Rechnernetze I

SoSe 2025

Roland Wismüller
Universität Siegen
roland.wismueller@uni-siegen.de
Tel.: 0271/740-4050, Büro: H-B 8404

Stand: 1. April 2025

Rechnernetze I

SoSe 2025

10 Netzwerksicherheit

Inhalt

- Sicherheitsanforderungen
- Sicherheitsprobleme der Internet-Protokolle
- Kryptographische Grundlagen
- Sicherheitsmechanismen für Protokolle
- Beispiele sicherer Protokolle
- Firewalls

- Peterson, Kap. 8.1, 8.2, 8.3.1, 8.3.3, 8.4
- CCNA, Kap. 11.2

10.1 Sicherheitsanforderungen

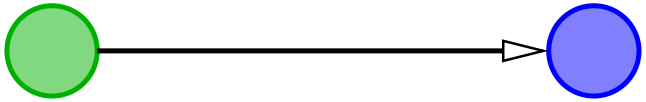
- In Netzwerken wird persönliche / wertvolle / vertrauliche Information übermittelt
  - Information sollte nur Berechtigen bekannt werden!
  - Authentizität der Information?
- Wachsende Bedeutung der Netzwerksicherheit wegen
  - steigender Vernetzung
    - höheres Angriffspotential
  - neuer Einsatzgebiete
    - z.B. e-Business: elektronische Zahlung / Verträge

Allgemeine Sicherheitsanforderungen

- **(Informations-)Vertraulichkeit (*confidentiality*)**
  - Schutz vor unautorisierter Informationsgewinnung
- **(Daten-)Integrität (*integrity*)**
  - Schutz vor unautorisierter Veränderung von Daten
- **(Nachrichten-)Authentizität (*message authenticity*)**
  - Urheber der Daten kann korrekt identifiziert werden
- **Verbindlichkeit (*nonrepudiation*)**
  - Handlungen können nicht abgestritten werden
- **Verfügbarkeit (*availability*)** von Diensten
- **Anonymität** der Kommunikationspartner

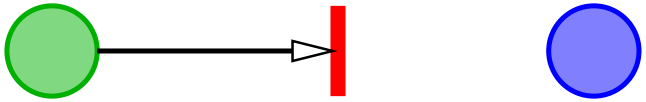
Angriffe auf die Netzwerksicherheit

Normaler Informationsfluß



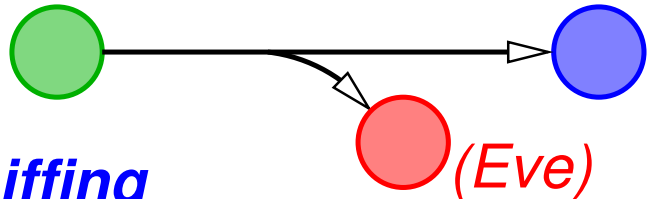
Quelle *(Alice)* Ziel *(Bob)*

Unterbrechung (Verfügbarkeit)



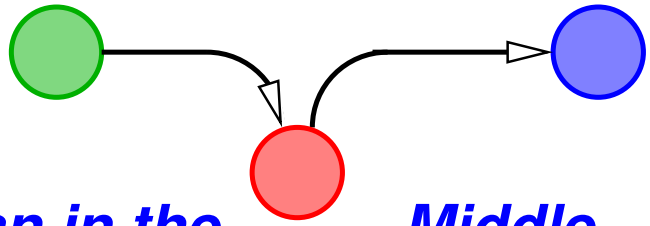
Denial of Service

Abhören (Vertraulichkeit)



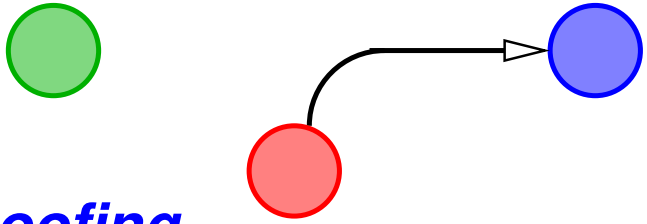
Sniffing *(Eve)*

Modifikation (Integrität)



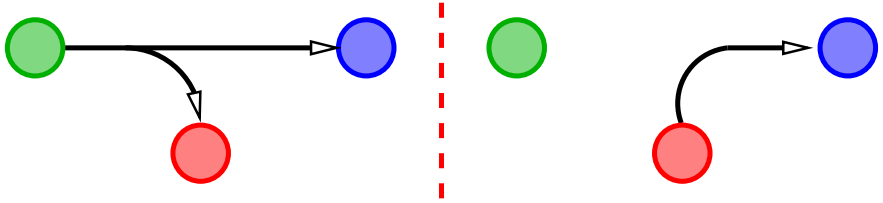
Man in the Middle

Erzeugung (Authentizität)



Spoofing

Wiedereinspielen abgehörter Daten



Replay

★★★

Konkret: Alice sendet eine Nachricht an Bob

- **Vertraulichkeit**: niemand außer Alice und Bob erfahren den Inhalt der Nachricht
- **Integrität**: Bob kann sich (nach entsprechender Prüfung!) sicher sein, daß die Nachricht während der Übertragung nicht (absichtlich) verfälscht wurde
- **Authentizität**: Bob kann sich (nach entsprechender Prüfung!) sicher sein, daß die Nachricht von Alice gesendet wurde
- **Verbindlichkeit**: Alice kann nicht bestreiten, die Nachricht verfaßt zu haben
  D.h. Bob kann Dritten gegenüber **beweisen**, daß die Nachricht von Alice gesendet wurde

- Im Folgenden: Beschränkung auf diese vier Anforderungen

Ein Problem des IP-Protokolls: IP-Spoofing

- Viele IP-basierte Protokolle vertrau(t)en der Absenderadresse
  - z.B. UNIX-Dienste rsh, rcp, rlogin*:
    - Festlegung von *Trusted Hosts*
    - Zugriff von *Trusted Host* aus auch ohne Paßwort
- Aber: Angreifer kann IP-Pakete mit beliebiger (falscher) Absenderadresse versenden
  - z.B. um vorzutäuschen, ein *Trusted Host* zu sein
- **Problem**: fehlende Authentifizierung der Pakete in IPv4

* Inzwischen nicht mehr in Verwendung!

Ein Problem des IP-Protokolls: IP-Spoofing ...

- IP-Spoofing ist Basis vieler anderer Angriffe
- Gegenmaßnahmen:
  - nicht auf Senderadresse vertrauen
  - Router-Konfiguration: *Source Address Validation*
    - Prüfen, ob Paket mit angegebener Senderadresse aus dem jeweiligen Subnetz kommen kann
  - IPsec (neuer Internet-Standard):
    sichere Authentifizierung des Senders

Ein Problem durch Programmierfehler: *Ping of death*

- Fehler in der Implementierung des `ping`-Kommandos unter Windows 95:
  - `ping -l 65510 my.computer.de` sendet ein fragmentiertes IP-Paket der Länge 65538
- Fehler in (alten Versionen) fast aller Betriebssysteme:
  - Pufferüberlauf im Betriebssystemkern beim Zusammenbau des Pakets
  - Absturz des Systems, *Reboot*, ...
- **Problem**: fehlende Validierung der Eingabe

Ein Problem des DNS: DNS-Spoofing

- Angreifer kann falsche Zuordnung zwischen Hostnamen und IP-Adresse in DNS-Servern installieren
  - Zugriffe auf diesen Host werden z.B. auf Rechner des Angreifers umgeleitet (= *Man-in-the-Middle* Attacke)
  - z.B. gefälschte Web-Sites, Ausspionieren von Kreditkarteninfo, Paßworten, ...
- **Problem:** keine Authentizierung
- Schadensbegrenzung: keine *recursive queries* zulassen
  - nur DNS-Cache eines Rechners kann infiziert werden
- Lösungen: TSIG*, DNSSEC (IETF Standards)

* Transaction SIGnature

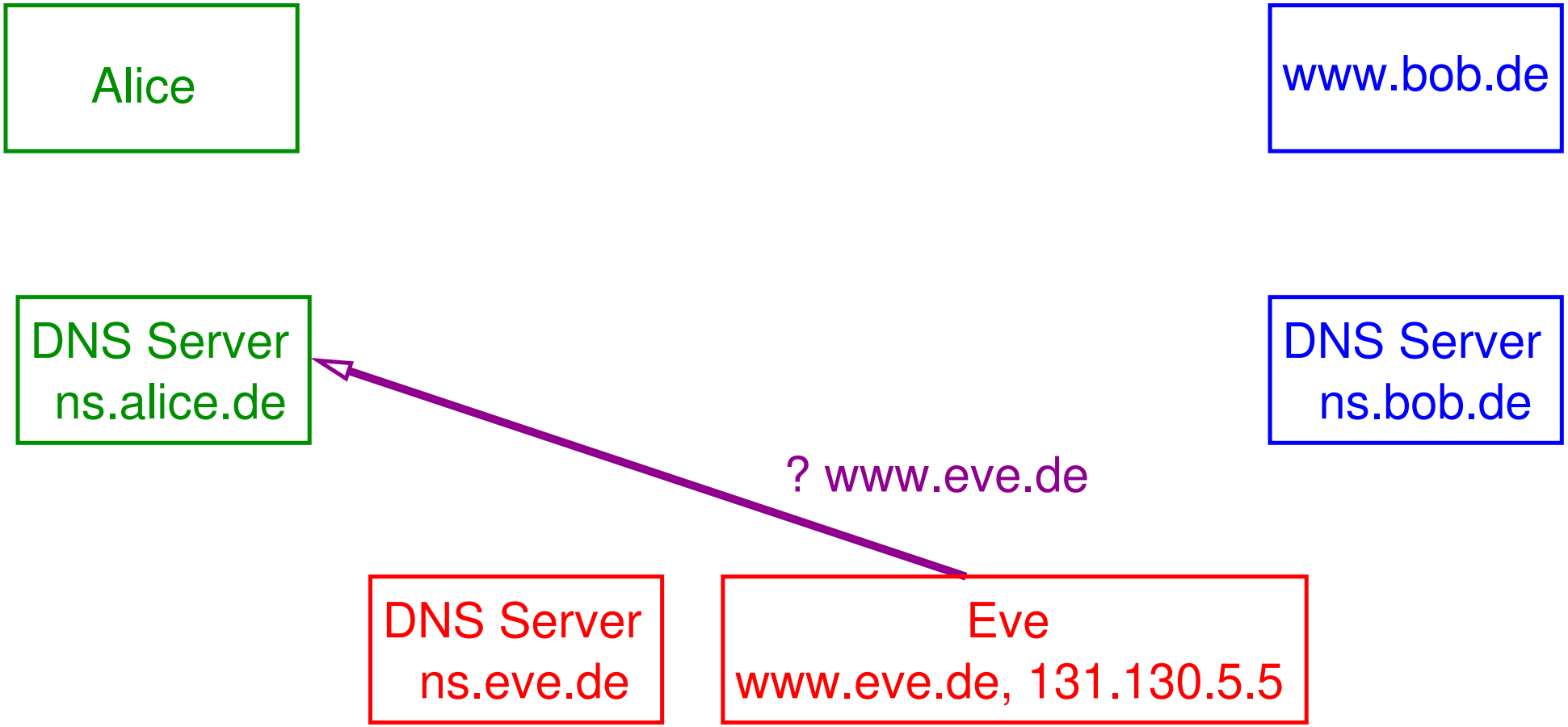
Angriff auf DNS: DNS-*Spoofing*

Angriff auf DNS: DNS-*Spoofing*

1. Ausspionieren der nächsten DNS Query–ID (qid)

Angriff auf DNS: DNS-*Spoofing*

1. Ausspionieren der nächsten DNS Query–ID (qid)

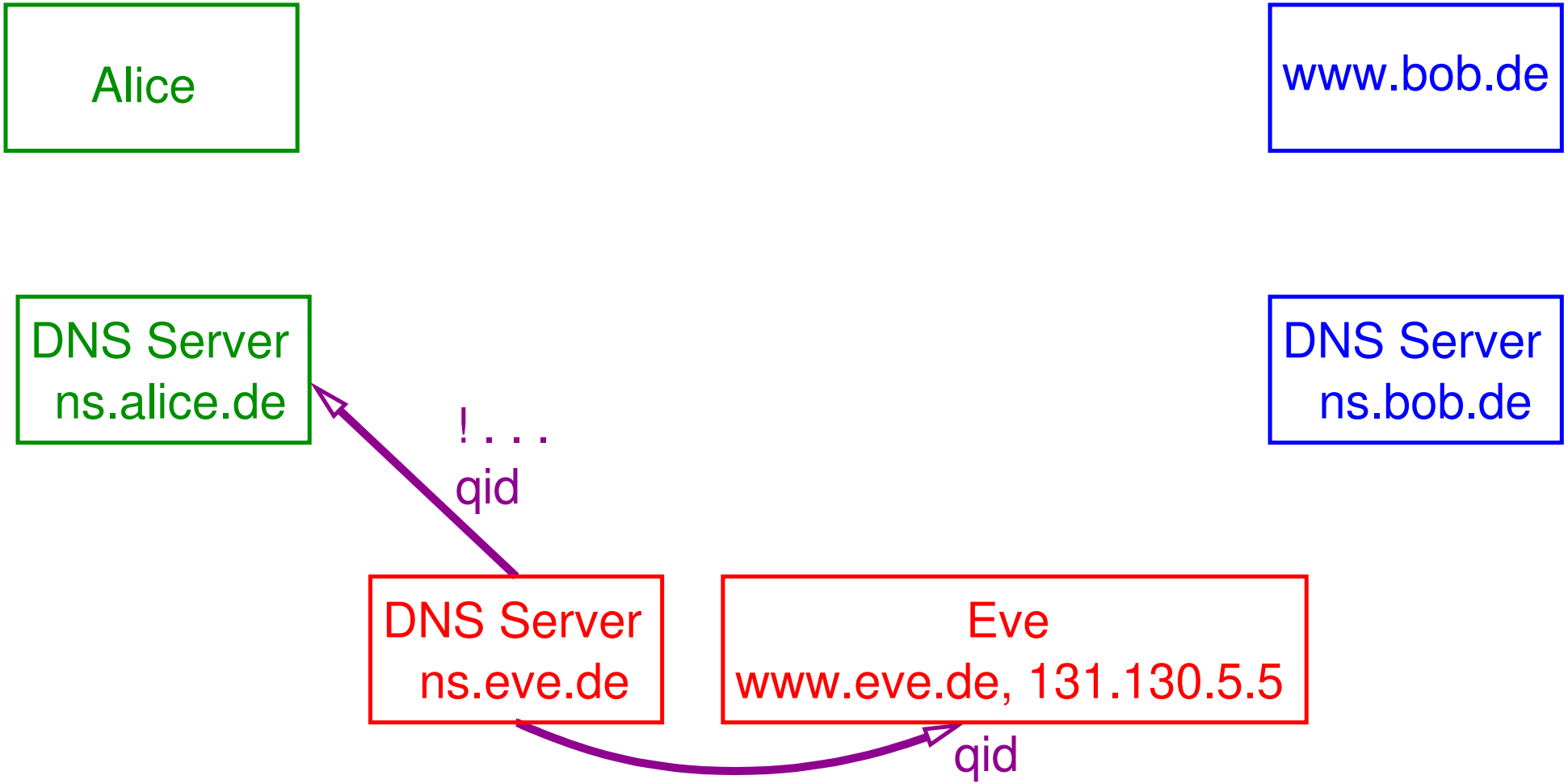


Angriff auf DNS: DNS-*Spoofing*

1. Ausspionieren der nächsten DNS Query–ID (qid)

Angriff auf DNS: DNS-*Spoofing*

1. Ausspionieren der nächsten DNS Query–ID (qid)

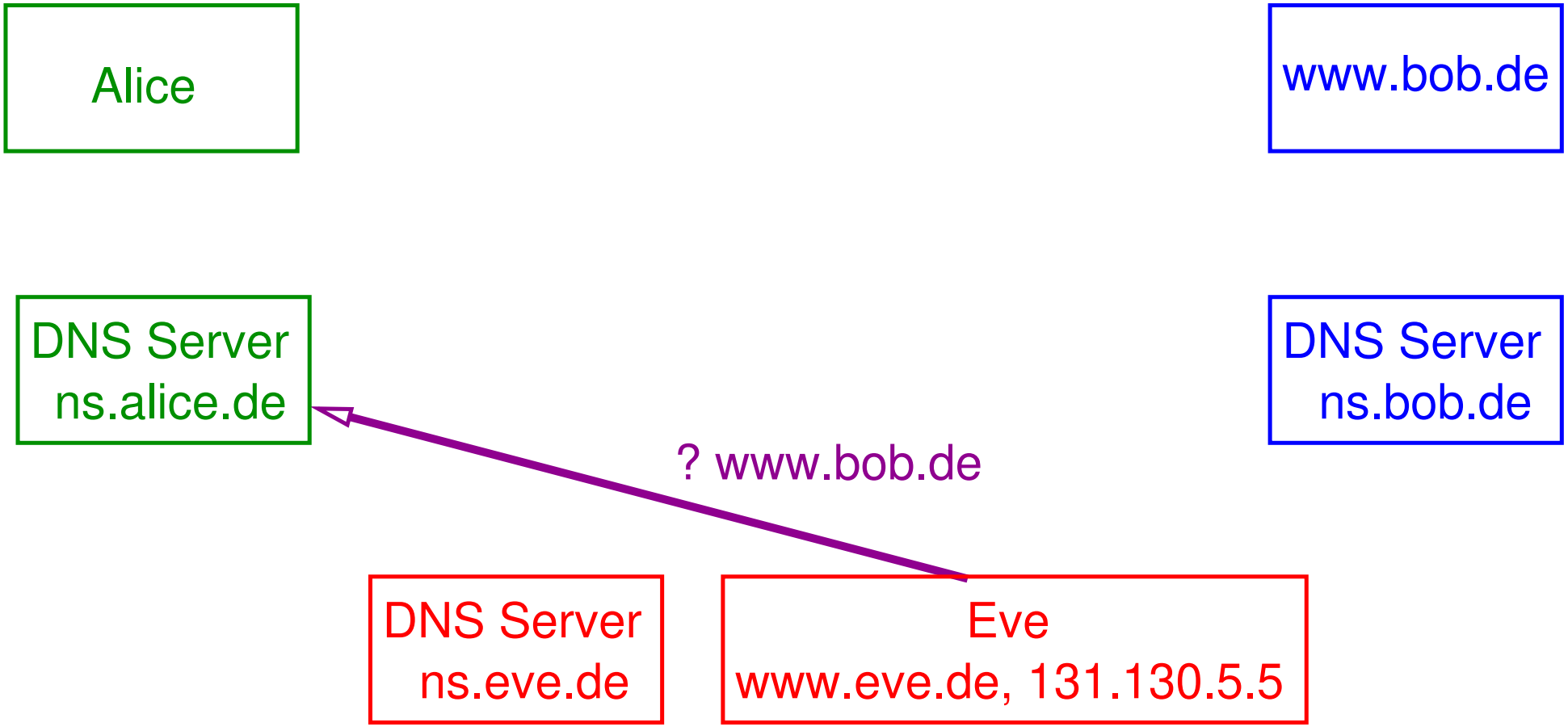


Angriff auf DNS: DNS-*Spoofing*

2. Falschen Eintrag im DNS Server erzeugen

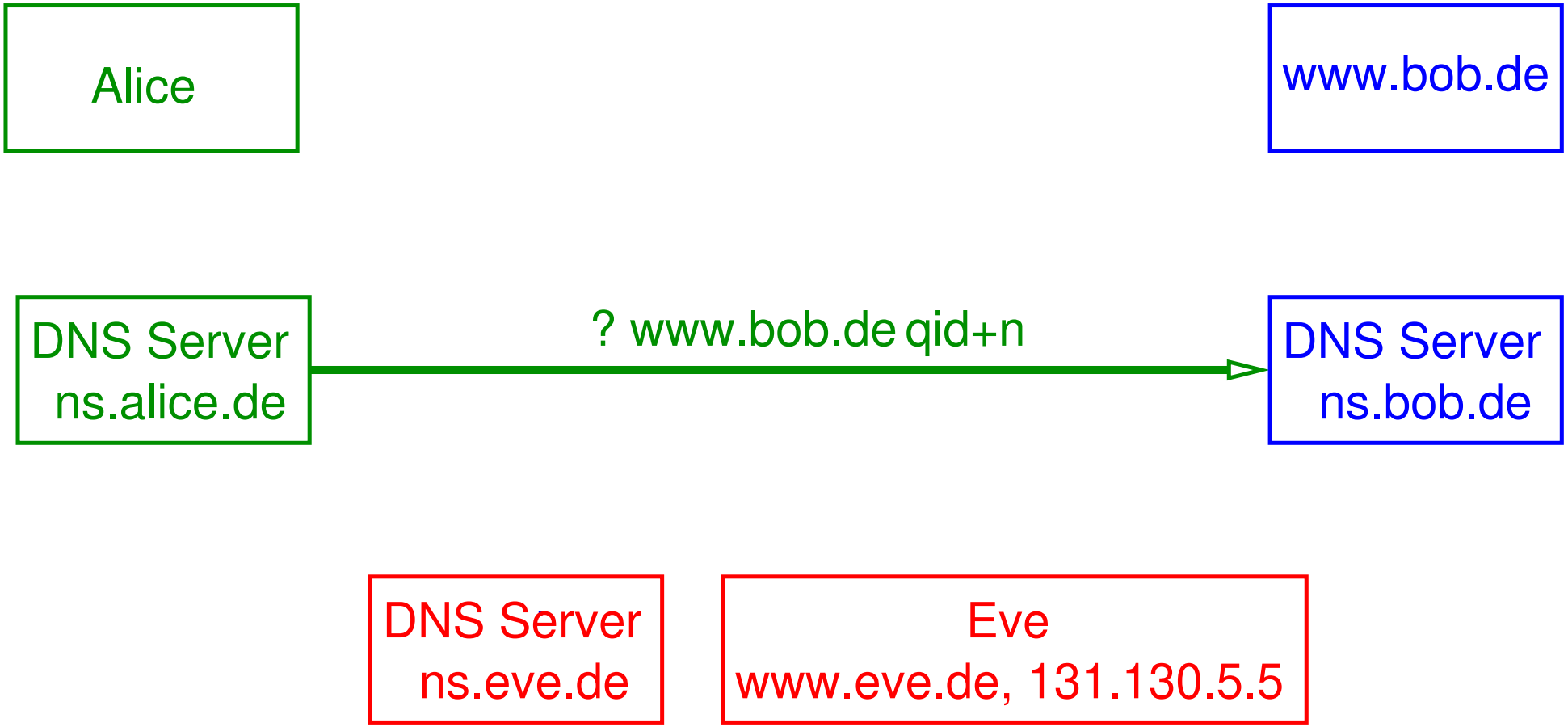
Angriff auf DNS: DNS-*Spoofing*

2. Falschen Eintrag im DNS Server erzeugen



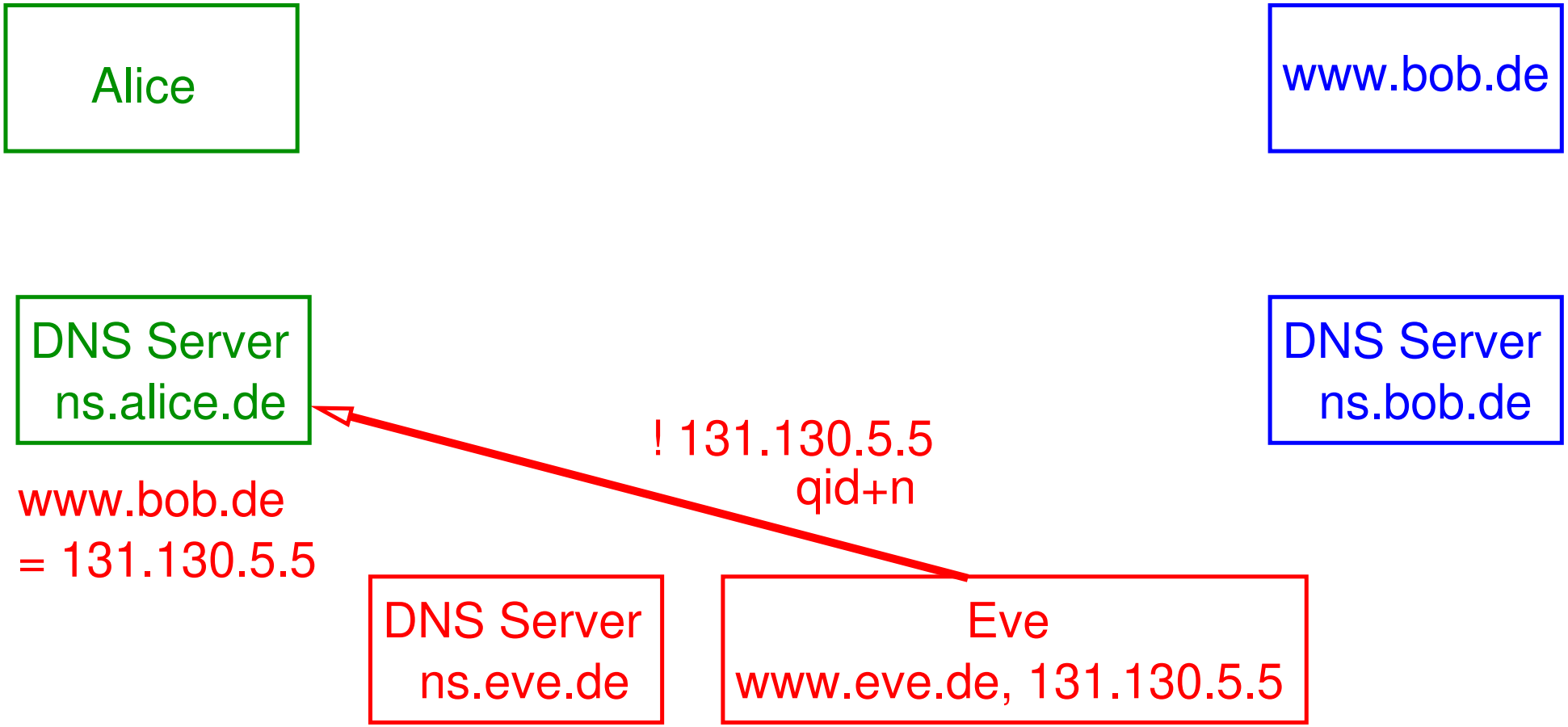
Angriff auf DNS: DNS-*Spoofing*

2. Falschen Eintrag im DNS Server erzeugen



Angriff auf DNS: DNS-*Spoofing*

2. Falschen Eintrag im DNS Server erzeugen



Angriff auf DNS: DNS-*Spoofing*

2. Falschen Eintrag im DNS Server erzeugen

Angriff auf DNS: DNS-*Spoofing*

3. Alice kontaktiert Eve und glaubt es wäre Bob!

Angriff auf DNS: DNS-*Spoofing*

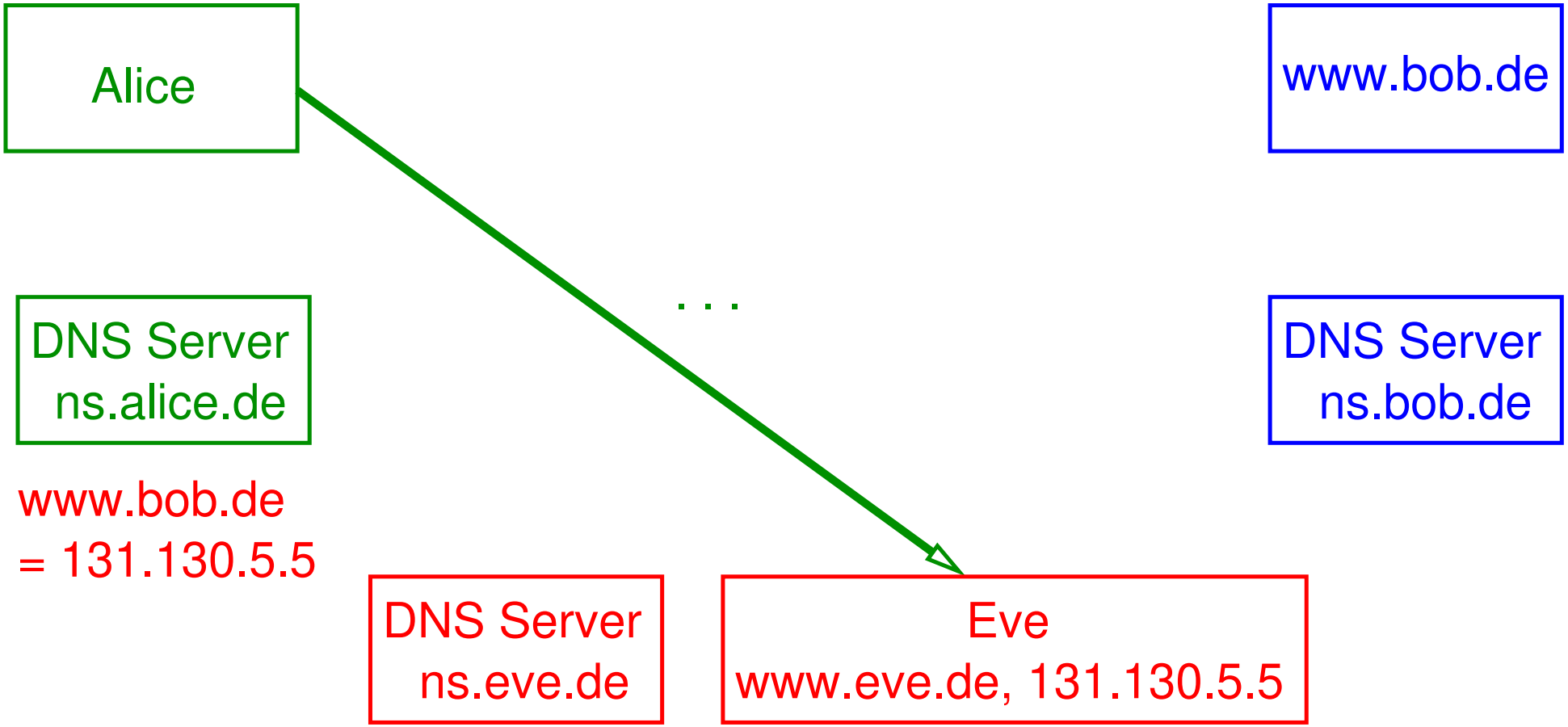
3. Alice kontaktiert Eve und glaubt es wäre Bob!

Angriff auf DNS: DNS-*Spoofing*

3. Alice kontaktiert Eve und glaubt es wäre Bob!

Angriff auf DNS: DNS-*Spoofing*

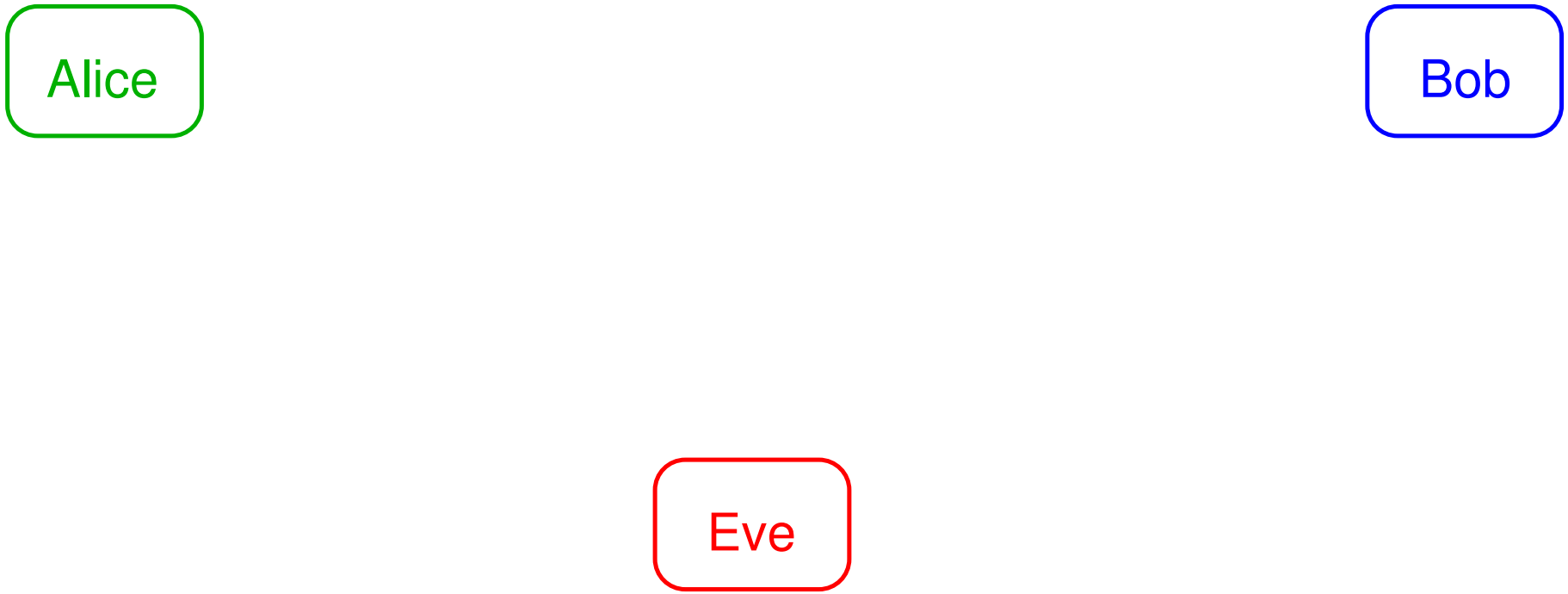
3. Alice kontaktiert Eve und glaubt es wäre Bob!



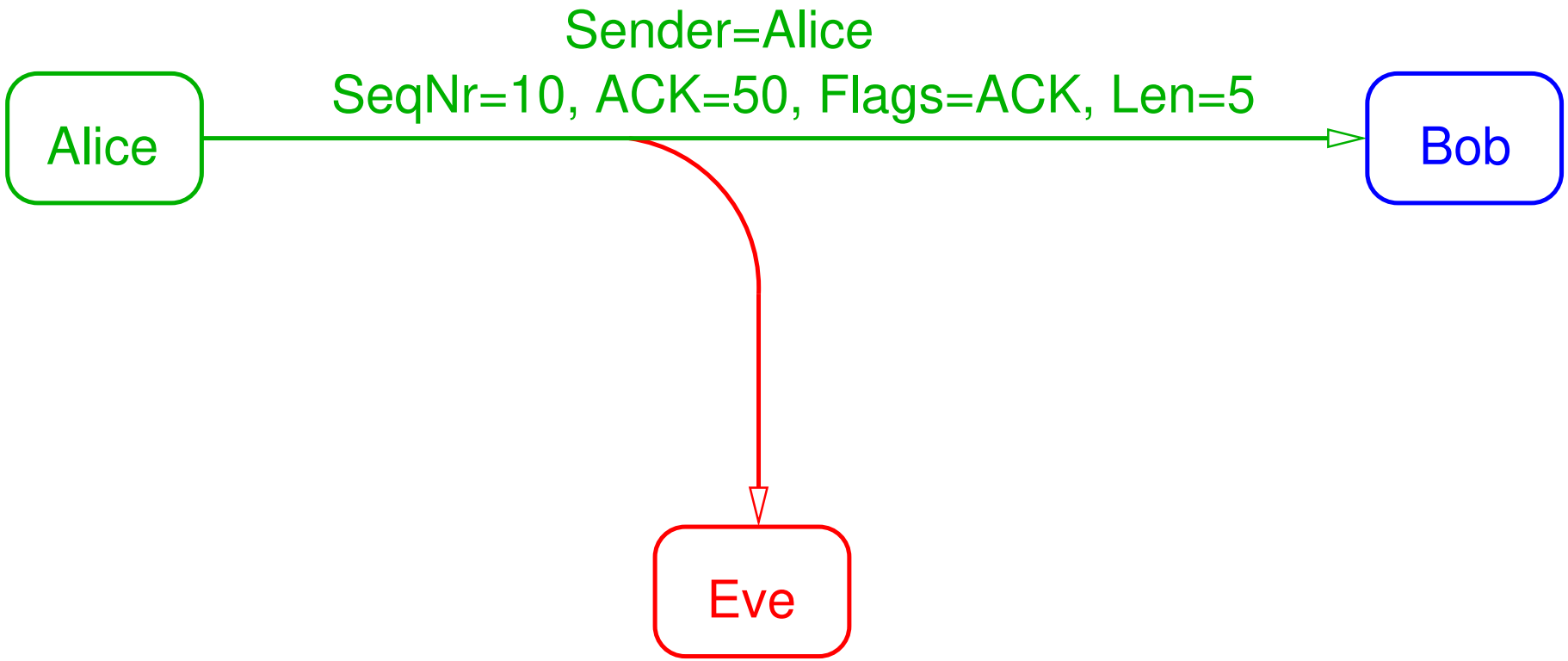
Ein Problem des TCP: Hijacking

- „Feindliche Übernahme“ einer offenen TCP-Verbindung
  - z.B. **nach erfolgter Authentifizierung von Alice**!
- Angriff:
  1. Senden eines gefälschten RST-Pakets (Verbindungsabbruch) an Alice
  2. Senden gefälschter Pakete an Bob, mit geschätzten oder abgehörten Sequenznummern
- Setzt i.d.R. Abhörmöglichkeit (z.B. Zugang zu lokalem Ethernet) voraus
  - Sequenznummern zählen die übertragenen Bytes

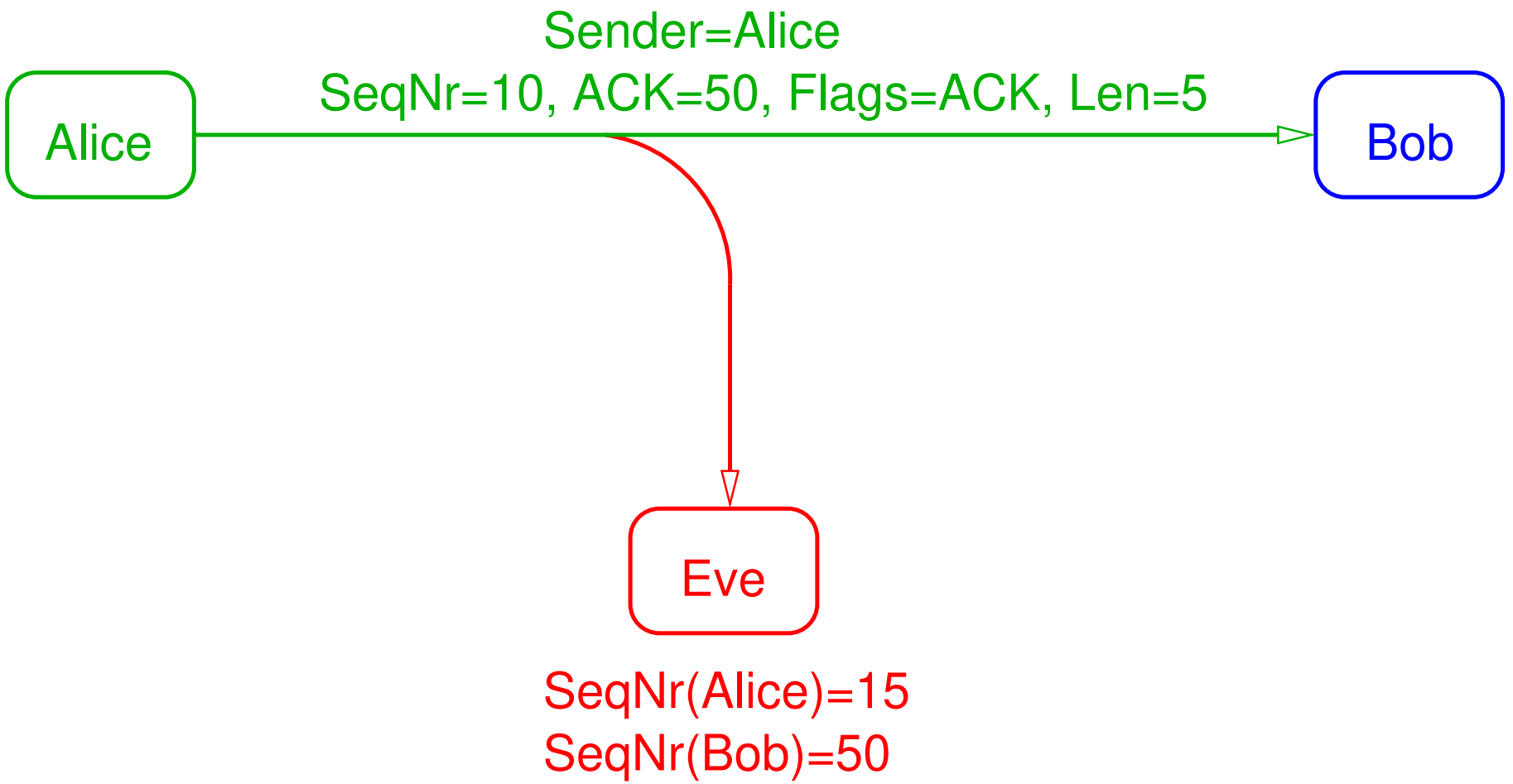
Ein Problem des TCP: Hijacking ...



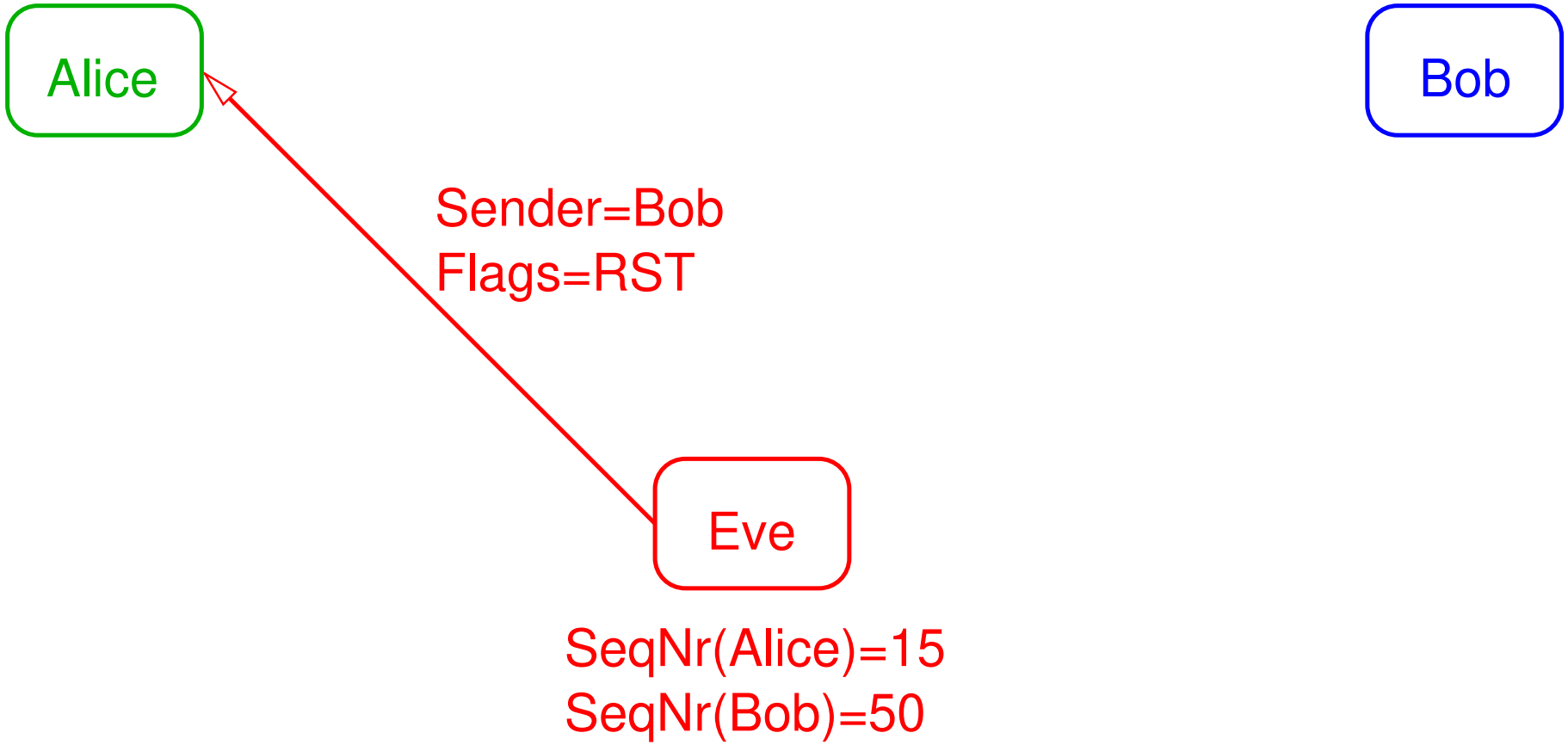
Ein Problem des TCP: Hijacking ...



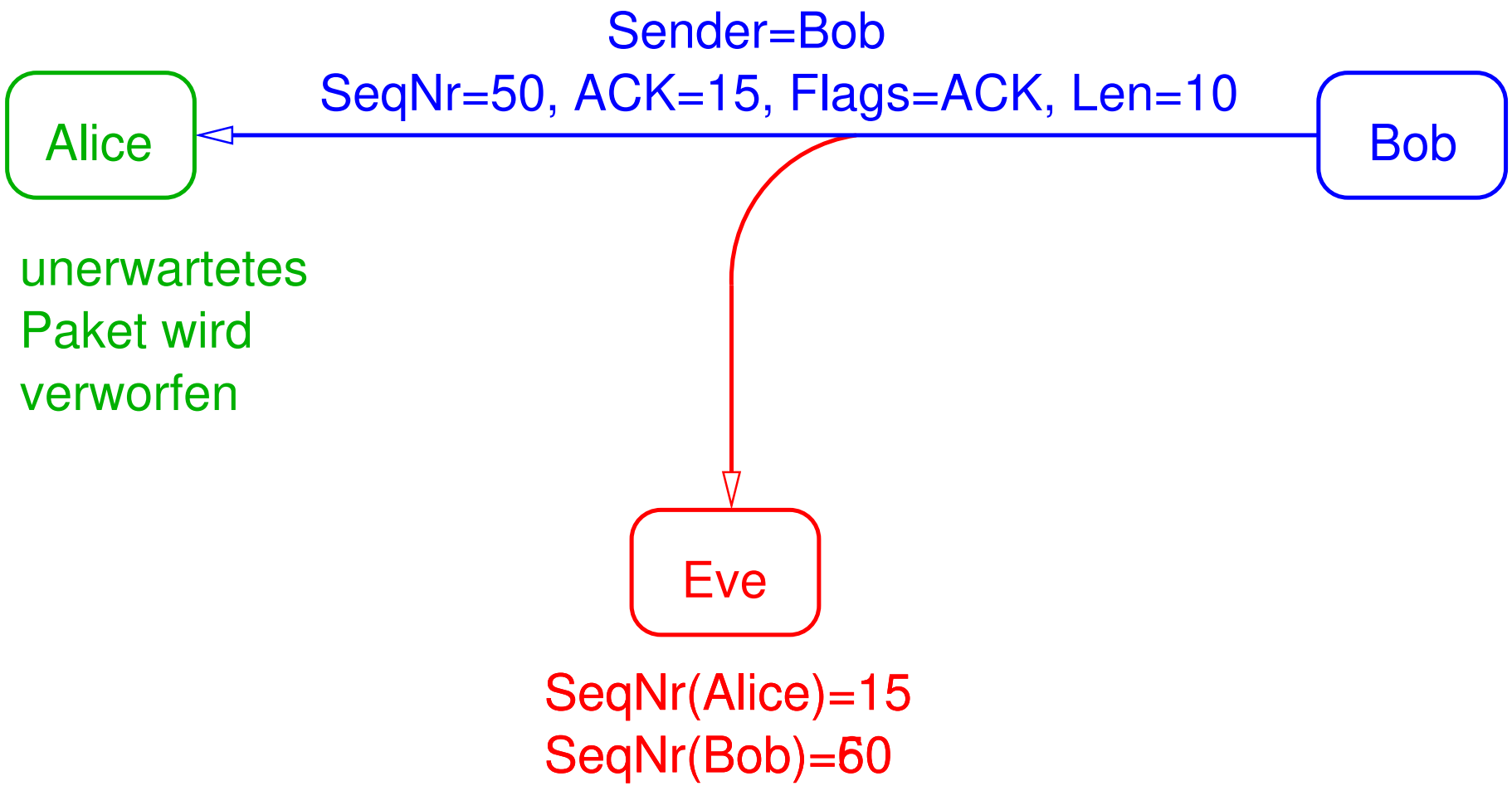
Ein Problem des TCP: Hijacking ...



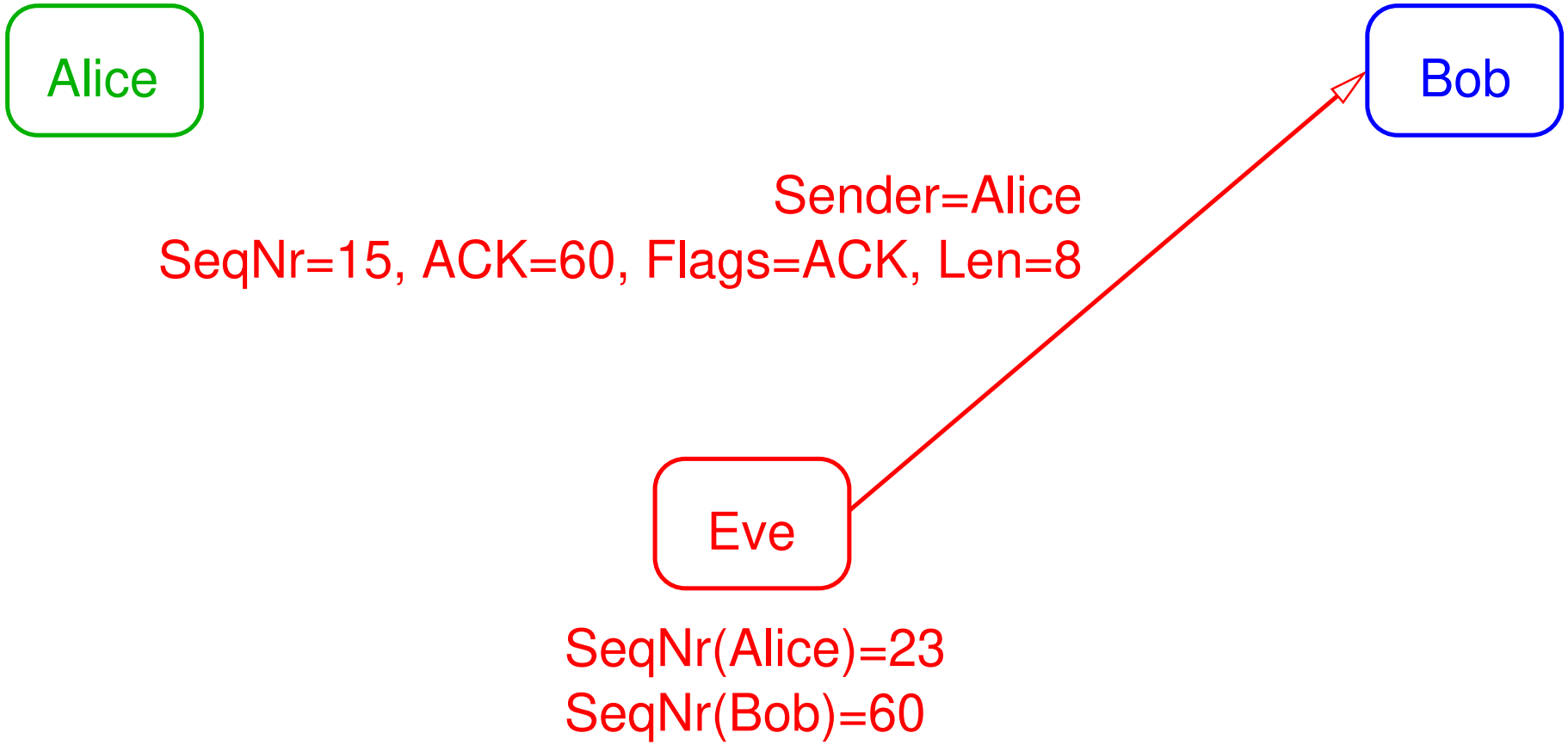
Ein Problem des TCP: Hijacking ...



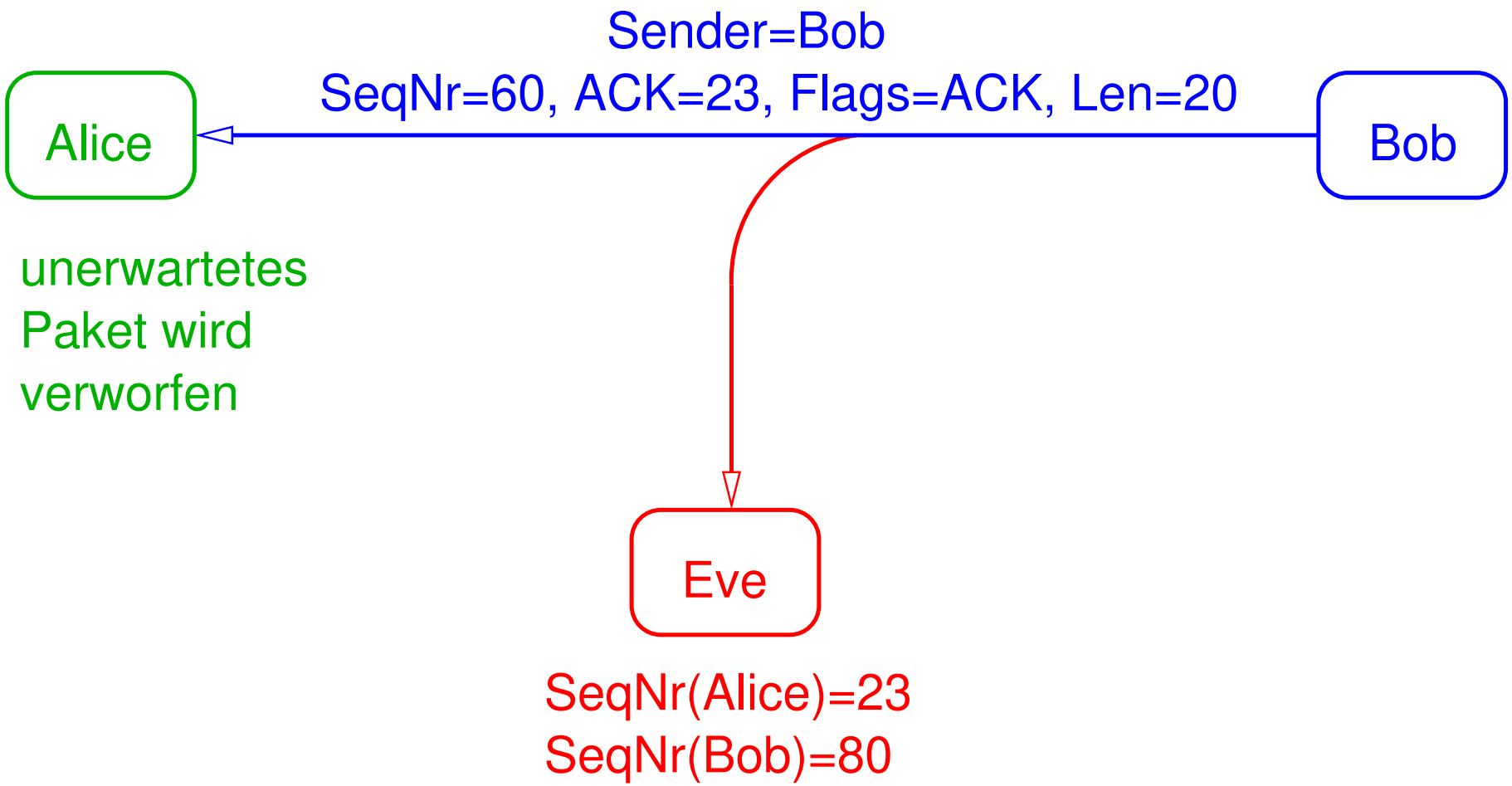
Ein Problem des TCP: Hijacking ...



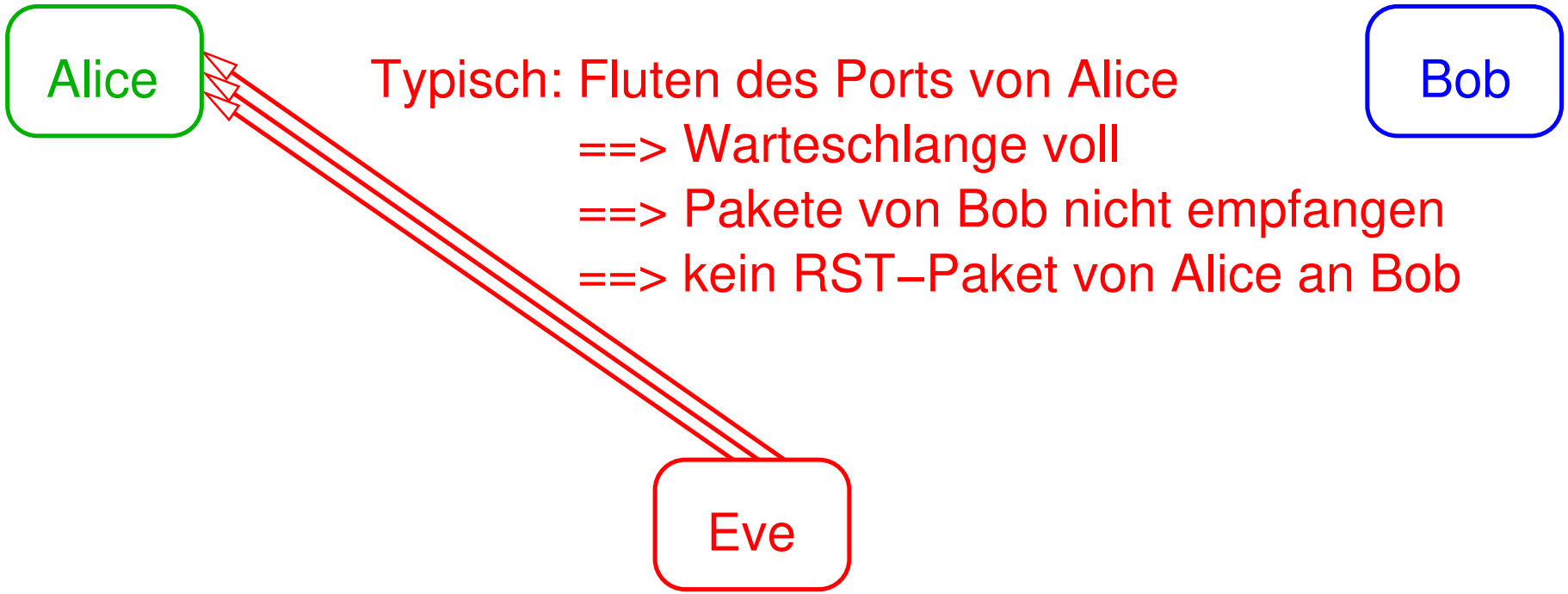
Ein Problem des TCP: Hijacking ...



Ein Problem des TCP: Hijacking ...



Ein Problem des TCP: Hijacking ...



Weitere problematische Protokolle

- UDP
  - **Problem**: fehlende Authentifizierung
  - „Fälschen“ von UDP-Paketen viel einfacher als bei TCP
  - Einige wichtige Dienste (DNS, NFS) basieren auf UDP
- ICMP
  - **Problem**: fehlende Authentifizierung
  - erlaubt Abbrechen, Behindern und Umleiten von Verbindungen
- ARP
  - **Problem**: keine Authentizierung
  - ARP ist zustandslos, akzeptiert Antwort von beliebigem Sender
  - Angreifer im lokalen Netz kann durch falsche ARP-Antwort Pakete zu sich umleiten (ARP Spoofing)

Weitere problematische Protokolle ...

- NFS (*Network File System*)
  - **Problem**: Authentifizierung nur über Hostname/User-ID
  - **Problem**: ungeschützte Übertragung von Dateiinhalten und -handles
- NIS (*Network Information System*)
  - Zentrale Paßwortdatei für Rechner eines Netzes
  - **Problem**: keine Authentifizierung des Servers
  - **Problem**: Zugriffskontrolle nur durch Domänen-Namen

Weitere problematische Protokolle ...

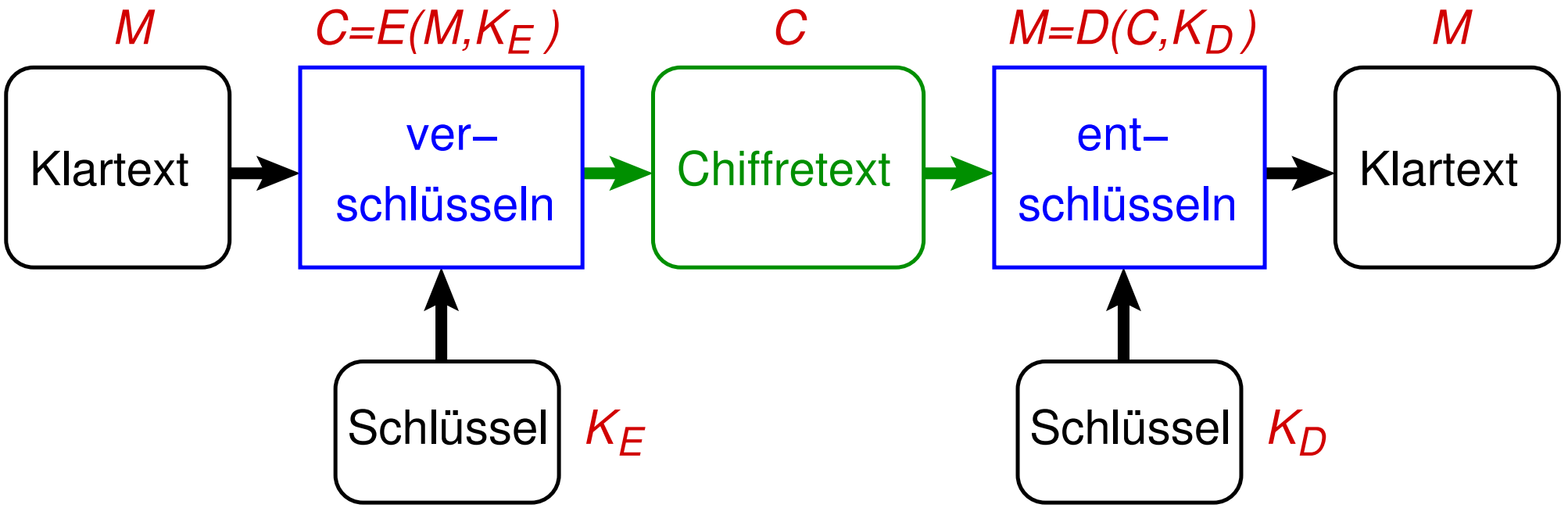
- `rsh`, `rcp`, `rlogin`, `telnet`, FTP (*File Transfer Protocol*)
  - **Problem**: Authentifizierung z.T. nur über Hostname/User-ID
  - **Problem**: ungeschützte Übertragung (incl. Paßworte!)
- HTTP (*HyperText Transport Protocol*)
  - **Problem**: keine Authentifizierung des Servers
  - **Problem**: ungeschützte Übertragung (auch Paßworte!)
- SMTP (*Simple Mail Transport Protocol*)
  - **Problem**: keine Authentifizierung des Absenders
  - **Problem**: Übertragung / Zwischenspeicherung im Klartext

★★

Fazit

- Die Standard-Internet-Protokolle (u.a. IP, TCP, DNS, ARP, NFS, HTTP, SMTP) erfüllen **keine** der in 10.1 genannten Sicherheitsanforderungen
- Hauptprobleme:
  - öffentliche Netze prinzipiell abhörbar
  - fehlende / unzureichende Authentifizierung
- Abhilfe:
  - sichere Protokolle in der Anwendungsschicht:
    - SSL/TLS (HTTPS, FTPS), S/MIME, PGP, SSH, ...
  - sicheres IP-Protokoll (IPsec, siehe Rechnernetze II)
- Basis: kryptographische Verfahren

Grundprinzip der Verschlüsselung:



- Symmetrische Verschlüsselungsverfahren
  - $K_E = K_D = K$ = gemeinsamer geheimer Schlüssel
- Asymmetrische Verschlüsselungsverfahren
  - K_E = öffentlicher, K_D = privater Schlüssel

Anforderungen an Verschlüsselungsverfahren:

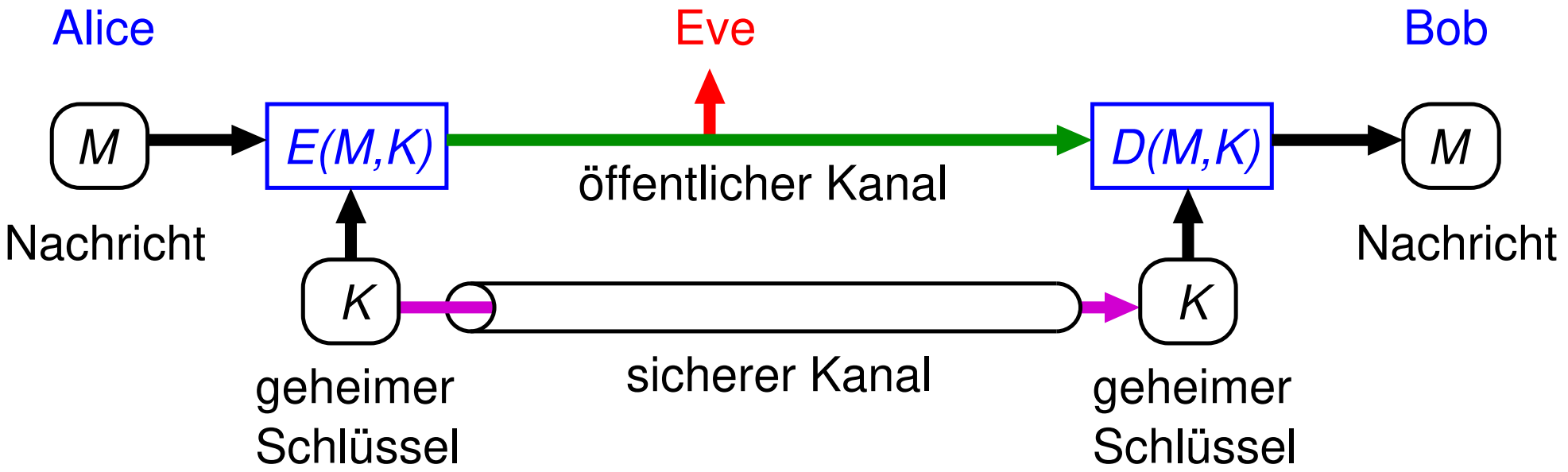
- Nur der Besitzer des geheimen bzw. privaten Schlüssels kann den Chiffretext entschlüsseln
- Sicherheit basiert nicht auf Geheimhaltung der Algorithmen

Mögliche Angriffe:

- Klartext-Angriff: Klartext + Chiffretext $\Rightarrow$ Schlüssel
- Im Idealfall: alle Schlüssel müssen durchprobiert werden
  - Schlüssel müssen lang genug sein!
- Bei asymmetrischen Verfahren auch effizientere Angriffe
  - Berechnung von K_D aus K_E ($\Rightarrow$ längere Schlüssel nötig)

★★★

10.3.1 Symmetrische Verschlüsselung



- Symmetrische Verschlüsselung ist sehr effizient realisierbar
- Schlüssel sind relativ kurz (heute typisch 128-256 Bit)
- Problem: Austausch des Schlüssels *K*

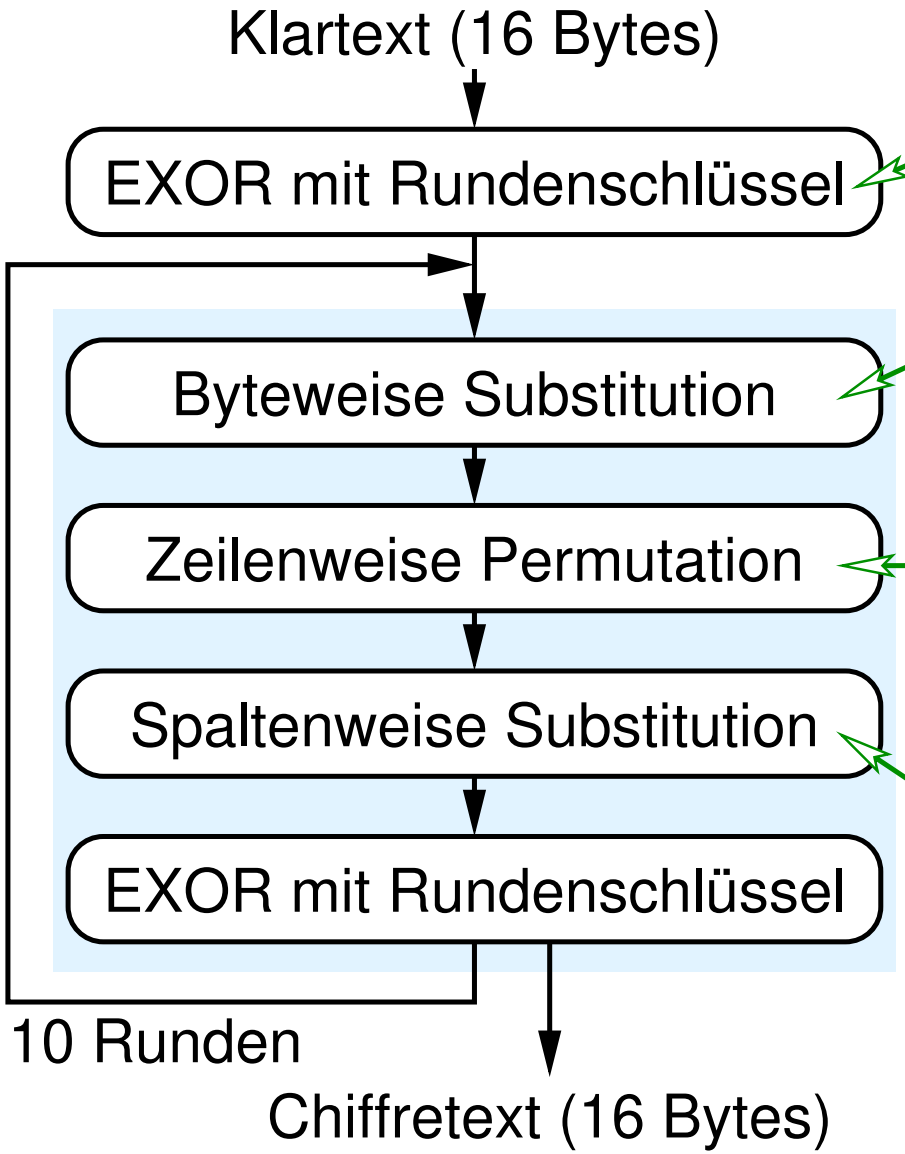
Beispiele symmetrischer Verschlüsselungsverfahren:

- **DES**: veraltet, Schlüssel nur 56 Bit lang
- **Triple-DES**: veraltet, dreifache Anwendung von DES
  - effektive Schlüssellänge: 112 Bit
- **AES**: Nachfolger von DES, 128-256 Bit Schlüssel
  - vom amerikanischen NIST standardisiert
  - in praktisch allen sicheren Protokollen verwendet / unterstützt
- **IDEA**: 128 Bit Schlüssel
  - freies Verfahren, benutzt z.B. in PGP

10.3.1 Symmetrische Verschlüsselung ...

- Zwei verschiedene Arten symmetrischer Verfahren:
  - **Blockchiffren** ver-/entschlüsseln Blöcke von Zeichen mit einer fest vorgegebenen Größe (z.B. 128 Bit bei AES)
    - zu kleine Blöcke müssen aufgefüllt werden (*Padding*)
    - für Nachrichten beliebiger Größe: zusätzliche Betriebsmodi für den Umgang mit einer Folge von Blöcken
  - **Stromchiffren** ver-/entschlüsseln in einem Zeichenstrom jedes Zeichen einzeln
    - typisch: EXOR-Verknüpfung mit Pseudozufallsfolge
- Grundoperationen symmetrischer Blockchiffren:
  - Substitution: ersetze Bitgruppen systematisch durch andere Bitgruppen
  - Permutation: vertausche Bitgruppen nach festgelegtem Schema

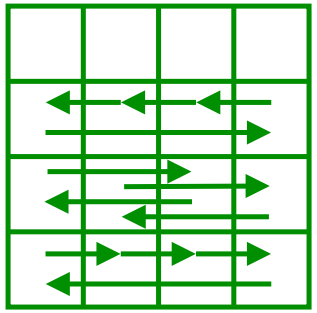
Grobstrutkur von AES (Verschlüsselung)



Rundenschlüssel wird aus AES–Schlüssel abgeleitet

0 –> 99, 1 –> 124, 2 –> 119, ...

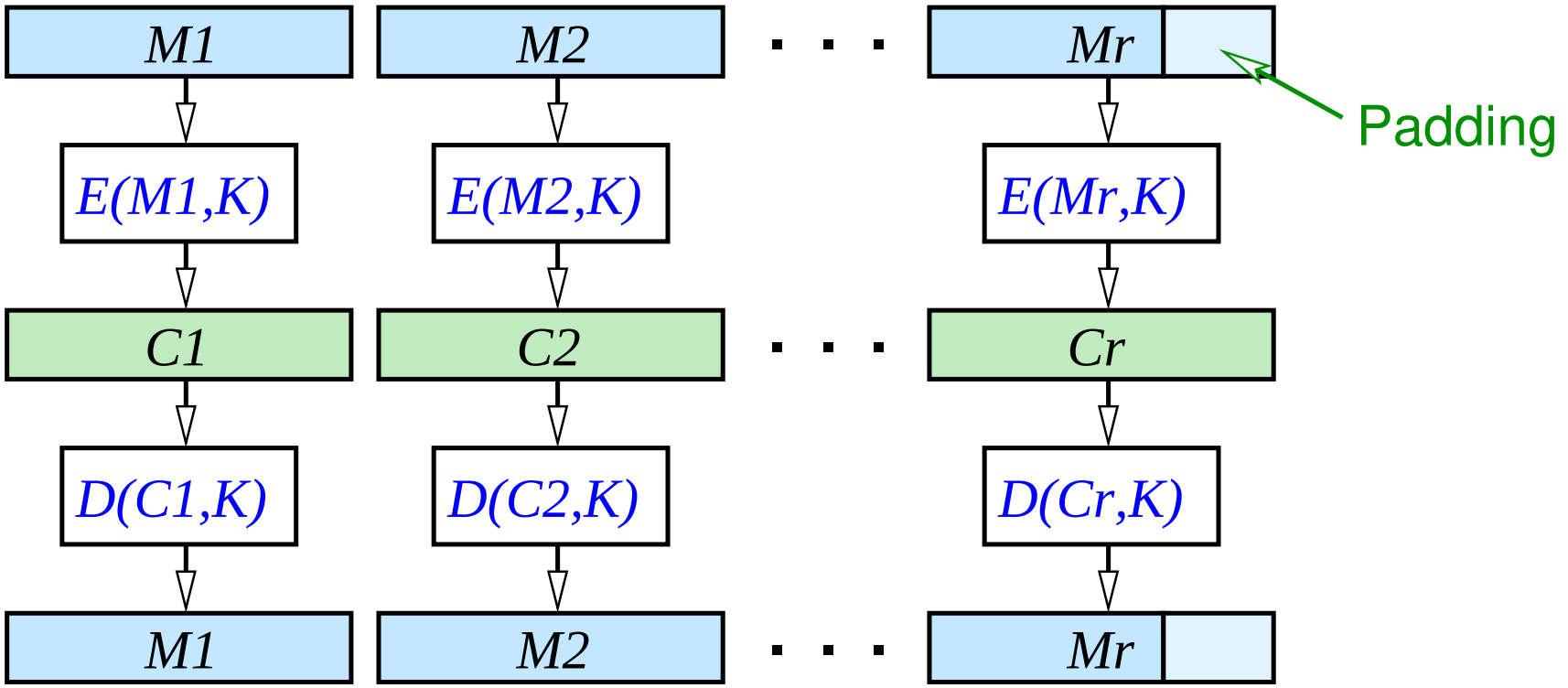
Block wird als 4 x 4 Matrix aufgefasst



Jedes Byte wird ersetzt durch eine Funktion der Spaltenwerte (Matrix–produkt), entfällt bei letzter Runde

Betriebsarten von Blockchiffren: *Electronic Code Book* (ECB)

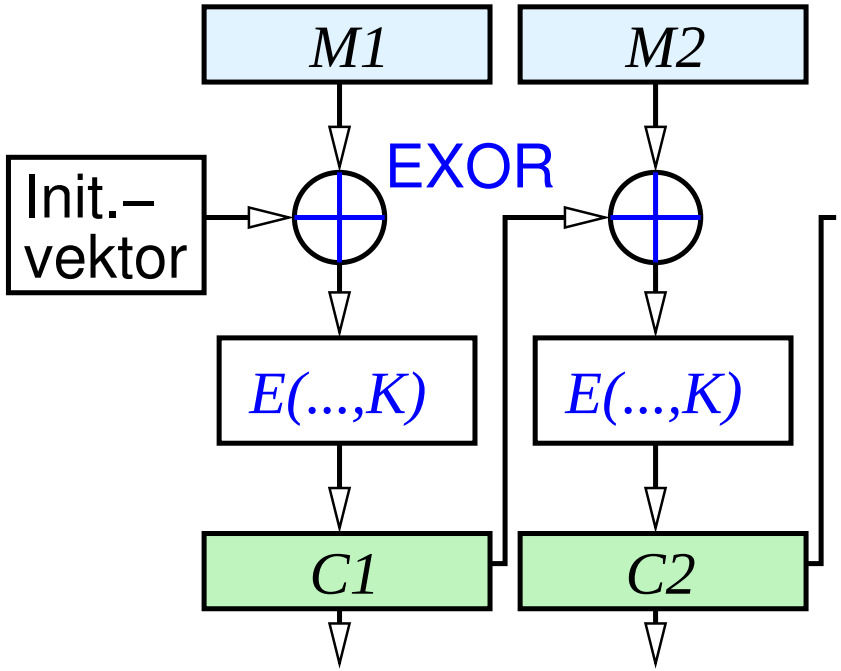
- Klartext wird in Blöcke (z.B. 128 Bit) aufgeteilt, ggf. mit Padding
- Blöcke werden unabhängig voneinander ver-/entschlüsselt



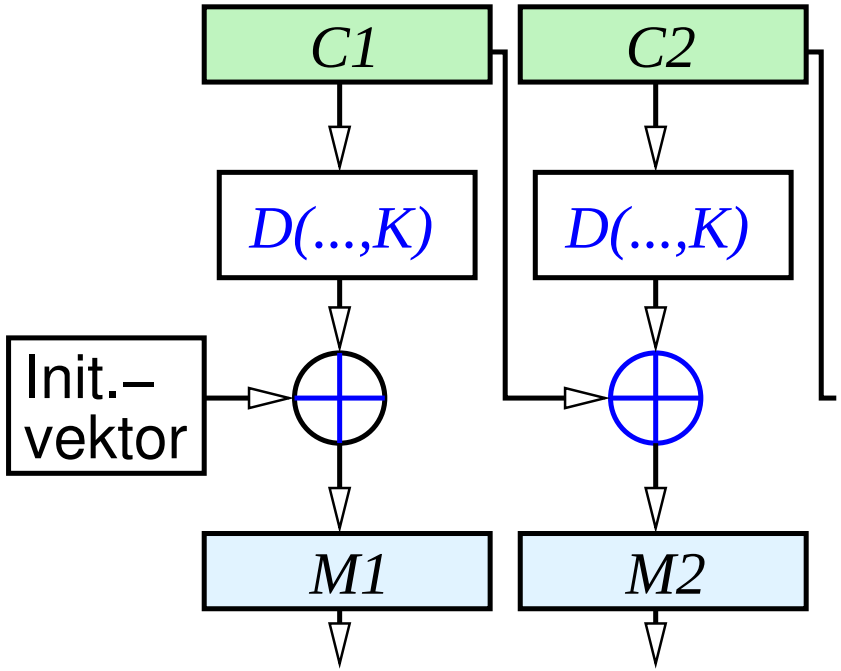
- Kein Schutz vor Löschung / Wiedereinspielung von Blöcken

Betriebsarten von Blockchiffren: *Cipher Block Chaining* (CBC)

Verschlüsselung



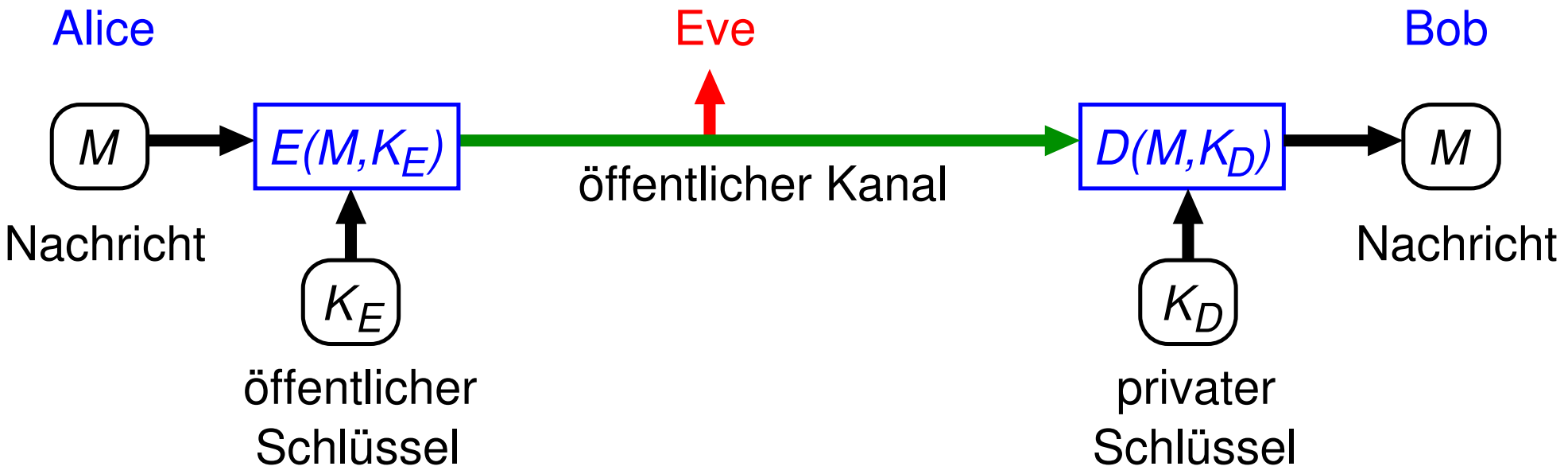
Entschlüsselung



- Gleiche Klartextblöcke ⇒ verschiedene Chiffretextblöcke
- Fehlerfortpflanzung: Vorteil und Nachteil

★★★

10.3.2 Asymmetrische Verschlüsselung



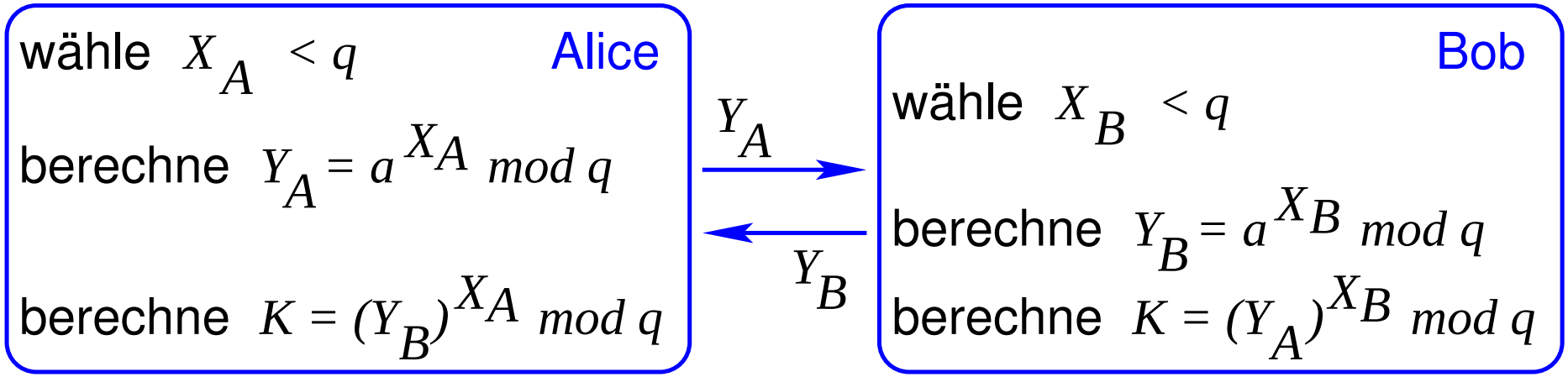
- Bob berechnet K_E aus K_D und veröffentlicht K_E
  - Problem: Authentizität von K_E
- Weniger effizient als symmetrische Verfahren
- Längere Schlüssel nötig (heute typisch 2048-4096 Bit)

Basis asymmetrischer Verfahren:

- Einwegfunktionen (*on-way functions*):
  - Berechnung von $y = f(x)$ einfach
  - Berechnung von $x = f^{-1}(y)$ praktisch unmöglich
- Beispiele:
  - diskreter Logarithmus: $f(x) = a^x$ mod p, p prim
    - Verwendung z.B. im Diffie-Hellman-Schlüsselaustausch
    - *Elliptic Curve Cryptography*: verwendet „Elliptische Kurven über endlichen Körpern“ als algebraische Struktur
      - erlaubt deutlich kürzere Schlüssel
  - Multiplikation großer Primzahlen vs. Faktorisierung
    - Verwendung z.B. in RSA
- Schwierigkeit der Berechnung der Umkehrfunktion nicht bewiesen

Diffie-Hellman-Schlüsselaustausch

- Frage: Wie können Alice und Bob über einen öffentlichen Kanal einen gemeinsamen geheimen Schlüssel K aushandeln?
- Gegeben sind öffentliche Elemente
  - q: Primzahl
  - a: primitive Wurzel von q (a^n mod q durchläuft $1 \ldots q-1$)



- Problem: keine Authentifizierung!

RSA (Rivest, Shamir, Adleman)

- Schlüsselgenerierung
  - wähle große Primzahlen p und q, berechne **Modul** $n = p \cdot q$
    - Euler'sche Zahl $\varphi(n) = (p-1) \cdot (q-1)$
  - wähle e mit $1 < e < n$ und $ggT(\varphi(n), e) = 1$
  - wähle d so, daß $e \cdot d \bmod \varphi(n) = 1$
  - öffentlicher Schlüssel $K_E = (e, n)$
  - privater Schlüssel $K_D = (d, n)$
- Verschlüsseln und Entschlüsseln
  - Klartextblock M als binärcodierte Zahl auffassen: $M < n$
  - Verschlüsseln: $C = E(M, K_E) = M^e \bmod n$
  - Entschlüsseln: $M = D(C, K_D) = C^d \bmod n$

RSA: Beispiel zum Nachrechnen

- Schlüsselerzeugung
  - $p = 3,\ q = 11$
  - $n = p \cdot q = 33,\ \varphi(n) = (p-1) \cdot (q-1) = 2 \cdot 10 = 20$
  - $e = 3$, damit $ggT(\varphi(n), e) = ggT(20, 3) = 1$
  - Wähle d so, daß $e \cdot d \equiv 1 \bmod \varphi(n),\ 3 \cdot d \equiv 1 \bmod 20,\ d = 7$
  - Öffentlicher Schlüssel $K_E = (3, 33)$, privater $K_D = (7, 33)$
- Verschlüsseln und Entschlüsseln
  - Klartextnachricht $M = 5$
  - $C = E(M, K_E) = 5^3 \bmod 33 = 125 \bmod 33 = 26$
  - $D(C, K_E) = 26^7 \bmod 33 = 8031810176 \bmod 33 = 5 = M$

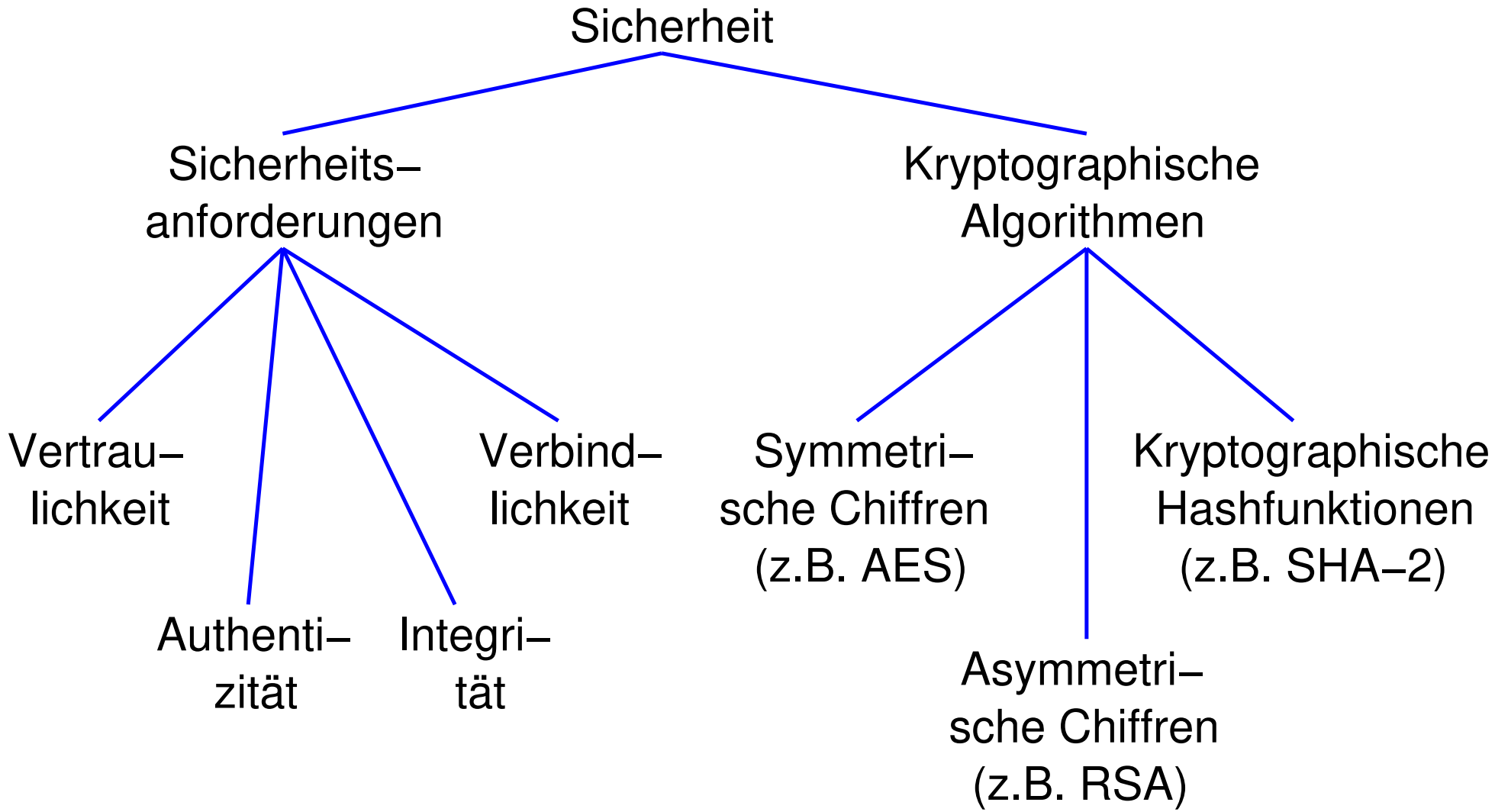
★★★

10.3.3 Kryptographische Hashfunktionen (*Message Digest*)

- Analog einer normalen Hashfunktion:
  - Nachricht wird auf einen Wert fester Größe abgebildet
- Zusätzliche Eigenschaft: **Kollisionsresistenz**
  - zu Nachricht *x* kann (in vernünftiger Zeit) keine andere Nachricht *y* mit gleichem Hashwert gefunden werden
- Einsatz zur Sicherung der Integrität
  - „kryptographische Prüfsumme“
- Beispiele
  - MD5 (*Message Digest, Version 5*): 128 Bit Hashwert, unsicher
  - SHA-1 (*Secure Hash Algorithm 1*): 160 Bit Hashwert, unsicher
  - SHA-2 / SHA-3: 224 - 512 Bit Hashwert

★★★

10.3.4 Zusammenfassung



10.3.4 Zusammenfassung ...

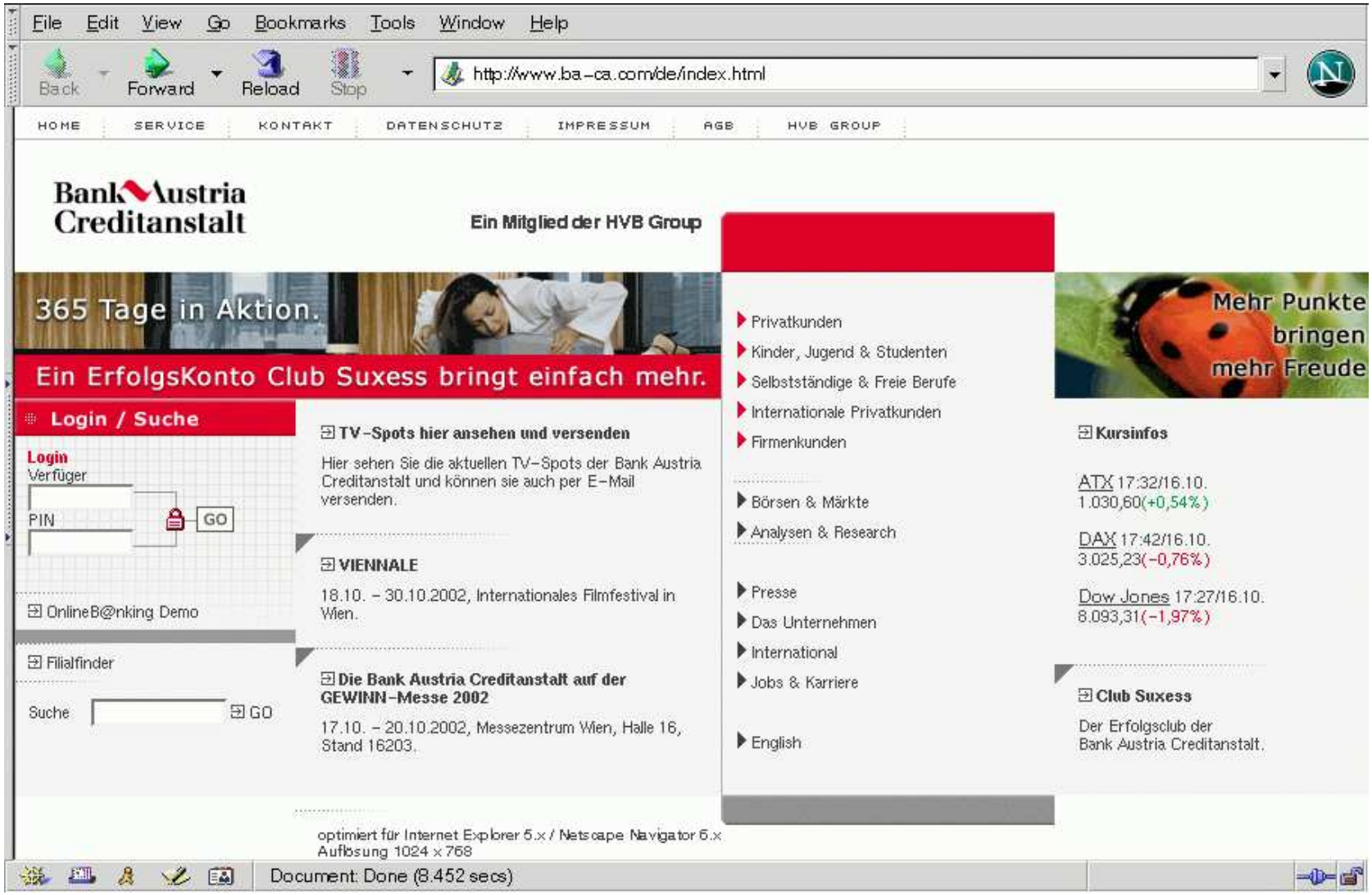
★★★

Was leistet die reine Verschlüsselung von Nachrichten?

- Vertraulichkeit: **ja**
- Integrität: **bedingt**
  - nur, wenn Klartext genügend Redundanz aufweist
  - $\Rightarrow$ Verwendung von *Message Digests*
- Nachrichtenauthentizität:
  - **nein** bei asymmetrischen Verfahren: K_E öffentlich!
  - **bedingt** bei symmetrischer Verschlüsselung
    - nur mit gesicherter Integrität und Schutz vor *Replay*
- Verbindlichkeit: **nein**
- Schutz vor Replay: **nein**
  - $\Rightarrow$ Transaktionszähler im Klartext + Integrität sichern

10.3.4 Zusammenfassung ...

Verschlüsselung muss auch richtig angewendet werden!



Die Seite ist von 2003 und wurde nach ca 3 Jahren(!) geändert

10.4 Sicherheitsmechanismen

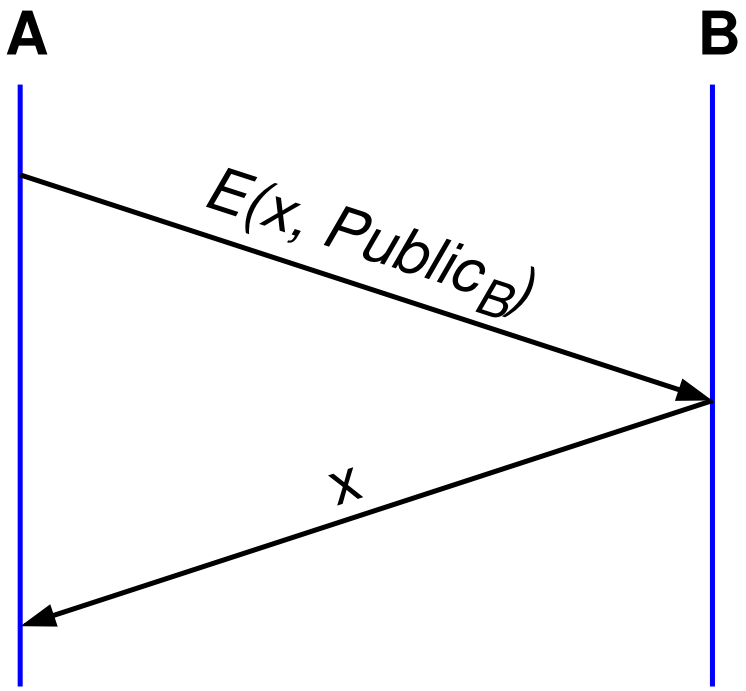
- Kryptographische Algorithmen sind nur Bausteine für die Netzwerksicherheit
- Zusätzlich benötigt: Mechanismen und Protokolle
- Einige Sicherheitsaufgaben:
  - Authentifizierung
    - von Kommunikationspartnern
      - „wer ist mein Gegenüber?“
    - von Nachrichten
      - „stammt die Nachricht wirklich vom Absender?“
  - Sicherung der Integrität von Nachrichten
  - Verbindlichkeit
  - Verteilung öffentlicher Schlüssel

Partner-Authentifizierung

- Kommunikationspartner authentifizieren sich gegenseitig
  - Beispiel: File-Server
    - Server authentifiziert den Client
      zur Prüfung der Schreib-/Leserechte
    - Client authentifiziert den Server
      zum Lesen/Schreiben sensibler Daten
- Manchmal auch nur einseitige Authentifizierung
  - Beispiel: WWW-Server
    - Client authentifiziert den Server
      zur Übertragung wichtiger / vertraulicher Daten

★★

Partner-Authentifizierung über asymmetrische Chiffre



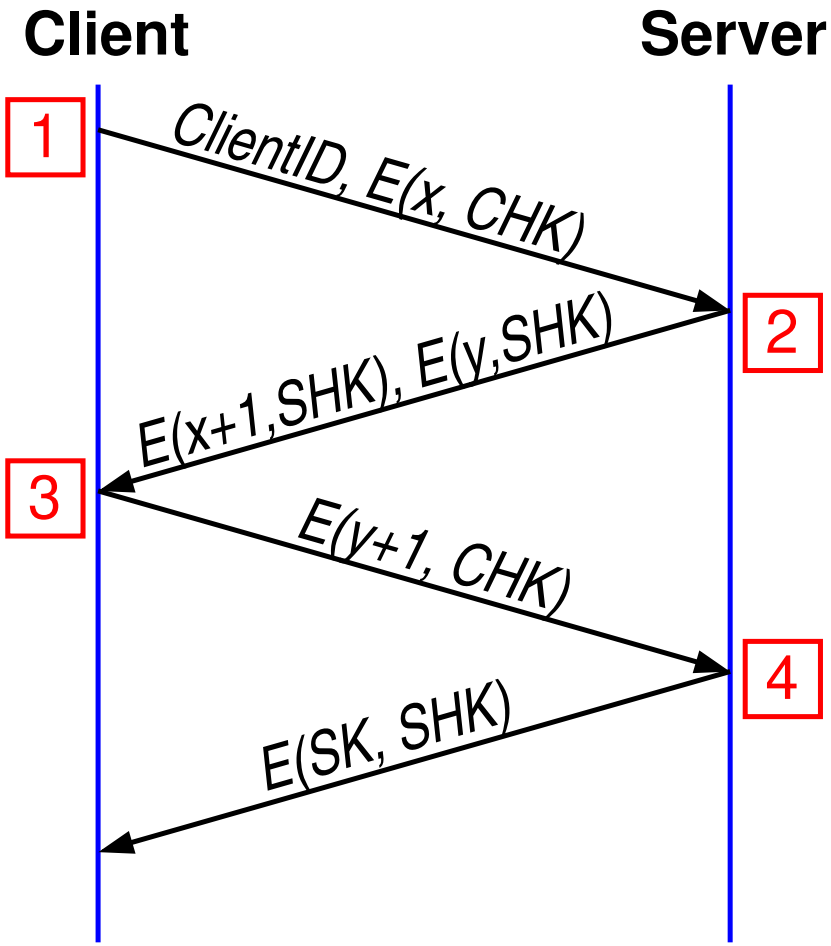
- Einseitige Authentifizierung von *B*
  - ggf. authentifiziert sich *A* ebenso (≈ 3-Wege-Handshake)
- $Public_B$ nicht zum Verschlüsseln verwenden!

★★

Partner-Authentifizierung mit Drei-Wege-Handshake

➥ Server kennt Schlüssel des Clients (z.B. Paßwort bei login)

1. Client sendet *ClientID* und verschlüsselte Zufallszahl x (CHK: *Client Handshake Key*)
2. Server sucht den zu *ClientID* gehörigen Schlüssel *SHK*, sendet *x+1* und Zufallszahl *y*
3. Server ist authentifiziert (*x+1*)
4. Client ist authentifiziert (*y+1*), Server sendet *Session Key SK* für weitere Kommunikation



★★

Sicherung der Nachrichtenintegrität und -authentizität

- Integrität: Kein Dritter soll Nachricht verfälschen können
  - setzt sinnvollerweise Nachrichten-Authentizität voraus
- Bei Übertragung mit symmetrischer Verschlüsselung:
  - kryptographischen Hashwert *H(M)* an Klartext *M* anfügen und verschlüsseln
  - bei Modifikation des Chiffretexts paßt die Nachricht nicht mehr zum Hashwert
  - kein Angreifer kann neuen Hashwert berechnen / verschlüsseln
  - Nachrichten-Authentizität (bis auf Replay) durch symmetrische Chiffre sichergestellt
    - Replay-Schutz: Transaktionszähler / Zeitstempel in *M*

★★

Sicherung der Nachrichtenintegrität und -authentizität ...

- Bei asymmetrischer Verschlüsselung:
  - Hash-Wert allein nützt nichts, da Nachrichten-Authentizität nicht sichergestellt ist
- Bei unverschlüsselter Übertragung (oft sind Daten nicht vertraulich, aber ihre Integrität wichtig):
  - Hash-Wert stellt Integrität nicht sicher, da jeder nach einer Modifikation der Nachricht den neuen Hash-Wert berechnen kann
- Lösungen:
  - kryptographischer Hashwert mit geheimem Schlüssel
  - digitale Signatur

★★★

Hashwert mit geheimem Schlüssel

- Einbeziehen eines (gemeinsamen) geheimen Schlüssels *K* in den Hashwert:
  - füge *H(M + K)* an Nachricht M an (*+* = Konkatenation)
- Sichert auch Nachrichten-Authentizität (bis auf Replay)
  - kein Dritter kann *H(M + K)* korrekt berechnen
  - Replay-Schutz: Transaktionszähler / Zeitstempel in *M*
- Sichert nicht Verbindlichkeit
  - Empfänger kann *H(M + K)* berechnen
- Beispiel: *HMAC-SHA-256*

★★★

Digitale Signatur mit asymmetrischer Chiffre

- Sender *A* sendet *M* und $E(M, Private_A)$ an Empfänger *B*
- *B* entschlüsselt mit $Public_A$ und prüft, ob Ergebnis gleich *M* ist
- Problem: asymmetrische Verschlüsselung ist langsam
- Daher: Kombination mit kryptographisher Hashfunktion
  - digitale Signatur von *A* auf *M* dann: $E(H(M), Private_A)$
- Digitale Signatur sichert Integrität, Nachrichten-Authentizität (bis auf Replay) und Verbindlichkeit
  - nur *A* besitzt $Private_A$
  - Replay-Schutz: Transaktionszähler in *M*

Verteilung öffentlicher Schlüssel

- Problem: Übertragung des öffentlichen Schlüssels $Public_A$ von A zu B
- Woher weiß B, daß $Public_A$ authentisch ist?
  - zur Authentifizierung bräuchte B den Schlüssel von A ...
- Lösungen:
  - Übertragung über andere Medien (persönlich, Post, ...)
  - Zertifikate (*Certificates*)

★★★

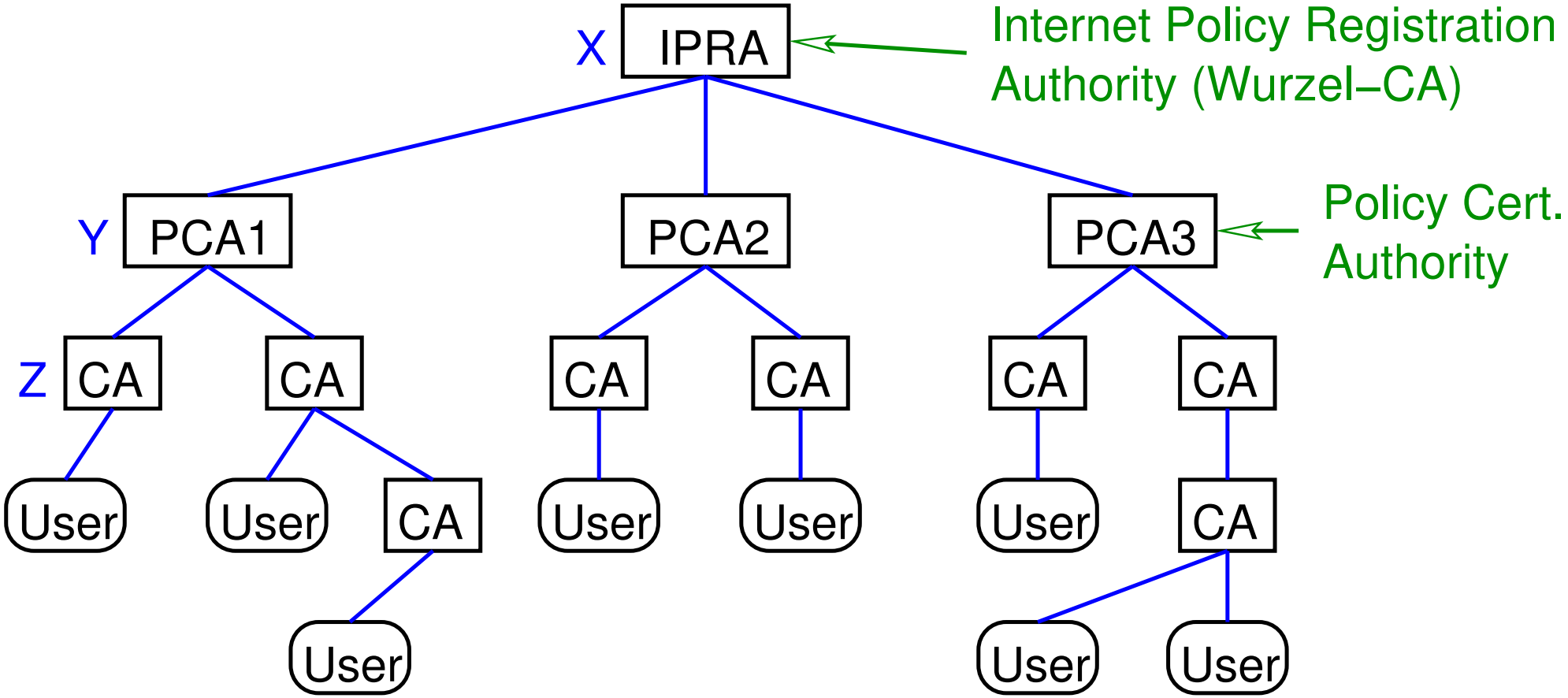
Zertifikat

> *Ich bestätige, daß der in diesem Dokument stehende öffentliche Schlüssel dem angegebenen Eigentümer gehört.*
>
> Gezeichnet: $\mathcal{CA}$

- Die Zertifizierungsstelle (CA, *Certification Authority*) beglaubigt die Zuordnung zwischen einem öffentlichem Schlüssel und seinem Besitzer
  - durch digitale Signatur
- Nur noch der öffentliche Schlüssel der CA muß separat veröffentlicht werden

Zertifizierungshierarchie (z.B. bei HTTPS)

- Vertrauenskette: *X* zertifiziert, daß Schlüssel von *Y* authentisch ist, *Y* zertifiziert Schlüssel von *Z*, ...



X.509 Zertifikate

- X.509: wichtiger Standard für Zertifikate
- Komponenten des Zertifikats:
  - Name der Person/Institution oder eines Rechners
    - ggf. auch Email-Adresse oder Domain-Name
  - öffentlicher Schlüssel der Person/Institution bzw. des Rechners
  - Name der CA
  - Ablaufdatum des Zertifikats (optional)
  - digitale Signatur der CA
    - über alle obigen Felder

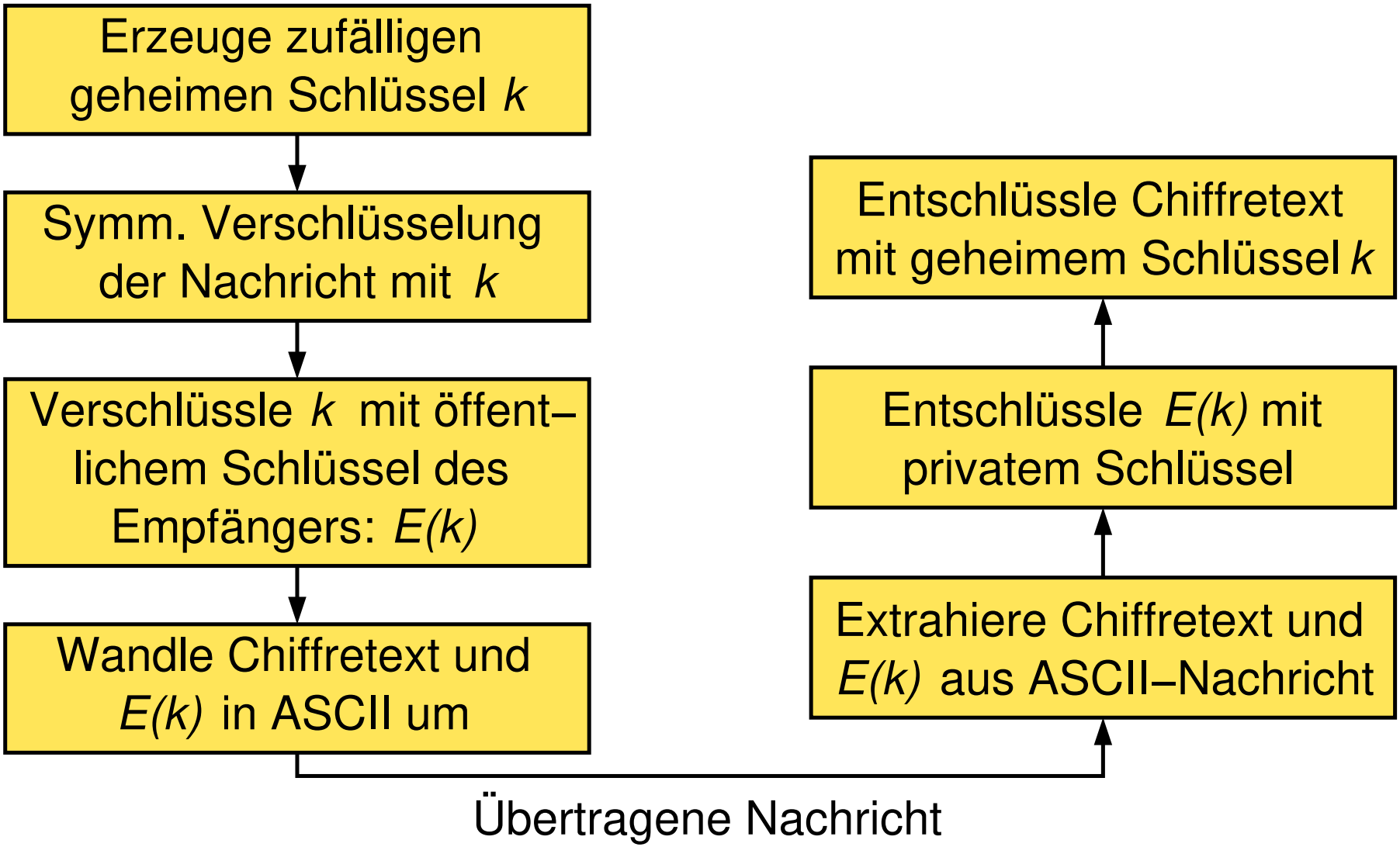
Invalidierung von Zertifikaten

- Zertifikate können beliebig kopiert und verbreitet werden
- Authentizität wird durch ein Zertifikat nur in Verbindung mit dem Besitz des privaten Schlüssels belegt
- Falls privater Schlüssel ausgespäht wurde:
  - Widerruf des Zertifikats nötig
- Einfache Möglichkeit:
  - *Certificate Revocation List* (CRL)
    Liste widerrufener Zertifikate, signiert von CA
  - Ablaufdatum begrenzt Länge der Liste

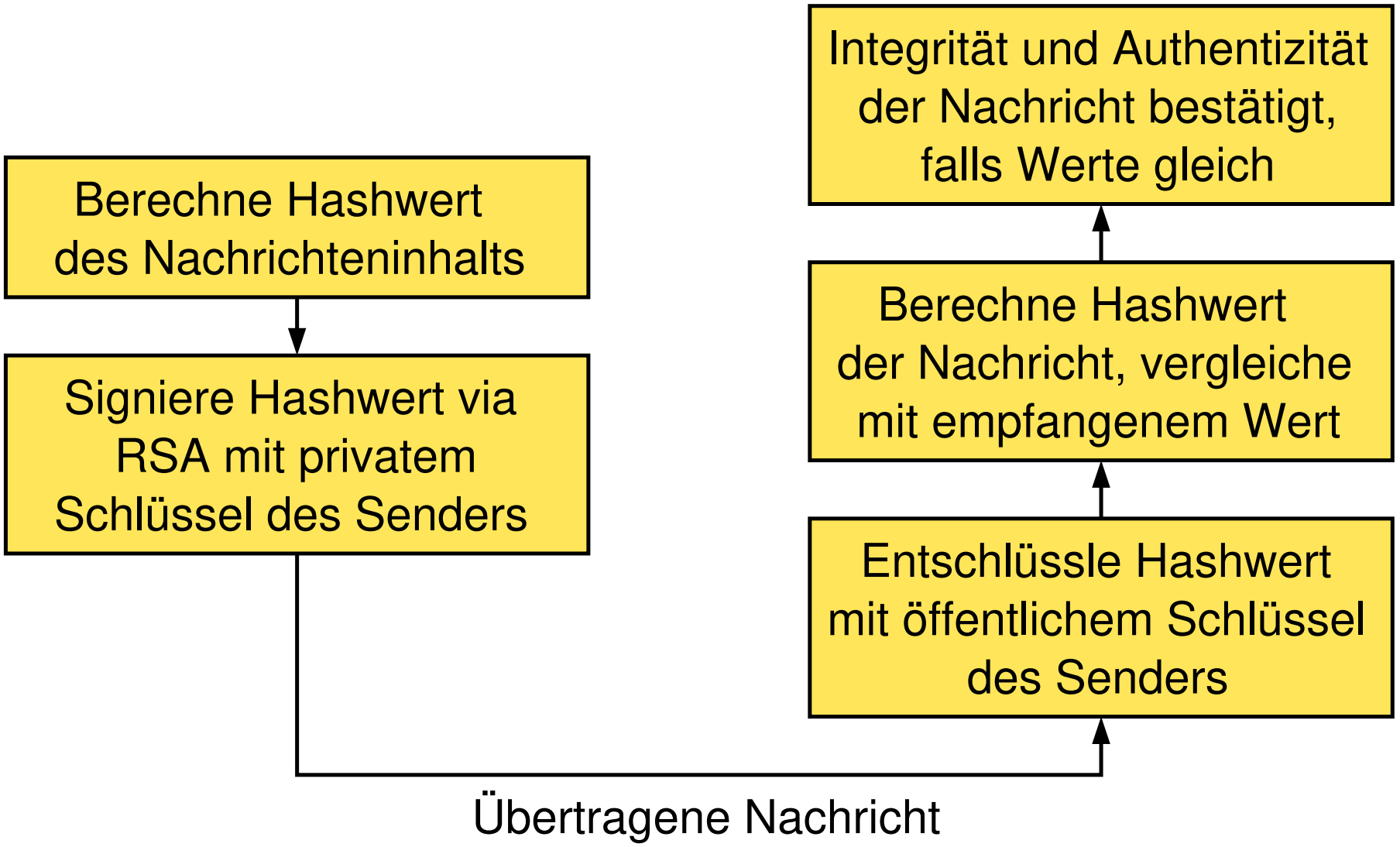
PGP (Pretty Good Privacy)

- Realisiert Vertraulichkeit, Integrität, Authentifizierung und Verbindlichkeit für Email
- Mechanismen: Verschlüsselung und digitale Signatur
  - einzeln oder kombiniert verwendbar
- Keine Zertifizierungsstellen bzw. –hierarchie
  - PGP-Benutzer zertifizieren die öffentlichen Schlüssel gegenseitig
    - mehrere Zertifikate möglich (höheres Vertrauen)
  - Vertrauensstufe des Schlüssels wird bei Email-Empfang angezeigt

PGP: Verschlüsselte Übertragung von Emails



PGP: Signierung von Emails

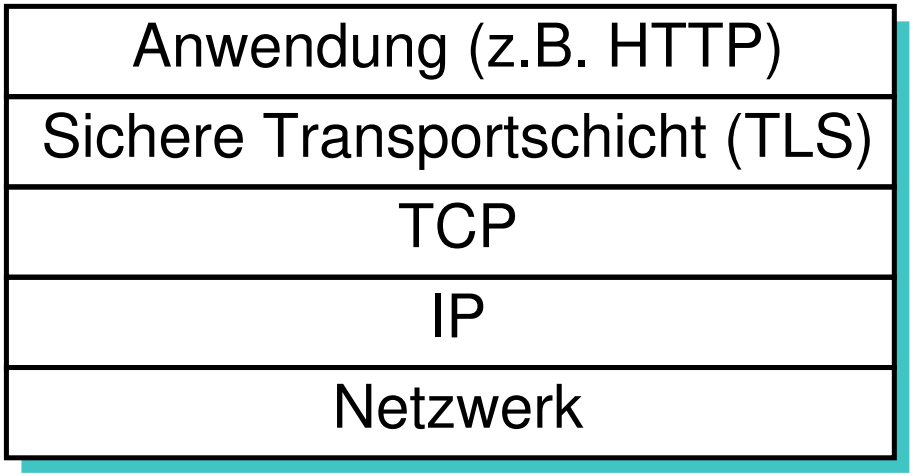


★★

TLS (*Transport Layer Security*)

- Motivation: Sicherheit im WWW, z.B. für Kreditkartenzahlung
  - Vertraulichkeit (der Kreditkarteninformation)
  - Authentizität (des WWW-Servers)
  - Integrität (der Bestelldaten)
  - (Verbindlichkeit wird von TLS nicht gewährleistet)
- TLS ist ein Internet-Standard der IETF
  - Basis: ältere Realisierung SSL (*Secure Socket Layer*)
- TLS ist die Grundlage vieler sicherer Protokolle im WWW:
  - z.B. HTTPS, FTPS, ...
  - realisiert durch eine zusätzliche Schicht

TLS: sichere Transportschicht



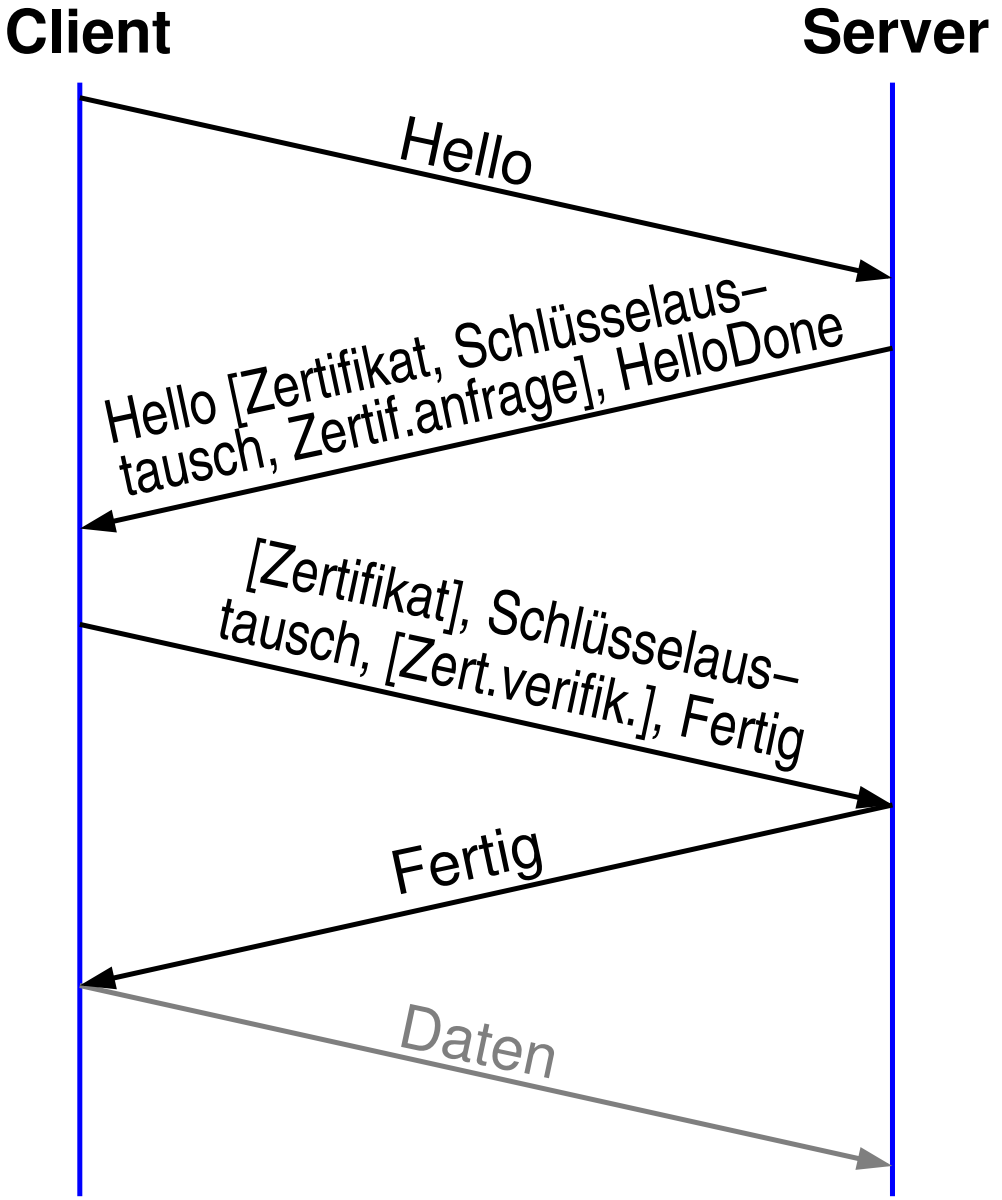
- Vorteil: unveränderte Anwendungsprotokolle
- Spezielle Ports, z.B. 443 für HTTPS
  - TLS gibt Daten von TCP an HTTP-Protokoll weiter (bzw. umgekehrt)

Wichtige TLS Teil-Protokolle:

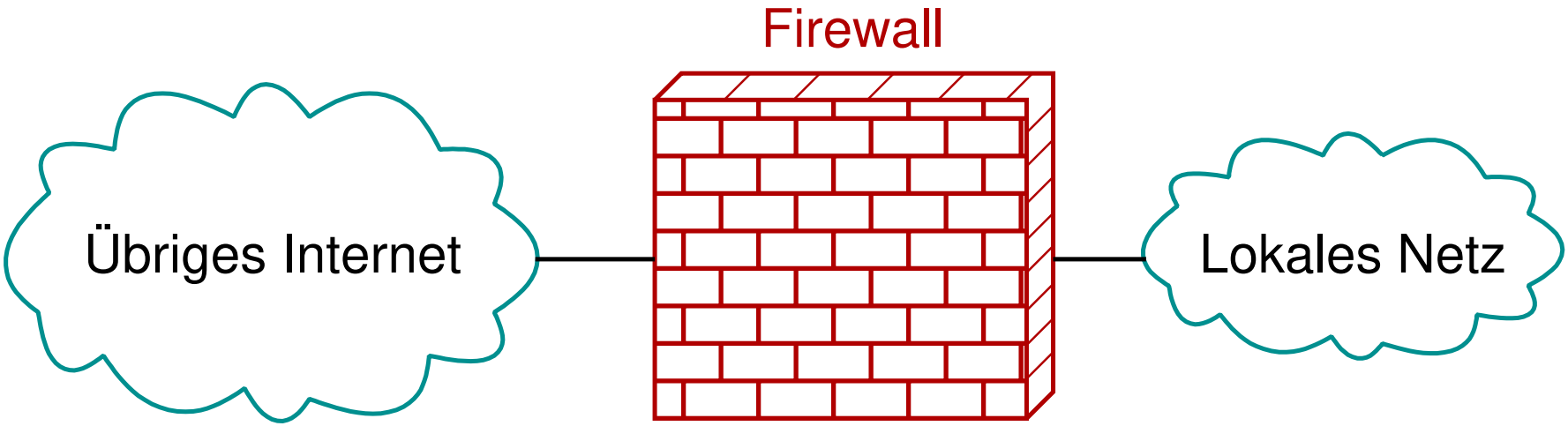
- Handshake-Protokoll
  - beim Verbindungsaufbau
  - Aushandeln der kryptographischen Parameter:
    - Verfahren, Schlüssellänge, Sitzungsschlüssel, Zertifikate, Kompression
- Record-Protokoll
  - für die eigentlichen Daten
  - Fragmentierung, Kompression, Message Digests, Verschlüsselung, Transport (TCP)

TLS Handshake-Protokoll

- Bis zu 12 Nachrichten
- Aushandeln der kryptographischen Parameter notwendigerweise unverschlüsselt
- Man-in-the-Middle kann schwache Verschlüsselung aushandeln
- Anwendungen müssen auf Mindestanforderungen bestehen, ggf. Verbindungsabbruch



10.6 Firewalls



- **Firewall**: Router mit Filterfunktion
  - kann bestimmte Pakete ausfiltern (verwerfen) und somit Zugriff auf bestimmte Hosts / Dienste unterbinden
  - wäre i.W. überflüssig, wenn alle Dienste sicher wären!
- Zwei Typen:
  - Filter-basierte Firewalls
  - Proxy-basierte Firewalls

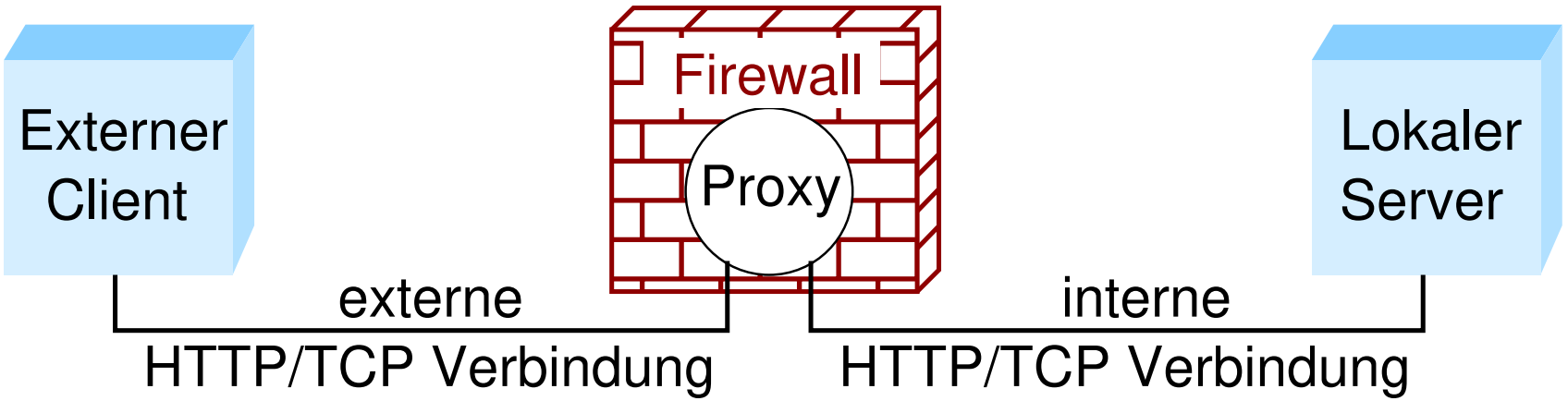
★★

Filter-basierte Firewalls

- Filtern nur aufgrund von Quell- und Ziel-IP-Adressen, Quell- und Ziel-Ports, übertragenem Protokoll, sowie ggf. der TCP-Flags
- Filterregeln z.B.
  - `deny tcp 192.12.0.0/16 host 128.7.6.5 eq 80`
  - `permit tcp any host 128.7.6.5 eq 25`
- Frage: alles erlaubt, was nicht verboten ist, oder umgekehrt?
- Statische oder dynamische Regeln
  - z.B. FTP: neue Ports für jede übertragene Datei
- „Level-4-Switch“: Firewall kennt Transport-Protokolle

Proxy-basierte Firewalls

- Proxy: Mittler zwischen Client und Server
  - für Client: Proxy ist Server, für Server: Proxy ist Client



- Proxy arbeitet auf Anwendungsschicht
  - kann auf der Basis des Nachrichteninhalts filtern
  - z.B. HTTP-Anfragen nach bestimmten Seiten nur von speziellen Hosts akzeptieren

Grenzen von Firewalls

- Kein Schutz interner Benutzer untereinander
- Nur begrenzter Schutz gegen mobilen Code (z.B. Email Wurm)
- Schutz von Teilen eines Netzes schwierig
- Angreifer kann sich in privilegiertes Netz „einschleichen“
  - z.B. bei drahtlosen Netzen
- Filterung über Sender-IP-Adresse/Port ist unsicher

Vorteil von Firewalls

- Umsetzung einer Sicherheitsstrategie an zentraler Stelle

10.7 Zusammenfassung

- Sicherheitsanforderungen:
  - Vertraulichkeit, Integrität, Authentizität,Verbindlichkeit
  - Verfügbarkeit, Anonymität, ...
- IP, TCP, UDP erfüllen keine Sicherheitsanforderungen
  - Vertraulichkeit, Integrität, Authentizität
- Kryptographische Verfahren:
  - symmetrische und asymmetrische Chiffren
  - Kryptographische Hashes (Message Digest)
- Sicherheitsmechanismen
  - Authentifizierung (Kommunikationspartner, Nachrichten)
  - Integrität: Hashwerte mit Schlüssel, digitale Signatur
  - Verteilung öffentlicher Schlüssel: Zertifikate

10.7 Zusammenfassung ...

- Sichere Protokolle, z.B. PGP, TLS (HTTPS), IPsec
- Firewalls

Fortsetzung:

- Rechnernetze-Praktikum (WiSe)
  - Aufbau von Netzen, Routing und Switching
  - PO 2012: B.Sc., Vertiefungspraktikum, 5 LP
  - FPO 2021: B.Sc., Grundlagenpraktikum, 6 LP
- Rechnernetze II (SoSe)
  - weitere Netzwerktechnologien (Fast Ethernet, WLAN, ...)
  - Vertiefung (Routing, QoS, IPsec, ...)
  - PO 2012: B.Sc., Wahlmodul, 5 LP
  - FPO 2021: M.Sc., Kernmodul, 6 LP