Vorlesung Sicherheit

Dennis Hofheinz

ITI, KIT

17.07.2014

Überblick

Überblick

Motivation

- Bislang idealisierte Bausteine/Algorithmen betrachtet
- Insbesondere: ideale Implementierung unterstellt
- Frage: was kann bei *Implementierung* schiefgehen?
- Ziel nachfolgend: häufige Fehlerquellen erklären

Erinnerung

- **Ziel:** häufige Software-Fehlerquellen erklären
- Die fünf häufigsten Typen von Sicherheitsproblemen:
  - (Buffer) Overflows (schon erklärt)
  - Denial of Service (schon erklärt)
  - Code Execution
  - Cross-Site Scripting
  - SQL Injection
- **Bonus:** schlechte Zufallsgeneratoren, schlechte APIs

Überblick

Code Execution

- **Ziel:** lasse eigenen Code beim Opfer ausführen
- **Beispiel:** Buffer Overflow auf Stack (siehe oben)
- **Warum ist das schlimm?**
  - (Lese-/Schreib-)Zugriff auf anderes System erlangen
  - Anderes System kontrollieren ($\rightarrow$ Botnetze)
  - Andere impersonieren
- Überlappungen mit anderen Softwarefehlern
- Deshalb hier nicht weiter behandelt

Überblick

Motivation

- **Ziel:** (JavaScript-)Code auf Rechner des Opfers ausführen
- **Szenario:** Opfer surft auf Websites, denen es vertraut
- **Etwa:** Opfer surft in Diskussionsform seriöser Website
- **Angriff:**
  - Angreifer postet Nachricht, die ausführbaren JS-Code enthält, als Forumsbeitrag
  - Opfer ruft Beitrag ab, liest JS-Code, Browser des Opfers führt JS-Code aus

Motivation

- **Missstand:** Forenseite lässt Angreifer ausführbaren/ausgeführten JS-Code als Kommentar posten
- **Warum ist das schlimm?**
  - JS-Code läuft in vertrauenswürdigem Kontext
  - ... hat Zugriff auf Cookies/Funktionen von grundsätzlich vertrauenswürdiger Foren-Website
- Beispiel veranschaulicht Probleme

Beispiel

- **Szenario:** Facebook-Nutzer besucht Pinnwand des Angreifers
  - Angreifer hat auf seiner Pinnwand JS-Code platziert, der Facebook-Session-Cookie von Opfer an Angreifer sendet
  - Effekt: Angreifer sieht mit Facebook-Session-Cookie für Facebook wie Opfer aus und kann Konto von Opfer kontrollieren
  - Problem wurde 2010 behoben
- Andere Möglichkeit: Facebook-Wurm, der
  1. sich das Opfer mit dem Angreifer befreunden lässt
  2. und sich anschließend selbst an Freunde des Opfers sendet (Kommentarfunktion)

Überblick

SQL

- **Was ist SQL?** (Structured Query Language)
  - Sprache, um Abfragen von Datenbanken zu formulieren
  - Beispiel:

    ```
    SELECT * FROM cd WHERE interpret = "Fall Out Boy";
    ```

    wählt alle CDs von Fall Out Boy aus
  - Nicht nur Queries möglich, sondern auch Anweisungen:

    ```
    DROP TABLE cd;
    ```

    löscht Datenbank aller CDs (aufpassen hiermit!)

Beispiel

- **Beispiel:** Nutzer wird nach Interpret gefragt
  - Frage an Nutzer: `Nach welchem Album suchen?`
  - Was intern damit passieren könnte (Nutzereingabe über Webinterface, PHP auf Webserver redet mit SQL-Server):

    ```
    $alb = $_GET['album'];
    sql_query($db,'SELECT * FROM cd WHERE album = "$alb";');
    ```

  - Erste Zeile setzt $alb auf HTTP-Parameter „album“
  - Zweite Zeile kommuniziert mit SQL-Server, soll nach allen Alben mit Namen $alb suchen

Beispiel

- **Beispiel:**
  - PHP-Skript, um nach von Benutzer gewähltem Album zu suchen:

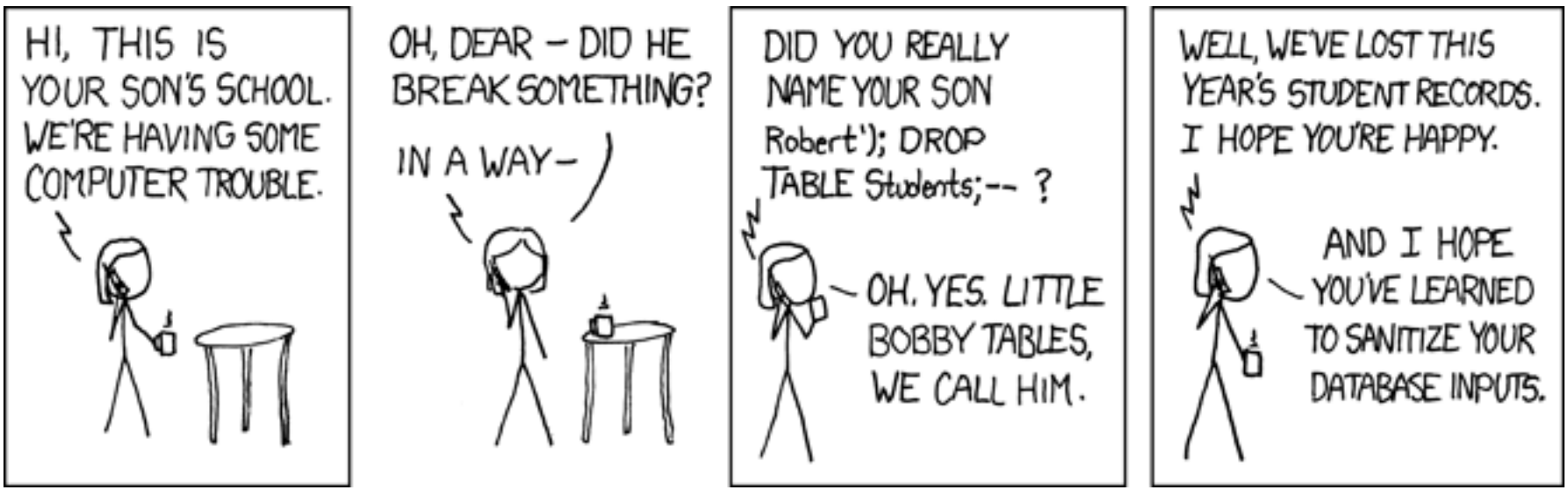
    ```
    $alb = $_GET['album'];
    sql_query($db,"SELECT * FROM cd WHERE album = '$alb';");
    ```

  - Erwartete Eingabe (Beispiel): `Infinity on High`
  - Tatsächliche Eingabe: `'; DROP TABLE cd; #`
  - Konsequenz: PHP-Code setzt *zwei* SQL-Anfragen ab
    1. `SELECT * FROM cd WHERE album = ''`
    2. `DROP TABLE cd`
  - Zweite Anfrage löscht Datenbank aller CDs

SQL Injection

- **Problem (wie so oft):** Nutzereingaben werden intern weiterverarbeitet, ohne geeignet zu „escapen“
- Kann dazu führen, dass auf Server beliebiger SQL-Code ausgeführt wird
- Mögliche Effekte:
  - Löschen von Datenbanken
  - Datenzugriff auf andere Datenbank (z.B. DB aller Passwörter)
- **Gegenmaßnahme:** jede Nutzereingabe escapen/kontrollieren

SQL Injection



(xkcd.com)

Überblick

Schlechter Zufall

- Kryptographie braucht guten (d.h. unabhängig gleichverteilten) Zufall
- Besonders kritisch bei Schlüsselgenerierung (z.B. für PKE)
  - Schlüssel einmal generiert, sehr oft benutzt
  - Schlechter Zufall bei Verschlüsselung $\Rightarrow$ Chiffrat unsicher
  - Schlechter Zufall bei Schlüsselgenerierung $\Rightarrow$ alle Chiffrate unsicher
- Viele mögliche Gründe für schlechten Zufall: fehlende Entropie, physikalischer Angriff, Implementierungsfehler

Was kann passieren?

- Erinnerung ElGamal-/DSA-Signaturen:

$$pk = (\mathbb{G}, g, g^x) \qquad sk = (\mathbb{G}, g, x)$$
$$\mathrm{Sig}(sk, M) = (a, b) \quad \text{mit} \quad a := g^e \quad \text{für zufälliges } e$$
$$\text{und } b \text{ als Lösung von} \quad a \cdot x + e \cdot b = M \bmod |\mathbb{G}|$$

- Zweimal derselbe Zufall (d.h. dasselbe e) für Signaturen (a, b) und (a, b') verschiedener Nachrichten M, M' verwendet:

$$a \cdot x + e \cdot b = M \bmod |\mathbb{G}|$$
$$a \cdot x + e \cdot b' = M' \bmod |\mathbb{G}|$$

- Lineare Algebra liefert zunächst e und dann x (also sk!)
- **Real:** Sony hat für PS3 so Code signiert ($\rightarrow$ Linux auf PS3)

Was kann passieren?

- Schlechter Zufall bei Schlüsselgenerierung verheerend
- Im Extremfall nur, sagen wir, 2^{16} mögliche Schlüsselpaare
  (Brute-Force-Suche über alle Schlüssel möglich)
- Leider realistisch: Debian-OpenSSL-Problem
  - September 2006: Debian-Maintainer patcht OpenSSL-Paket, damit Valgrind-Analyse-Tool keine Zugriffe auf undefinierten Speicher meldet
  - Problem: OpenSSL greift gezielt auf undefinierten Speicher zu, um Zufall für Schlüsselgenerierung zu erzeugen
  - Effekt: Debian-OpenSSL-Schlüsselgenerierung nutzt (für anfällige Versionen) nur Prozess-ID (16 Bit) als Zufall
  - Im Mai 2008 bemerkt und korrigiert

Schlechter Zufall (Beispiel)

http://dilbert.com/strips/comic/2001-10-25/

Schlechte APIs

- API (Application Programming Interface): Programmierschnittstelle
- Viele APIs kompliziert, unübersichtlich, ändern sich
- Ähnlich (strenggenommen keine API): Kommandozeilenoptionen von komplexen Programmen
- Typisches Vorgehen bei Versuch, unbekannte API zu nutzen
  1. Rumprobieren
  2. Versuchen, Dokumentation zu lesen
  3. Vorwärtsblättern zu den Beispielen
  4. Versuch, Beispiel auf eigene Bedürfnisse anzupassen
  5. Sofort aufhören, sobald erwünschter Effekt eintritt
- **Sehr problematisch** bei kryptographischen APIs

Schlechte APIs

- Erinnerung RSA:

$$pk = (N, e) \qquad sk = (N, d)$$
$$C = M^e \bmod N$$
$$\text{(oder, besser:)} \quad C = \mathrm{pad}(M)^e \bmod N$$

- **Beispiel:** `https://github.com/saltstack/salt/commit/5dd304276ba5745ec21fc1e6686a0b28da29e6fc`

Überblick

Zusammenfassung

- Häufig sicherheitsrelevante Probleme bei *Implementierung*
- Wiederkehrendes Problem: Eingabe (z.B. über Webinterface) wird nicht geeignet geparst/überprüft/escaped
- Ermöglicht Angreifer oft sogar, Code einzuschleusen
- Kryptographiespezifisch: schlechter Zufall, schlechte APIs
- **Vermeidung der Probleme:** Eingaben immer konservativ parsen, Standardmethoden/-APIs/-pakete benutzen

Überblick

Allgemeine Hinweise

- Verschlüsselung benutzen (GPG, (Truecrypt))
- Standardverfahren benutzen (RSA-/ECC-Varianten, AES, Keccak, TLS)
  - Bei TLS in aktueller Version, mit aktuellen Patches
- **Nicht:** schnell selbst in obskurem Artikel vorgeschlagenes chaosbasiertes Verschlüsselungsverfahren implementieren

Bei Interesse...

- Veranstaltungen im kommenden Semester (WS14/15):
  - Beweisbare Sicherheit in der Kryptographie
  - Digitale Signaturen
  - Asymmetrische Verschlüsselungsverfahren
  - Signale und Codes
  - Praktikum Kryptographie
- Voraussichtlich im übernächsten Semester (SS15):
  - Symmetrische Verschlüsselungsverfahren
  - Ausgewählte Kapitel der Kryptographie (eventuell)
  - Kryptographische Wahlverfahren (eventuell)
  - Praktikum Kryptographie

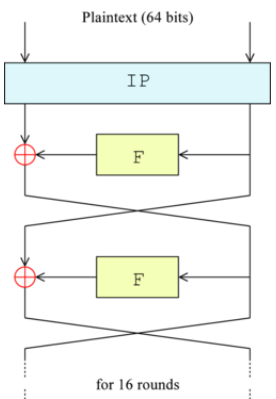
Überblick

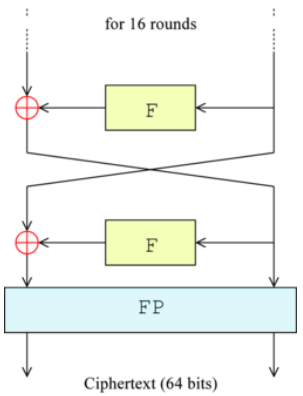
Symmetrische Verschlüsselung

- Verschlüsselung: $C = \mathrm{Enc}(K, M)$
- Entschlüsselung: $\mathrm{Dec}(K, C) = M$
- One-Time-Pad $C = M \oplus K$ (veränderbar, unhandlich)
- OTP unhandlich: **Stromchiffre** „simuliert“ OTP
  - Setze $C = M \oplus \mathrm{G}(K)$ für Pseudozufallsgenerator G
  - $\mathrm{G}(K) := (b^{(1)}, \ldots, b^{(n)})$ mit $(b^{(i+1)}, K^{(i+1)}) := \mathrm{SC}(K^{(i)})$
- Beispiel: LFSRs (unsicher, deshalb LFSRs kombinieren)
- Stromchiffre **schnell**, braucht **Synchronisation**, **verwundbar**

Blockchiffren

- **Blockchiffre** besteht aus $\mathrm{E} : \{0,1\}^k \times \{0,1\}^k \to \{0,1\}^k$ (invertierbare Funktion), die in Betriebsmodus genutzt wird
- Beispiele Betriebsmodus:
  - ECB: $C = (C_1, \ldots)$ mit $C_i = \mathrm{E}(K, M_i)$, simpel, **schwach**
  - CBC besser: $C_0 := IV$, $C_i := \mathrm{E}(K, M_i \oplus C_{i-1})$
- Beispiel E: DES (**Feistelstruktur**, mittlerweile zu schwach)





- Angriffe: Meet-in-the-Middle, differentielle/lineare Analyse

Sicherheit von Verschlüsselungsverfahren

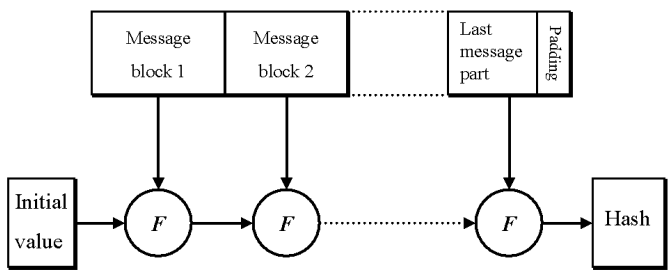
- **Semantische Sicherheit:** Chiffrat hilft nicht bei Berechnungen über Klartext, äquivalent zu IND-CPA
- **IND-CPA:** Chiffrate von verschiedenen Klartexten nicht unterscheidbar
- Blockchiffre im CBC-Modus (mit zufälligem IV) IND-CPA
- Feistel-Rundenfunktion pseudozufällig $\Rightarrow$ Feistel-Ausgabe pseudozufällig (und invertierbar!)

Information: Schlüssellängen

- Symmetrisches Verfahren gilt als gebrochen, wenn besserer Angriff als Brute Force bekannt
  - Manchmal strittig, ob Angriffsvoraussetzungen zu absurd (Differentielle Analyse von DES, Related-Key-Angriff auf AES-256)
- Populäre ungebrochene Schemata: AES, 3DES
- Aktuelle Grenze: 2^{100} Operationen (welche Operationen?) werden als „gerade nicht mehr praktikabel“ angesehen
- Deshalb: Schlüssellänge 128 Bit (z.B. von AES) ausreichend

Hashfunktionen

- **Hashfunktion** $\mathrm{H} : \{0,1\}^* \to \{0,1\}^k$: Daten-Fingerabdruck
- **Kollisionsresistenz:** kein effizienter Angreifer kann mit nicht-vernachlässigbarer Wahrscheinlichkeit Kollision finden
- **Einwegeigenschaft** (bzgl. $\{0,1\}^{2k}$) impliziert von Koll.-res.
- Merkle-Damgård-Konstruktion (Kompressionsfunktion $\Rightarrow \mathrm{H}$)



  - F kollisionsresistent $\Rightarrow \mathrm{H}$ kollisionsresistent
  - Wichtige MD-Instanzen: MD5, SHA-1 (**beide gebrochen**)

Information: Aktuelle Hashfunktionen

- Die zwei populärsten Hashfunktionen gebrochen (MD5, SHA-1)
- Hashfunktion gebrochen $\Leftrightarrow$ es gibt nichttrivialen Angriff
  - Trivialer und generischer Angriff: Birthday Attack (viele Paare hashen, nach Kollision suchen)
- Aktuell ungebrochen: Keccak (SHA-3)
- Bei Keccak: Ausgabelänge variabel (sollte 200 Bits oder mehr sein, wenn Kollisionsresistenz gewünscht)

Asymmetrische Verschlüsselung

- Schlüsselgenerierung: $(pk, sk) \leftarrow \mathrm{Gen}(1^k)$
- Verschlüsseln: $C \leftarrow \mathrm{Enc}(pk, M)$
- Entschlüsseln: $\mathrm{Dec}(sk, C) = M$
- **RSA:** $C = M^e \bmod N$ (so unsicher, homomorph)
  besser $C = \mathrm{pad}(M)^e \bmod N$ (RSA-OAEP sogar aktiv sicher)
- **ElGamal:** $pk = (\mathbb{G}, g, g^x)$, $C = (g^y, g^{xy} \cdot M)$ (homomorph, besonders effizient auf elliptischen Kurven)

Information: Parameter

- Bester Angriff auf RSA(-Varianten): Faktorisieren
- Bester Faktorisierungsalgorithmus: Zahlkörpersieb
  - Komplexer, zweistufiger Algorithmus
  - Nur erster Teil parallelisierbar
  - Implementierung auf Standardrechnern: 700-800-Bit-Zahlen
  - Vorgeschlagene Spezialhardware für 1024 Bit: 1 Jahr, viele M$
  - Deshalb vorgeschlagene Parameter: 2048-Bit-N
- Bester Angriff auf ElGamal: diskrete Logarithmen berechnen
  - Nur generische Algorithmen für (geeignete) elliptische Kurven
  - In $\mathbb{G} \subseteq \mathbb{Z}_p^*$ Index-Calculus-Algorithmus
  - IC zweistufig: einmalige Vorberechnung, dann DLog
  - Parameter: elliptische Kurven 200-300 Bit, $\mathbb{Z}_p^*$ 2048 Bit
- Diskussion gilt auch für Varianten und Signaturschemata

Symmetrische Nachrichtenauthentifikation (MACs)

- Signieren: $\sigma \leftarrow \mathrm{Sig}(K, M)$
- Verifizieren: $\mathrm{Ver}(K, \sigma)$ (gibt 0 oder 1 aus)
- **EUF-CMA-Sicherheit:** effizienter Angreifer, der Signaturen erfragen kann, kann kein σ für neue Nachricht fälschen
- **PRF als MAC**, Kandidat: $\mathrm{PRF}(K, M) = \mathrm{H}(K, M)$
  - **Achtung:** Kandidat keine PRF, wenn M-Länge variabel, und wenn H nach Merkle-Damgård-Prinzip aufgebaut
- **Hash-Then-Sign:** signiere $\mathrm{H}(M)$ (erhält EUF-CMA, Vorteil: Sig muss nur kurze Nachricht signieren)
- **Praxis:** HMAC $(\mathrm{Sig}(K, M) = \mathrm{H}(K \oplus \mathrm{opad}, \mathrm{H}(K \oplus \mathrm{ipad}, M)))$

Asymmetrische Nachrichtenauthentifikation (Signaturen)

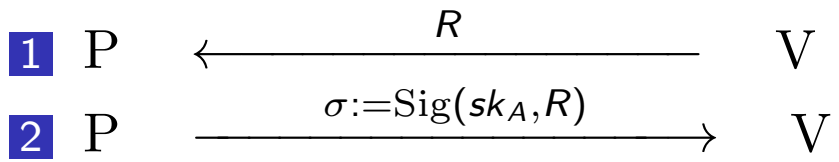
- Schlüsselgenerierung: $(pk, sk) \leftarrow \mathrm{Gen}(1^k)$
- Signieren: $\sigma \leftarrow \mathrm{Sig}(sk, M)$
- Verifizieren: $\mathrm{Ver}(pk, \sigma)$ (gibt 0 oder 1 aus)
- EUF-CMA und Hash-Then-Sign wie bei MACs
- RSA als Signaturschema ($\sigma = M^d \bmod N$):
  - Ungepaddet nicht EUF-CMA (homomorph!), deshalb RSA-PSS
- ElGamal-Signaturen: nicht EUF-CMA, gehasht (DSA) unklar

Schlüsselaustauschprotokolle

- Mit Schlüsselzentrum: Kerberos (mit symm. Verschlüsselung)
  - Kerberos praktikabel, stellt Authentifikation sicher
- Mit PK-Infrastruktur: **PK-Transport**, **Diffie-Hellman**
- Formale Sicherheitsmodelle komplex, viele Angriffsszenarien
- In Praxis benutzt: **TLS** (Transport Layer Security)
  - Schlüsselaustausch mit anschließender Verschlüsselung
  - Meistens nur ältere Versionen benutzt, viele Patches
  - Viele Angriffe: `ChangeCipherSpec` Drop, Angriff auf RSA-Padding, CRIME, ...
  - Historisch gewachsen, theoretisch unbefriedigend, Standard

Identifikationsprotokolle

- Ziel: PK-Infrastruktur gegeben, Partei identifiziert sich mit sk
- **PK-ID-Sicherheit:** Angreifer kann niemanden impersonieren, selbst wenn er vorher mit vielen Provern geredet hat
- Für PK-ID-Sicherheit **Signaturprotokoll** genug



- Funktioniert auch mit (aktiv sicherer!) Verschlüsselung

Zero-Knowledge-Protokolle

- **Idee:** Prover beweist, dass er sk kennt, aber Verifier lernt nichts (außer, dass Prover sk kennt)
- **Zero-Knowledge:** Transkripte (mit beliebigem Verifier) können simuliert werden
- **Proof of Knowledge:** sk kann aus jedem erfolgreichen Prover extrahiert werden
- Beispielprotokoll mit pk = Graph, sk = Dreifärbung
- ZK+PoK $\Rightarrow$ PK-ID-Sicherheit nur, wenn $pk \rightarrow sk$ schwer
- Konzept nützlich, um beliebige NP-Aussagen zu zeigen

Benutzerauthentifikation

- Standard: Nutzerauthentifikation mit Passwort $\texttt{pw}$
- Möglich: Server kennt $\mathrm{H}(\texttt{pw})$
  - Wörterbuchangriff möglich, wenn Server korrumpiert
  - Effizienter: Wörterbuch komprimieren (Rainbow Tables), Grundidee: Wörterbuch gezielt dynamisch bei Angriff ergänzen
  - Modern: Brute-Force-Suche mit vielen GPUs
- **Besser:** gesalzene Hashes $\mathrm{H}(\texttt{pw}, \texttt{salt})$ (verhindert zumindest Komprimierung von Wörterbuch, nicht aber GPU-Angriff)
- Weitere Maßnahmen: Key Strengthening, bessere Passwortwahl
- Weitere Authenfikationstypen möglich (z.B. positionsbasierte Authentifikation)

Zugriffskontrolle

- Ziel: Subjekten Rechte auf Objekte gewähren/verweigern
- Rechteverwaltung von Dateisystem statisch
- Bell-LaPadula: dynamische Rechteverwaltung (ds-, NoReadUp-, NoWriteDown-Eigenschaft), **nur Secrecy**
- Chinese Wall (ss-, Star-Property): vollkommen dynamisch, erkennt/verwaltet potentielle Interessenskonflikte

Hinweis zu Bell-LaPadula

- In früheren Vorlesungen/Klausuren: Schreibrechte implizieren Leserechte, explizite `set`-Anfragen
- Missverständlich, restriktiv, führt zu überraschenden Konsequenzen (keine WriteUp-Operationen möglich)
- **Für uns:** Schreibrechte implizieren *nicht* automatisch Leserechte, automatische Anpassung von f_c
- Niedrigprivilegiertes Subjekt darf auf hochprivilegiertes Objekt schreibend zugreifen (sofern Zugriffskontrollmatrix das zulässt)
- Konsequenz: bei Schreibzugriffen kann ss-Eigenschaft nicht verletzt werden

Analyse größerer Systeme

- **CIA-Paradigma:** Eigenschaften überprüfen (Confidentiality, Integrity, Availability), sehr anwendungsspezifisch
- **Simulierbarkeit:** Sicherheit durch Vergleich mit Idealisierung der Protokollaufgabe definieren
  - Relation „$\geq$“ auf Protokollen
  - Modulares Design durch Kompositionstheorem

Häufige Sicherheitslücken

- Software-Sicherheitslücken in CVE-Datenbank gesammelt
- Häufige Probleme: Buffer Overflows, Denial of Service, Code Execution, Cross-Site-Scripting, SQL-Injection
- **Wichtig:** mit Nutzereingaben vorsichtig umgehen
- Weitere Probleme: schlechter kryptographischer Zufall, schlechte APIs

Danke für die Aufmerksamkeit!
Danke für die vielen Kommentare!
Viel Erfolg für die Klausur!

Hörsaalbelegung (siehe auch Webseite):
A-G: Daimler
H-O: Audimax
P-Z: HSaF