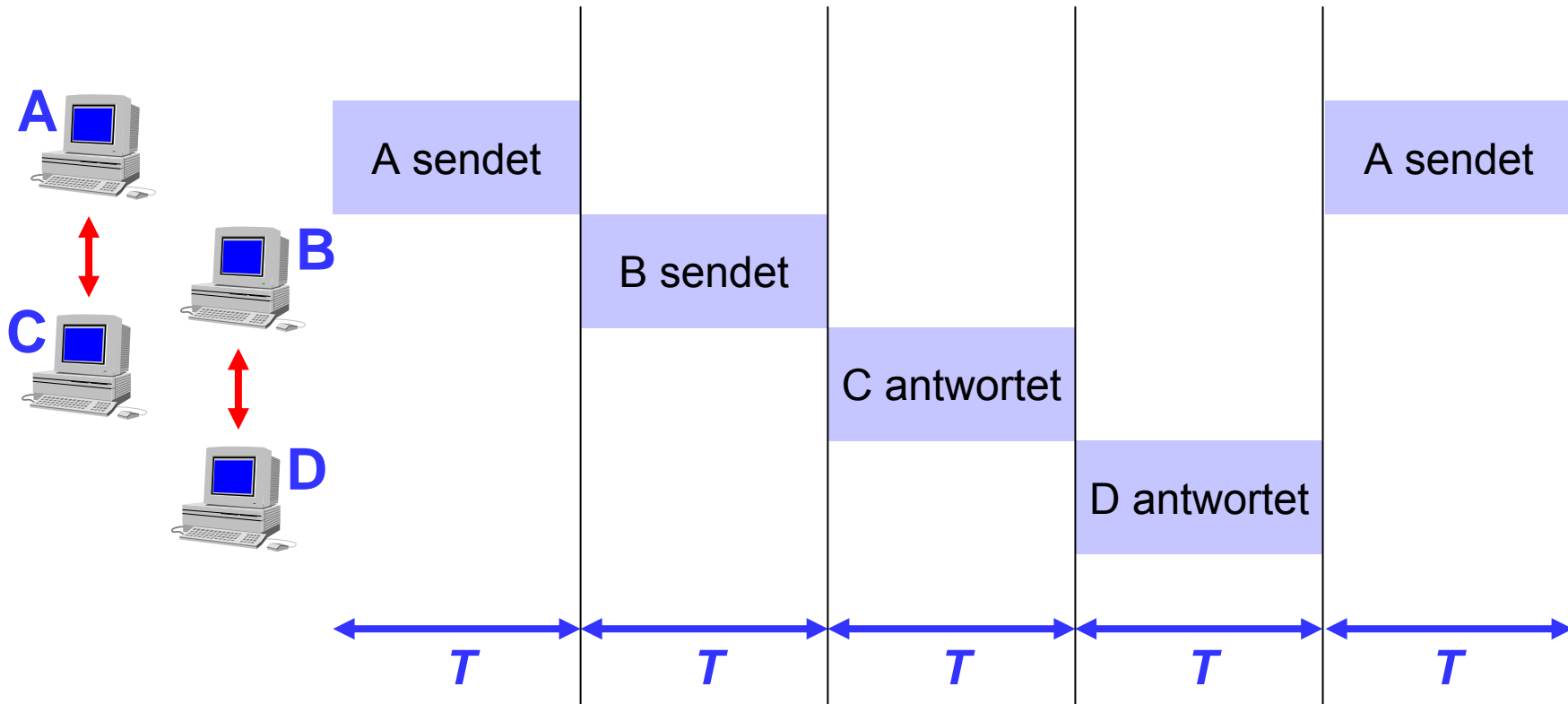
Bewertung des Modells

- Bei wenig Verkehr, d.h. für $\lambda \rightarrow 0$, liefert das Modell $D = O(\lambda)$, d.h. wie erwartet spielen Kollisionen keine Rolle.
- Bei viel Verkehr ist die Poisson-Annahme unrealistisch:
 - Extrembeispiel 1: Vier Stationen kommunizieren paarweise als Client-Server. Wegen Paketlaufzeit und Verarbeitungszeit kann eine Station erst im übernächsten Zeitschlitz senden. Das Medium ist perfekt genutzt.
 - Extrembeispiel 2: Jeden Tag um Mitternacht übertragen 100 Stationen ein Backup an den zentralen Backup-Server ...
- Viele Übertragungswiederholungen zerstören die Annahme der Unabhängigkeit der Stationen, selbst wenn der ursprüngliche Sendewunsch der Stationen ein Poisson-Prozess ist.

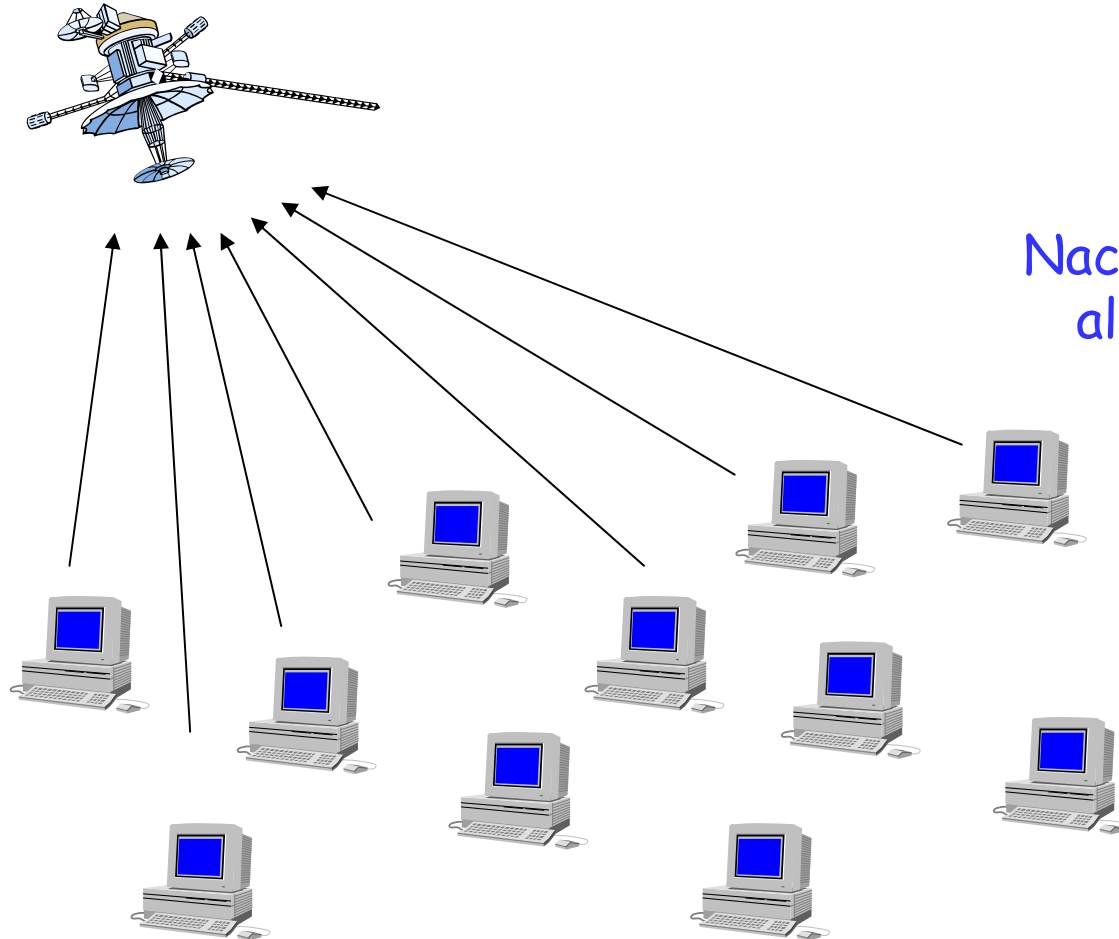
Extrembeispiel 1



Zwei Client-Server-Paare sind im Takt ...



Extrembeispiel 2



Viele Stationen wollen gleichzeitig senden ...

Nach einer Kollision wollen alle beteiligte Stationen innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls wieder senden!

D.h. die Stationen sind wegen der Übertragungswiederholung nicht unabhängig!

- Ein Ansatz, die Sendewiederholungen zu modellieren, ist eine Markov-Kette
 - Zustand = Anzahl der zur Übertragung anstehenden Pakete
 - Wahrscheinlichkeit, dass ein Paket erfolgreich übertragen wird, hängt davon ab, wie viele Pakete zur Übertragung anstehen
 - Je mehr Pakete warten, desto geringer ist die Erfolgswahrscheinlichkeit
- Bei einer hohen Rate neuer Sendewünsche kann das System in einen verstopften Zustand hineinlaufen (Kollaps).
 - Geschlossenes System: Blockierte Stationen, d.h. solche bei denen Übertragungswiederholung ansteht, erzeugen keine neuen Sendewünsche.
 - Offenes System: Auch blockierte Stationen erzeugen neue Sendewünsche. Diese füllen die Warteschlangen in den Stationen.

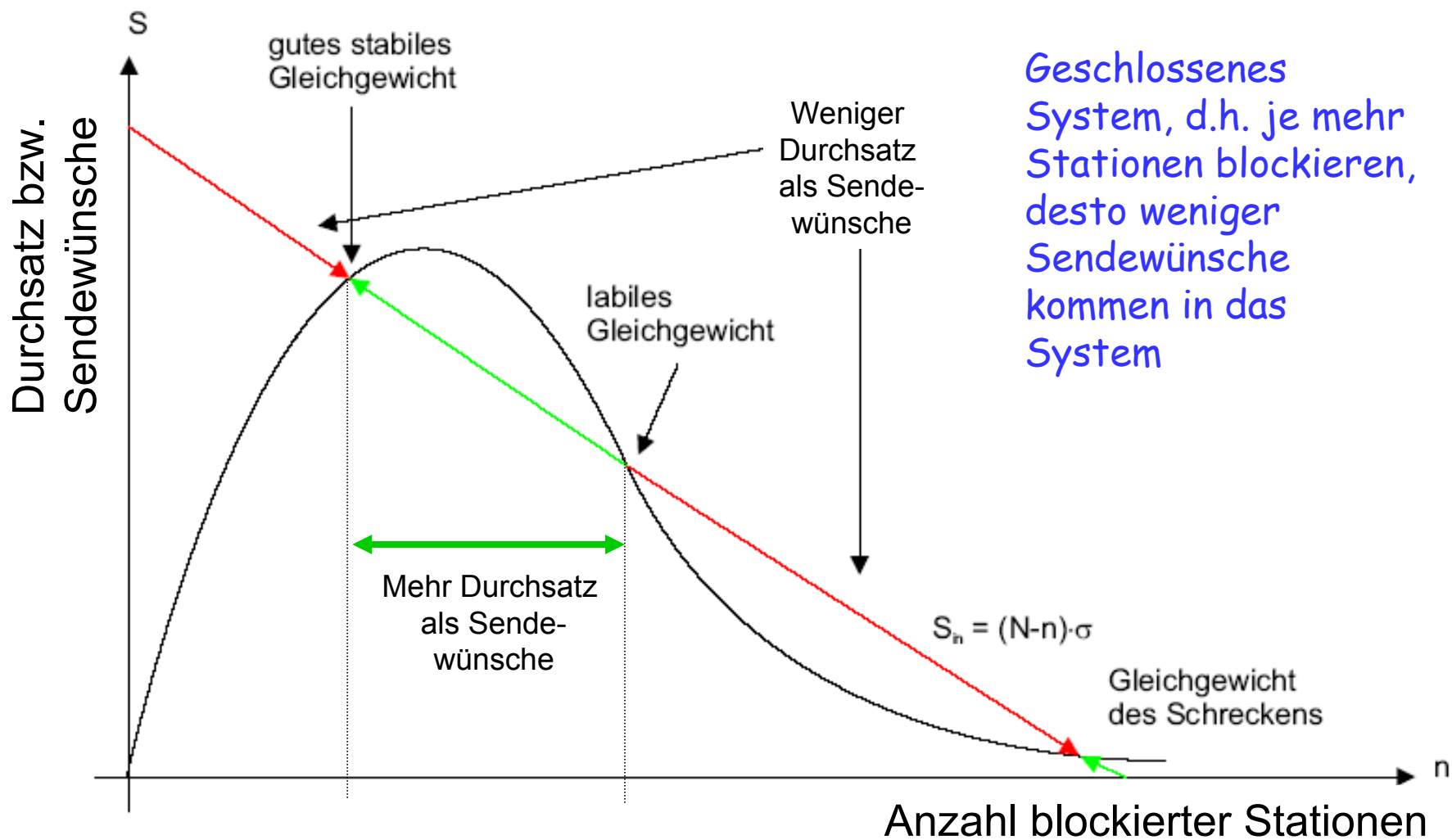
Lösung des erweiterten Modells (1)

- Annahme:
 - n von insgesamt N Stationen blockieren.
 - Die blockierenden Stationen wählen gleichverteilt einen der nächsten K Zeitslitze für die Übertragungswiederholung.
 - Geschlossenes System: Die $N-n$ nicht blockierenden Stationen erzeugen mit Rate σ neue Pakete.
- Lösung:
 - Die Wahrscheinlichkeit, dass der 1. Zeitschlitz von genau einer blockierenden Station gewählt wird ist $\frac{1}{K} (1-\frac{1}{K})^{n-1}$.
 - Die Wahrscheinlichkeit, dass der 1. Zeitschlitz von keiner blockierenden Station gewählt wird ist $(1-\frac{1}{K})^n$.
 - Die Wahrscheinlichkeit, dass im 1. Zeitschlitz genau ein neues Paket übertragen wird ist $\sigma (1-\sigma)^{N-n-1}$.
 - Die Wahrscheinlichkeit, dass im 1. Zeitschlitz kein neues Paket übertragen wird ist $(1-\sigma)^{N-n}$.
- Durch Kombination erhält man die Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Übertragung.

Lösung des erweiterten Modells (2)

- Vereinfachend kann man auch annehmen, dass pro Zeitschritt $\sigma(N-n)$ Sendewünsche ins System kommen, also Blockierungen auslösen, und unabhängig davon eine von der Zahl der blockierenden Stationen getriebene Zahl von Blockierungen aufgelöst werden.
 - Man erhält eine Durchsatzkurve, deren genaue Form von K abhängt.
 - Die Sendewünsche werden durch eine Gerade mit Steigung $-\sigma$ und x-Achsen-Abschnitt N beschrieben.
- Aus dem Schnittverhalten der Kurve und der Gerade lässt sich das Verhalten des Systems ableiten:
 - Gibt es einen Schnittpunkt stabilisiert sich das System bei der entsprechenden Zahl blockierender Stationen.
 - Je nach Lage des Schnittpunkts blockieren wenige oder sehr viele Stationen.
 - Gibt es drei Schnittpunkte entspricht der mittlere einem labilen Gleichgewicht.
 - Wird diese Zahl blockierender Stationen überschritten bewegt sich das System auf den Zustand sehr vieler wartender Stationen zu.

Ergebnis aus erweitertem Modell



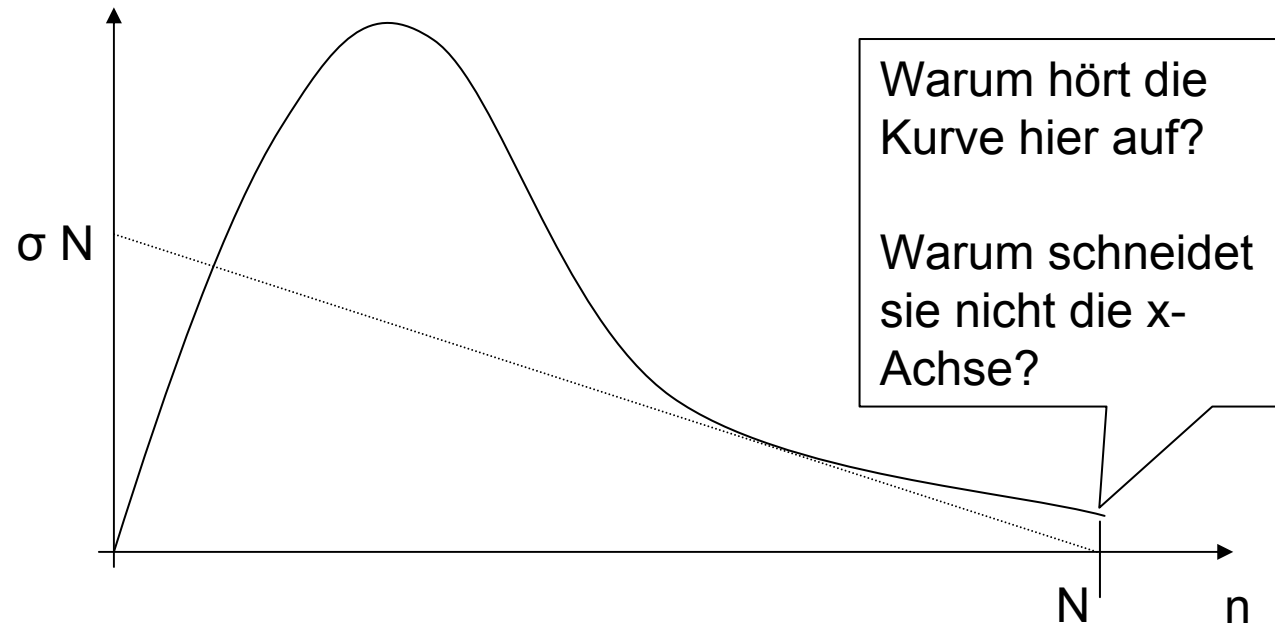
Quelle: O. Spaniol, Modellierung und Bewertung von Kommunikationssystemen, RWTH Aachen, 2001

Frage ...

- Angenommen, K und N seien gegeben. Die sich ergebende Kurve sei ebenfalls bereits bestimmt.
- Wie kann man aus der Kurve die maximale Rate neuer Sendewünsche ablesen, bei der das System im guten, stabilen Gleichgewicht bleibt?

- Lösung:

Tangente an die Kurve im labilen bzw. 2. stabilen Gleichgewichtspunkt

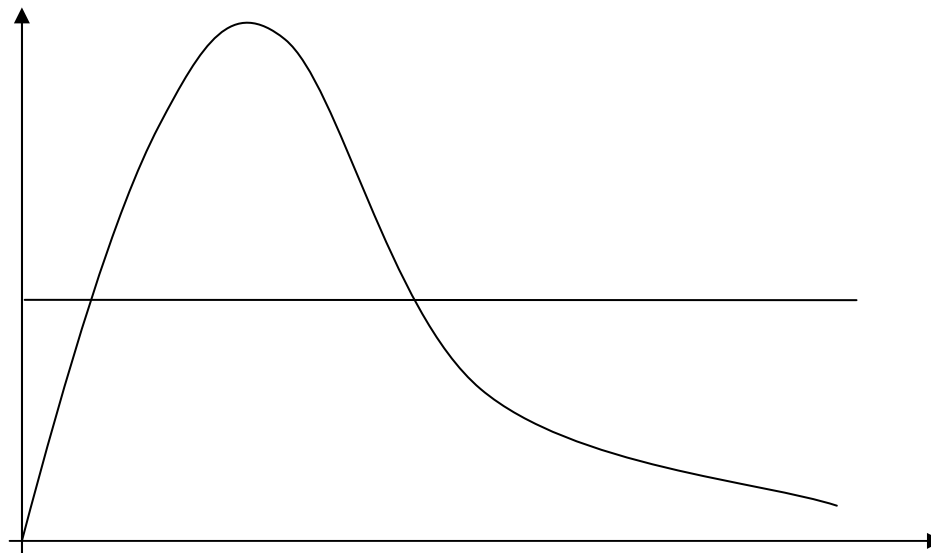


Frage ...

- Beim „Zwei-Kurven-Ansatz“ ändert sich die Kurve für den Durchsatz nicht, wenn man vom geschlossenen zum offenen System übergeht.
 - Wie sieht die Kurve für die Sendewünsche aus?
 - Was kann man über die Gleichgewichtszustände aussagen?
 - Welches System ist besser kontrollierbar?

- Lösung:

Sendewünsche
sind per
definitionem
unabhängig
von n



Vermeidung des Kollaps

- Senderatenbegrenzung
 - Nur sinnvoll wenn alle Stationen
 - durch zentrale Ressourcen-Verwaltung kontrolliert
 - oder konstante Senderate aus Anwendung bekannt
 - Dann Traffic-Shaper, z.B. Token Bucket
- Anpassung des Verhaltens bei der Übertragungswiederholung an die Zahl der blockierten Stationen
 - Optimal: Erwartungswert ca. 1 für Übertragungswiederholung pro Zeitschlitz
 - Schätzung der Zahl blockierter Stationen nötig
 - Mögliche Strategie: Exponentielles „Raten“ der Zahl blockierter Stationen durch „Back-off“ Strategie (vgl. Ethernet)

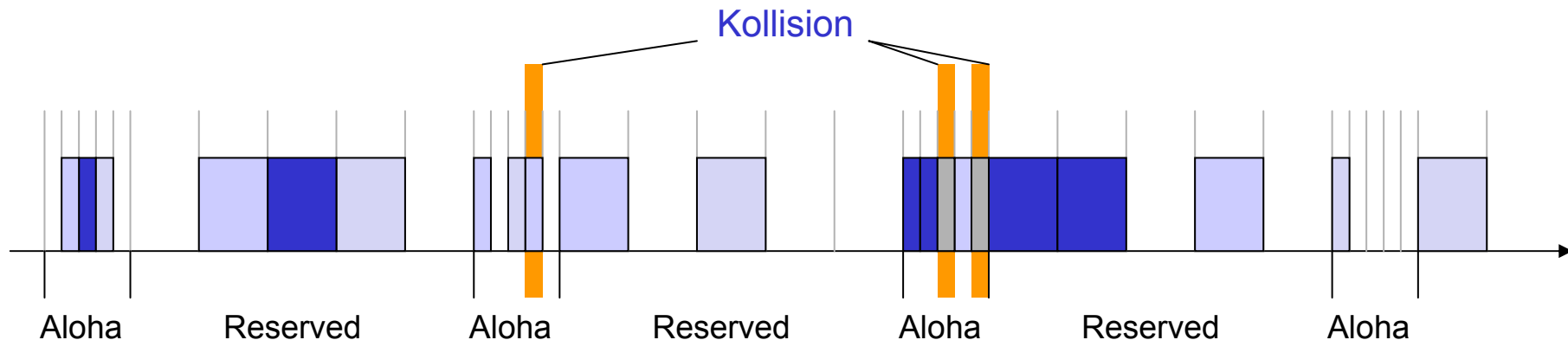
Hybride Verfahren auf Basis von Aloha

DAMA - Demand Assigned Multiple Access

- Ausnutzung des Kanals bei Aloha nur sehr gering:
 - Aloha (18%)
 - Slotted Aloha (36%)
 - Annahme von Poisson-Verkehr
- Mit Reservierungen kann Ausnutzung auf 80% erhöht werden:
 - Sender *reserviert* einen zukünftigen Zeitschlitz
 - innerhalb dieses Zeitschlitzes kann dann ohne Kollision sofort gesendet werden
 - dadurch entsteht aber auch eine höhere Gesamtverzögerung
 - typisch für Satellitenstrecken

DAMA – Explizite Reservierung

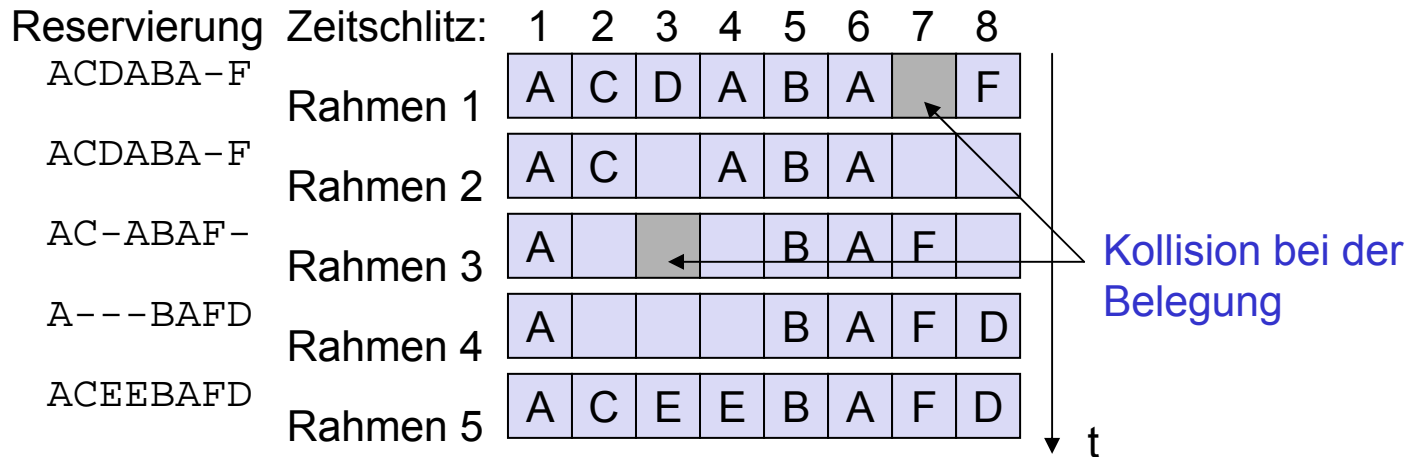
- Zwei Modi:
 - *ALOHA-Modus* für die Reservierung:
In einem weiter aufgegliederten Zeitschlitz kann eine Station Zeitschlitz reservieren.
 - *Reserved-Modus* für die Übertragung von Daten in erfolgreich reservierten Zeitschlitz (keine Kollision mehr möglich).
- Wesentlich ist, dass die in den einzelnen Stationen geführten Listen über Reservierungen miteinander zu jedem Punkt übereinstimmen, daher muss mitunter synchronisiert werden.



DAMA – Implizite Reservierung

Implizite Reservierung (PRMA - Packet Reservation MA):

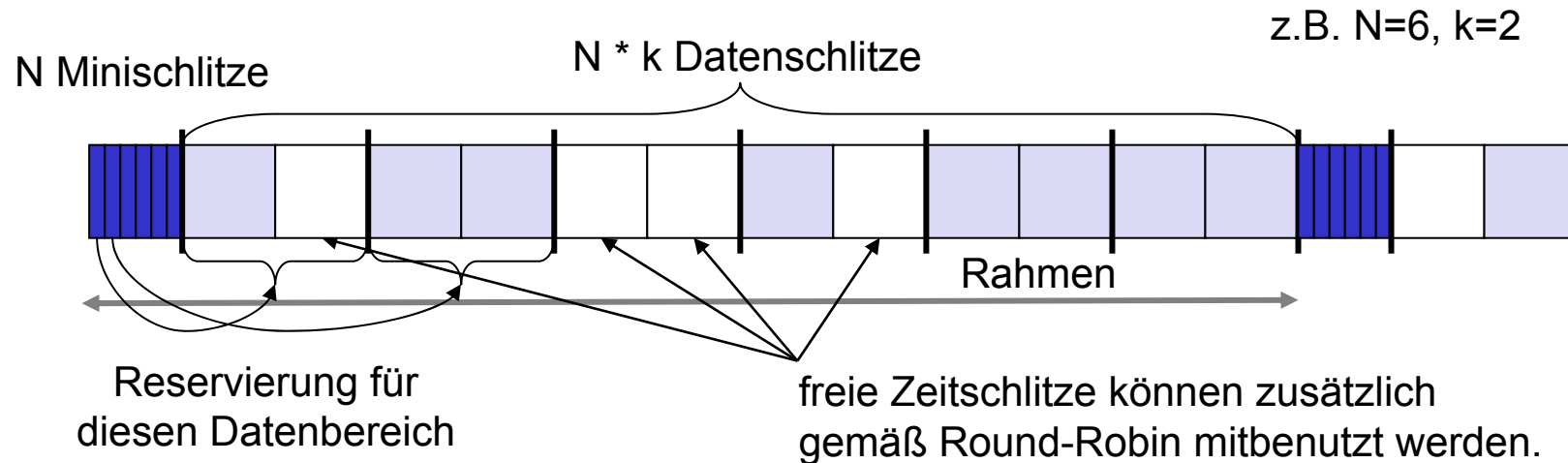
- Eine bestimmte Anzahl von Zeitschlitzten bilden einen Übertragungsrahmen, der sich zyklisch wiederholt.
- Stationen belegen einen (leeren) Zeitschlitz gemäß dem “Slotted ALOHA”-Prinzip.
- Ein einmal erfolgreich belegter Zeitschlitz bleibt in allen darauffolgenden Übertragungsrahmen der erfolgreichen Station zugewiesen, aber nur solange, bis diese den Zeitschlitz nicht mehr benötigt und dieser somit leer bleibt.



DAMA – Reservation-TDMA

Reservation Time Division Multiple Access

- Ein Rahmen besteht aus N Minizeitschlitz und x Datenzeitschlitz.
- Jede Station hat ihren Minizeitschlitz und kann darin bis zu k Datenzeitschlitz reservieren (d.h. $x = N * k$).
- Im Daten-Teil des Rahmens können nicht benutzte Zeitschlitz gemäß Round-Robin-Methode von anderen Stationen mitverwendet werden.



Handshaking-Verfahren



Carrier Sense Multiple Access (CSMA)

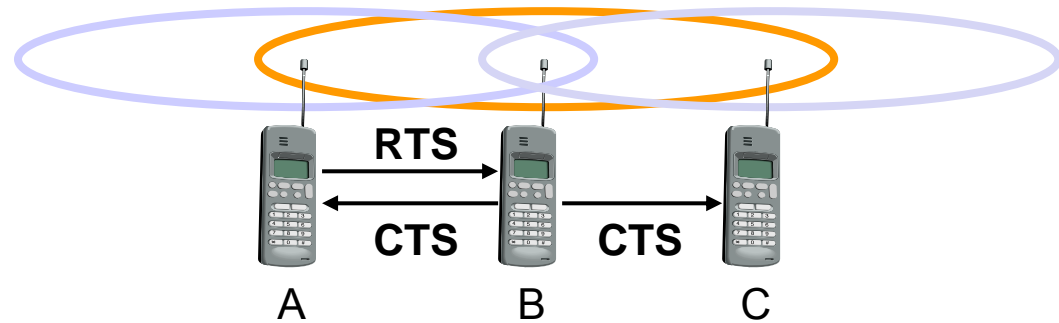
- Sender hört Medium ab (überprüft Energiepegel), um Kollisionen *zu Beginn der Übertragung* zu vermeiden
- Varianten:
 - **Persistentes CSMA:**
Senden, sobald Kanal frei ist
 - **Non-persistentes CSMA:**
Falls Kanal belegt, nach zufälliger Zeitspanne noch einmal versuchen
 - **p-persistentes CSMA:**
Kanal ist in Zeitschlitz eingeteilt. Falls Kanal frei, mit Wahrscheinlichkeit $0 < p < 1$ senden, andernfalls im nächsten Zeitschlitz noch einmal versuchen
- Aber: Während des Sendens können noch immer Kollisionen auftreten!

Kollisionsvermeidung mit Handshaking

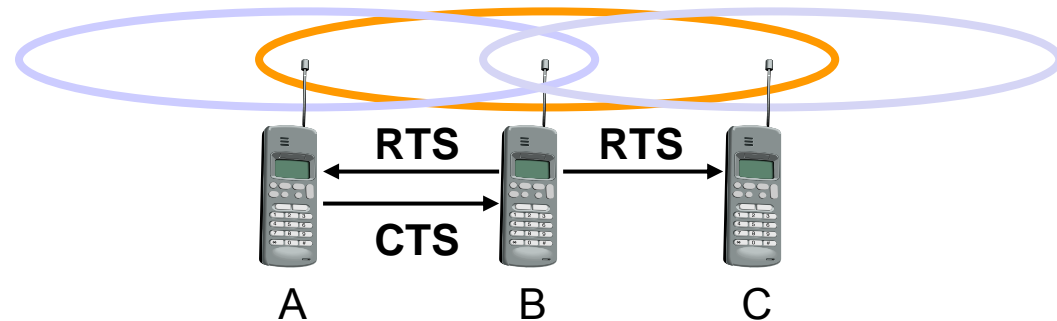
- Kollisionsvermeidung durch *Control Handshaking*
 - Auf gleichem Kanal wie Datenübertragung (In-Band)
- **Multiple access with collision avoidance (MACA)**
 - Drei-Wege-Handshake minimiert Anzahl versteckter Endgeräte
 - Sender sendet kurzes *Request to Send (RTS)* Paket
 - Empfänger antwortet mit *Clear to Send (CTS)* Paket
 - Sender sendet Daten
- **Multiple access with collision avoidance by Invitation (MACA-BI)**
 - Sender benötigt „Einladung“ zum Senden vom Empfänger
 - RTS fällt weg, Ready to Receive (RTR) statt CTS
- **Floor Acquisition Multiple Access (FAMA)**
 - Mischung aus CSMA und MACA
- Aber: Während Handshaking-Phase können noch Kollisionen auftreten

Beispiele RTS-CTS Handshake

- Vermeidung des Problems versteckter Endgeräte
 - A und C wollen zu B senden
 - A sendet zuerst RTS
 - C wartet, da es das CTS von B hört



- Vermeidung des Problems „ausgelieferter“ Endgeräte
 - B will zu A, C irgendwohin senden
 - C wartet nun nicht mehr unnötig, da es nicht das CTS von A empfängt



- Kollisionsvermeidung durch *Out-of-Band Signalisierung*
 - Dadurch keine Self-Interference
 - Nachteil: Es muss ein weiterer Kanal belegt werden
- **Busy tone multiple access (BTMA)**
 - Jeder, der andauernde Übertragung auf Datenkanal hört, sendet „Busy Tone“ auf einem anderen Übertragungskanal (Kontrollkanal)
 - Alle Geräte im 2-hop Umkreis eines aktiven Knotens warten
 - Keine versteckte Endgeräte, aber viele ausgelieferte Endgeräte
- **Receiver initiated busy tone multiple access (RI-BTMA)**
 - Nur Empfänger sendet „Busy Tone“
 - Kaum ausgelieferte Endgeräte, aber Busy Tone kann erst gesendet werden, wenn Empfänger Übertragungswunsch dekodiert hat
- **Wireless Collision Detect (WCD) Protokoll**
 - Kombiniert BTMA und RI-BTMA: Zwei Arten von „Busy Tones“
 - Zunächst wie BTMA: Knoten senden Busy Tone „collision detect“
 - Empfänger sendet dann „feedback-tone“, sobald er Übertragungswunsch erkannt hat

IEEE 802.15.1 – Bluetooth



Bluetooth – Radio and Link Manager

Radio & Baseband

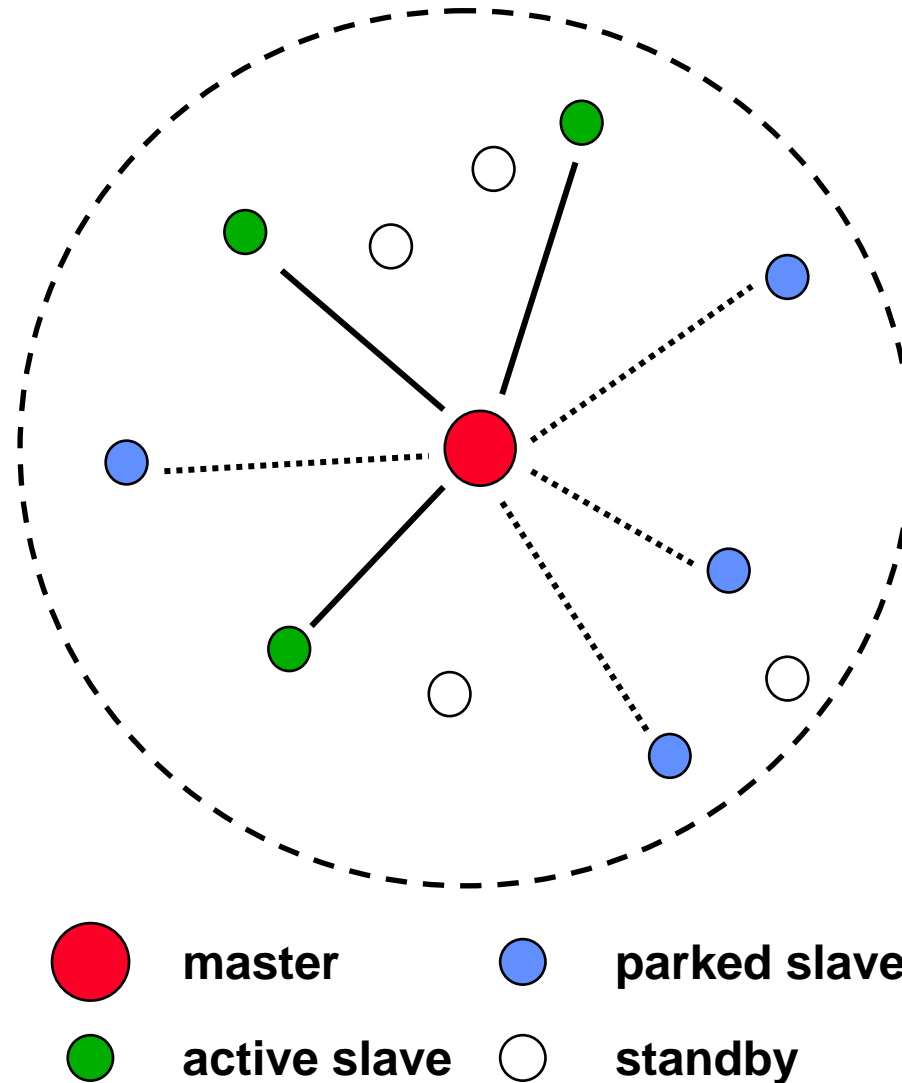
- Global 2.4 GHz ISM band (2.402 - 2.480; 79 channels)
- 1M symbol / s
- 2 FSK modulation
 - 432 kbit/s bidirectional
 - 721 kbit/s asymmetrical
- Low power : 0 dBm (optional: +20 dBm with Power Control)
- Range approx. 10 m
- Fast FHSS (1600 hops/s)
- Long switching time (220 μ s)

Link Manager

- Piconet management
 - Attach and detach slaves
 - Master-slave switch
 - Establishing ACL and SCO links
 - Handling of low power modes: Hold, Sniff, Park
- Link configuration
 - Supported features
 - Quality of Service, usable packet types
 - Power Control
- Security Functions
 - Authentication
 - Encryption including key management
- Link Information

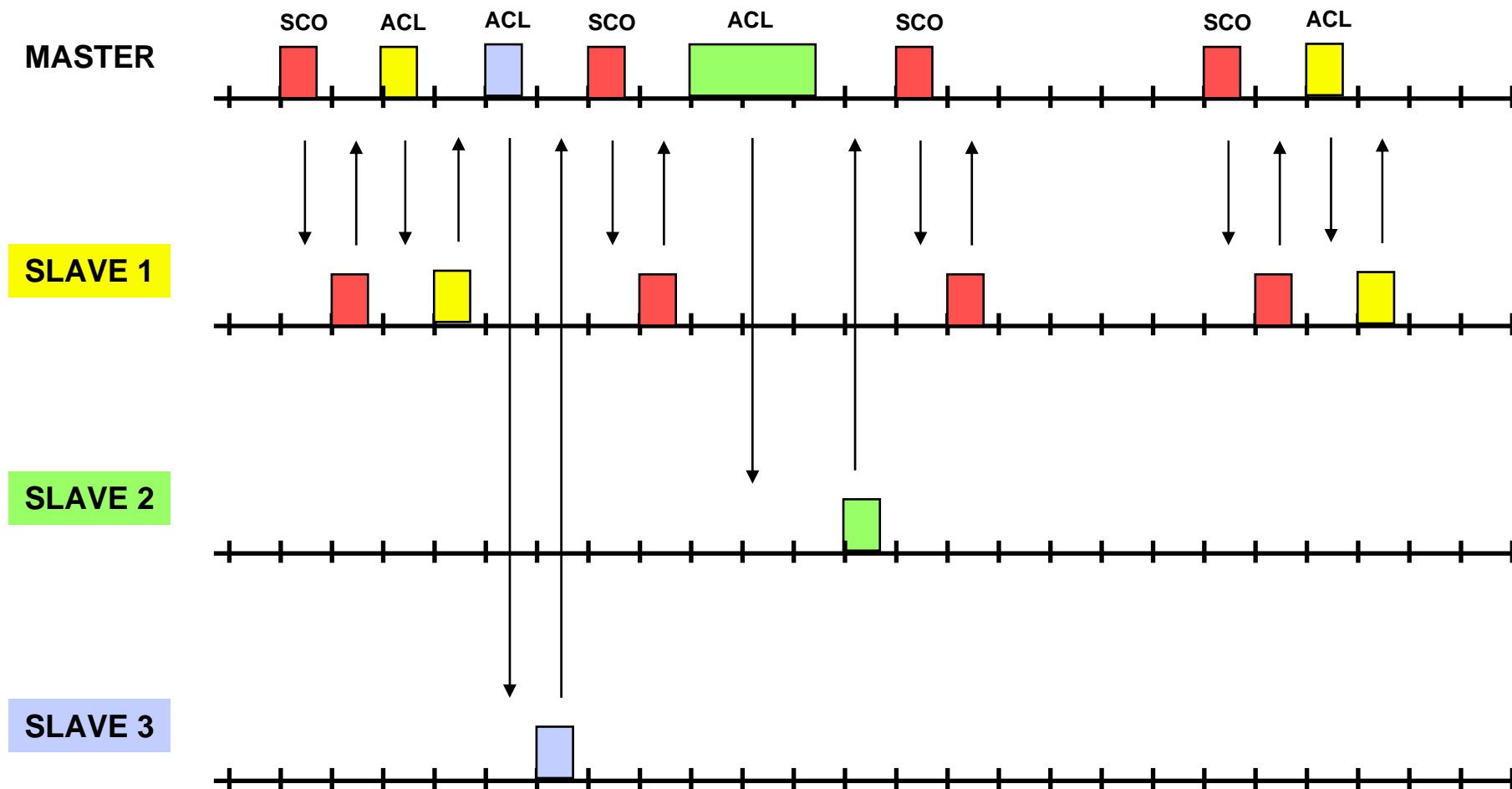
Bluetooth – Piconet

- Star Topology
 - 1 Master, up to 7 active slaves
 - Unlimited number of parked slaves
- Master:
 - determines hopping scheme and timing
 - Administers piconet (polling)
- Logical Channels
 - Asynchronous, packet oriented
 - Synchronous, connection-oriented (voice, slot reservation)



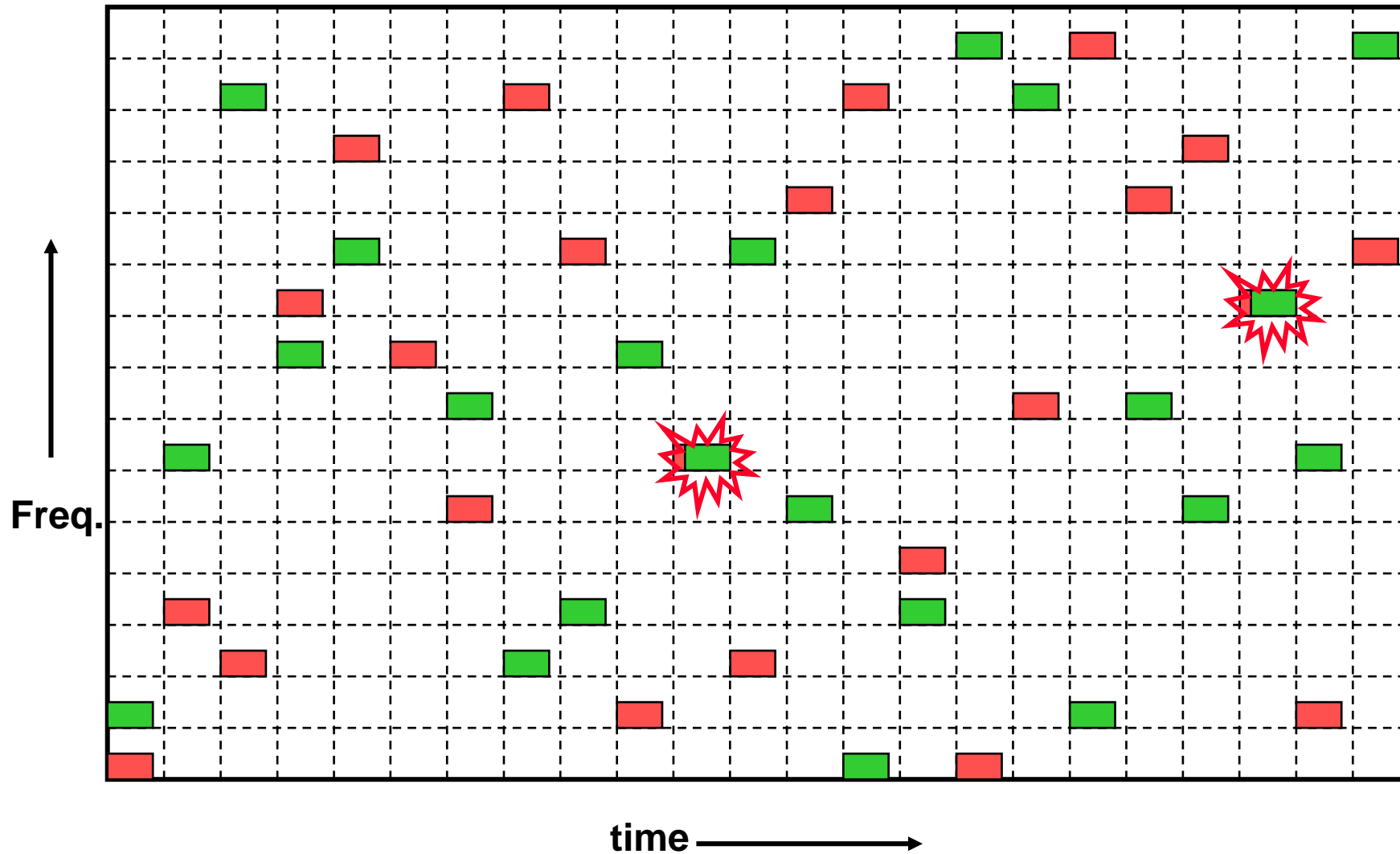
Quelle: Nokia

Bluetooth – Link Access Example



Quelle: Nokia

Bluetooth – Spectrum Usage Example



Quelle: Nokia

IEEE 802.11 – Wireless LAN



Verkehrsarten

- Asynchroner Datendienst (standard)
 - Datenaustausch auf „best-effort“-Basis
 - Unterstützung von Broadcast und Multicast
- Zeitbegrenzte Dienste (optional)
 - implementiert über PCF (Point Coordination Function)

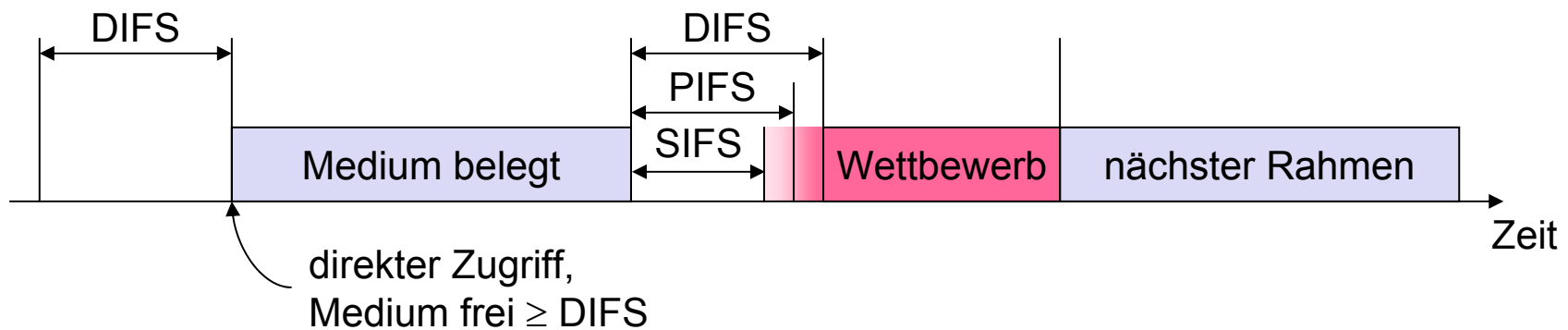
Medienzugriff: **Distributed Foundation Wireless MAC**

- DFWMAC-DCF CSMA/CA (standard)
 - Kollisionsvermeidung durch zufälligen „backoff“-Mechanismus
 - Mindestabstand zwischen aufeinanderfolgenden Paketen
 - Empfangsbestätigung durch ACK (nicht bei Broadcast)
- DFWMAC-DCF mit RTS/CTS (optional)
 - Distributed Foundation Wireless MAC
 - Vermeidung des Problems „versteckter“ Endgeräte (Hidden Terminal Problem)
- DFWMAC-PCF (optional)
 - Polling-Verfahren mit einer Liste im Access Point

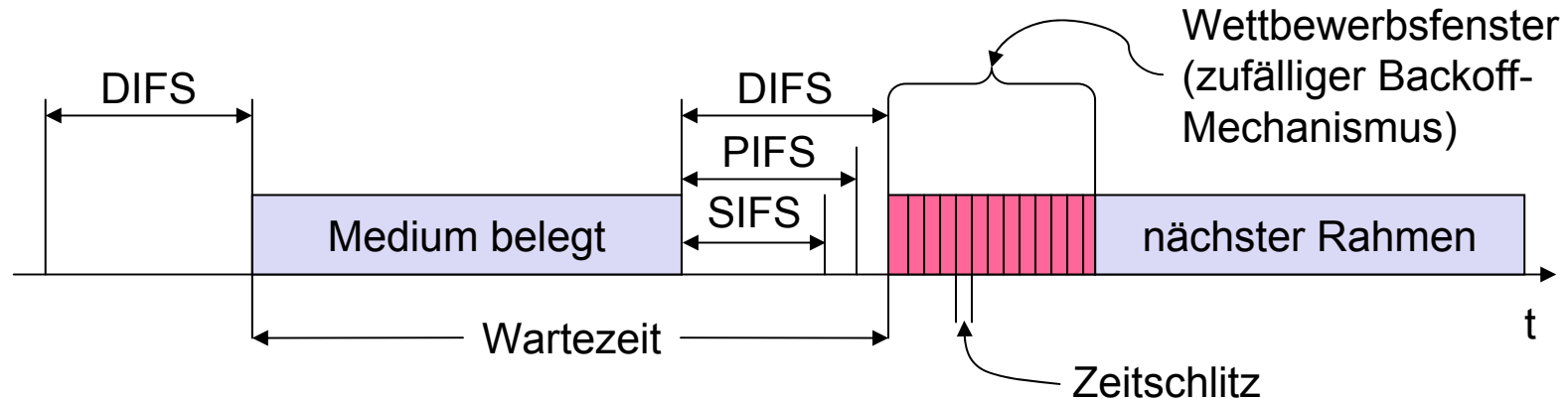
802.11 - MAC-Schicht (2)

Prioritäten

- werden durch Staffelung der Zugriffszeitpunkte geregelt
- keine garantierten Prioritäten
- SIFS (Short Inter Frame Spacing)
 - höchste Priorität, für ACK, CTS, Antwort auf Polling
- PIFS (PCF IFS)
 - mittlere Priorität, für zeitbegrenzte Dienste mittels PCF
- DIFS (DCF IFS)
 - niedrigste Priorität, für asynchrone Datendienste



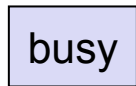
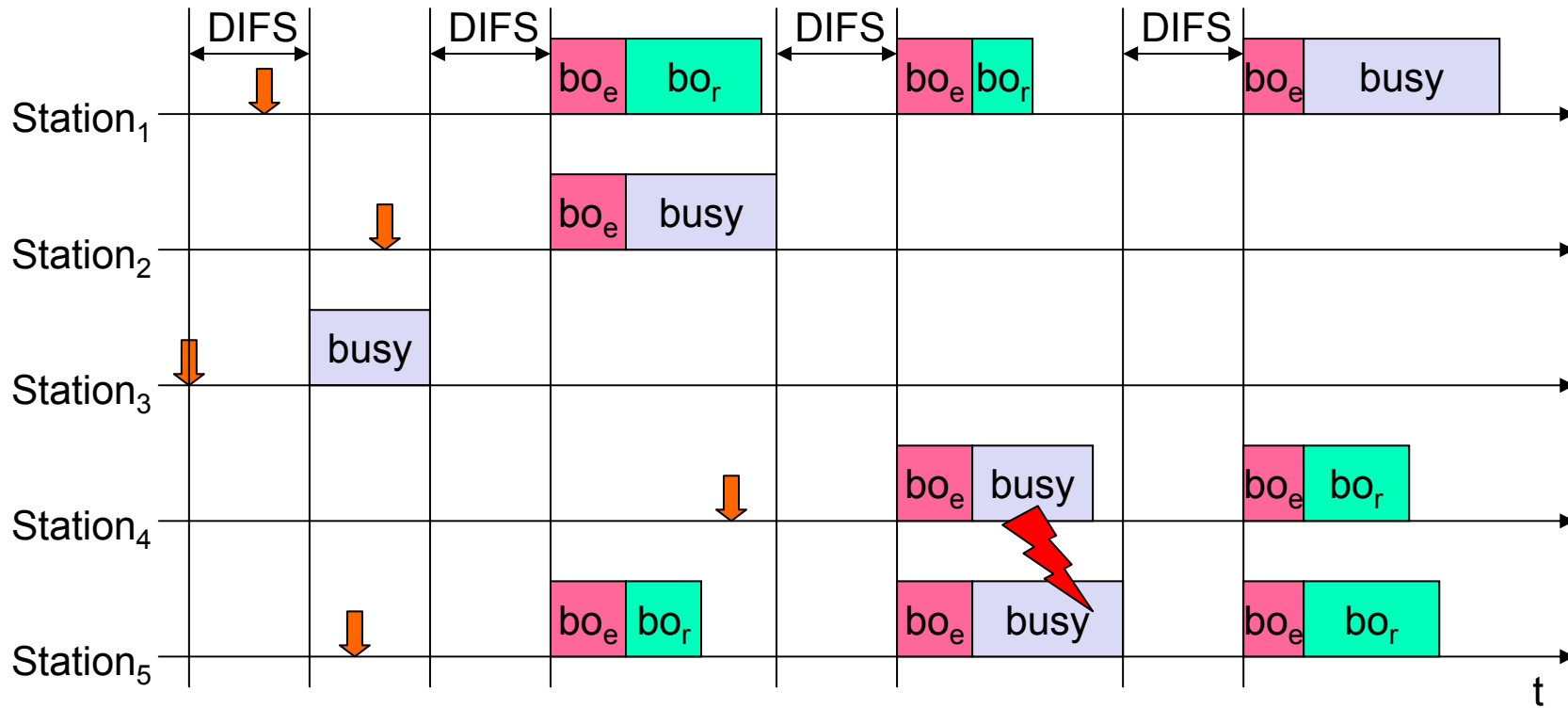
802.11 - CSMA/CA-Verfahren (1)



CSMA/CA – Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance

- Sendewillige Station hört das Medium ab
- Ist das Medium für die Dauer eines Inter-Frame Space (IFS) frei, wird gesendet (IFS je nach Sendertyp gewählt)
- Ist das Medium belegt, wird auf einen freien IFS gewartet und dann zusätzlich um eine zufällige Backoff-Zeit verzögert (Kollisionsvermeidung, in Vielfachen einer Slot-Zeit)
- Wird das Medium während der Backoff-Zeit von einer anderen Station belegt, bleibt der Backoff-Timer so lange stehen

802.11 - Stationen im Wettbewerb



Medium belegt (frame, ack etc.)



verstrichene backoff Zeit



Paketankunft am MAC-SAP
(Service Access Point)

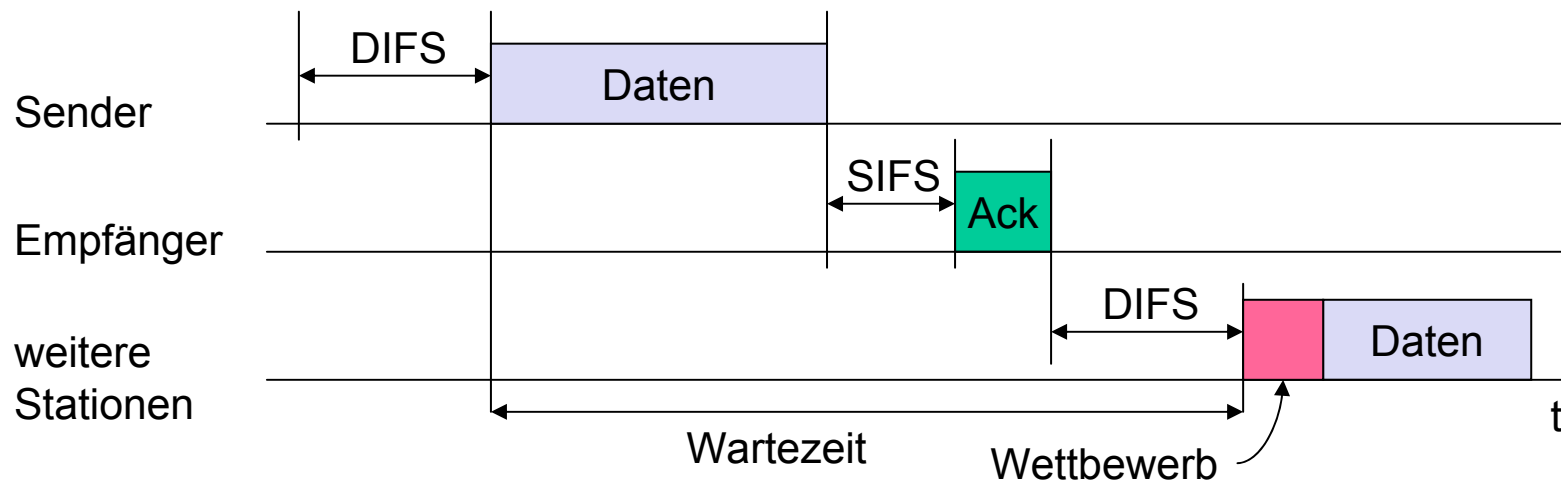


verbleibende backoff Zeit

802.11 - CSMA/CA-Verfahren (2)

Senden von Unicast-Paketen

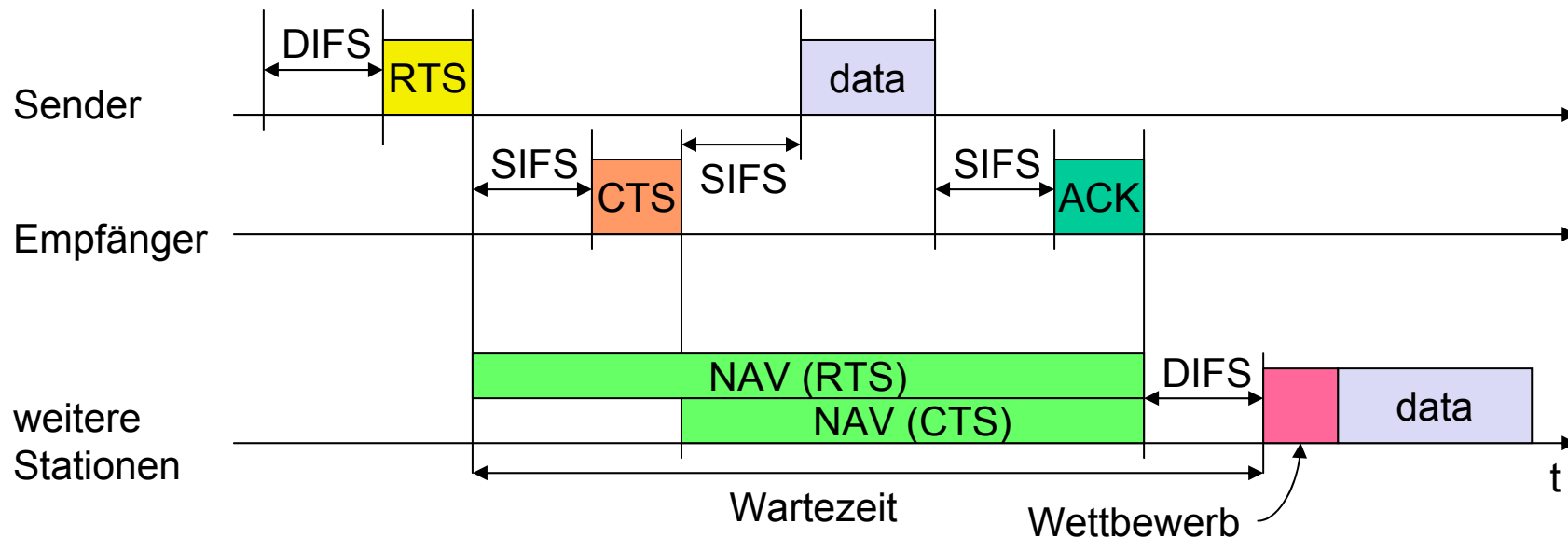
- Daten können nach Abwarten von DIFS gesendet werden
- Empfänger antworten sofort (nach SIFS), falls das Paket korrekt empfangen wurde (CRC)
- Im Fehlerfall wird das Paket automatisch wiederholt (neuer Wert für Backoff)



DFWMAC mit RTS/CTS-Erweiterung

Senden von Unicast-Paketen

- RTS mit Belegungsdauer als Parameter kann nach Abwarten von DIFS gesendet werden
- Bestätigung durch CTS nach SIFS durch Empfänger
- Sofortiges Senden der Daten möglich, Bestätigung wie gehabt
- Andere Stationen speichern die im RTS und CTS gesendete Belegungsdauer im Net Allocation Vector (NAV) ab → Virtuelle Reservierungen



Questions?



Thomas Fuhrmann

Department of Informatics
Self-Organizing Systems Group
c/o I8 Network Architectures and Services
Technical University Munich, Germany

fuhrmann@net.in.tum.de