

# Kryptographie

*Klaus Kusche*

# Inhalt (1)

**Wörtlich:**

***“Kryptographie” =  
“Die Lehre von der Verschlüsselung”***

**Hier etwas weiter gefasst:**

- **Verschlüsselungsverfahren**
- **Anwendung: Disk Encryption**
- **Hashes**
- **... (nächste Seite)**

# Inhalt (2)

- **Kryptographische Zufallszahlen**
- **Passwörter**
- **Signaturen & Zertifikate**
- **Anwendung: PGP, De-Mail**
- **Anwendung: Blockchain (z.B. Bitcoin)**
- **TPM (Trusted Platform Module)**
- **... (nächste Seite)**

# Inhalt (3)

- **Steganographie**
- **Typische Sicherheitslücken,  
sichere Programmierung  
(separate Folien)**

# Ziel

- **Überblick und Verständnis**, z.B. von
  - Verschlüsselungsverfahren
  - deren Anwendungen
- **Sensibilisierung**, z.B. für
  - typische Designprobleme beim Einsatz krypt. Verfahren
  - typische sicherheitsrelevante Fehler bei der Programmierung
  - ...

# Nicht Ziel

- **Exakte Detail-Kenntnis von**
    - Verschlüsselungs-Algorithmen
    - Mathematischen Grundlagen
  - **Praktische Programmierung**
  - **Netzwerk-Verschlüsselung usw.**  
(SSL/TLS, IPsec, Kerberos, ...)
  - **IT-Sicherheit**  
(Schutz vor Angriffen, Einbrüchen, Datenverlust, ...)
- ==> Beides sollte anderes Fach sein...*

# Voraussetzungen

- **Grundkenntnisse:**
  - Informatik, vor allem Programmierung
  - Zahlentheorie  
(Kryptographie ist ein Teilgebiet der Mathematik, nicht der Informatik!)
- **“Blick in die Realität”**  
(z.B. Heise Newsticker, ...)

# Motivation

- Man braucht nur die Fachnachrichten verfolgen...
- Fehler in diesem Bereich sind

***besonders “folgenreich”!***

*(rechtlich, finanziell, medial)*



# Krypt. Verfahren: Anwendungen

- **Geheimhaltung / Vertraulichkeit / Zugriffsschutz:**  
Verschlüsselungsverfahren
- **Integrität =**  
Schutz gegen Verfälschung / Veränderung:  
Kryptographische Hash-Funktionen  
(auch z.B.: Blockchain)
- **Authentizität / Nichtabstreitbarkeit =**  
Sicherstellung des Senders / Autors:  
Signaturen und Zertifikate
- **Authentifizierung und Passwörter**

# Wichtiger Hinweis (1)

Design und Programmierung von

- Verschlüsselungs-, Signatur- oder Hash-  
Algorithmen
- Passwort-Speichern
- Verschlüsselten Netz-Protokollen
- ...

*Niemals selber machen!*

# Wichtiger Hinweis (2)

## Immer

- vorhandene, weit verbreitete, für “gut” befundene Implementierungen (am besten Open Source)
- von vorhandenen, am besten standardisierten Verfahren bzw. Algorithmen

verwenden!

(z.B. *Java Cryptography Architecture,*

*OpenSSL, GnuTLS, nss,*

*libgcrypt, NaCl / libsodium, linux kernel, ...)*

# Symmetrische Verfahren (1)

Verwenden

- *denselben Schlüssel*
- manchmal sogar *denselben Algorithmus*  
zum *Verschlüsseln und Entschlüsseln*

Arbeiten *blockweise*: Blockgröße 64-512 Bit

Typische *Schlüssellänge*: 128-256 Bit (*64 Bit zu wenig!*)

# Symmetrische Verfahren (2)

Basieren auf einfachen Bit-Operationen:

Xor, Shift & Rotation (auch datenabhängig!),

Plus / Minus, Permutationen, ...

(nur Shift und Xor ist zu wenig!!!)

(meist keine Multiplikation usw.!)

Relativ einfache Algorithmen,

oft in mehreren "Runden" wiederholt

==> **In HW implementierbar**: "Krypto-Beschleuniger"

==> **Vektor-Einheit** (SSE- / AVX-Befehle) verwendbar!

==> **Schnell**: Einige 100 MB/s in SW, GB/s in HW!

# Symmetrische Verfahren (3)

**Beispiele:**

*DES* (zu kurzer Schlüssel: 56 Bits!)

*Triple-DES*

*IDEA* (unfrei)

*AES* “*Advanced Encryption Standard*” = Rijndael

(Rijndael hatte von allen AES-Kandidaten die schwächste Sicherheit, aber die höchste Geschwindigkeit in HW und SW)

*(Blowfish)*, *Twofish*, *Serpent*

(frei, u.a. Platten-Verschlüsselung, Twofish gilt als am sichersten)

CAST, MARS, RC6

# Symmetrische Verfahren (4)

Problem bei symmetrischen Verfahren:

***“Schlüsseltausch”***

*Wie kommt der geheime Schlüssel*

*z.B. über das Netz*

*vom Sender zum Empfänger (oder umgekehrt),  
ohne dass ihn ein Dritter abfangen kann?*

# Asymmetrische Verfahren (1)

Verwenden *zwei zusammengehörige Schlüssel* (“*Schlüssel-Paar*”):

- *“Öffentlicher” Schlüssel zum Verschlüsseln*
- *“Privater” Schlüssel zum Entschlüsseln*

Deshalb auch:

*“Public-Key-Verfahren”*



# Asymmetrische Verfahren (2)

- Der Empfänger berechnet einmal sein **persönliches Schlüsselpaar** (für alle zukünftigen Verschlüsselungen zu ihm),
- veröffentlicht den öffentlichen Schlüssel und hält den privaten Schlüssel geheim

=> Jeder kann verschlüsseln,  
nur der “richtige” Empfänger kann entschlüsseln!

=> **Kein Schlüsseltausch-Problem mehr!**  
(öffentlicher Schlüssel kann problemlos im Klartext zum Sender geschickt werden!)

# Asymmetrische Verfahren (3)

Arbeiten ebenfalls blockweise,  
aber mit größeren Block- und Schlüssellängen:  
2048-4096 Bits (512 Bit, ev. 1024 Bit sind zu wenig!)

Arbeiten intern mit entsprechend langen int-Zahlen  
(2048 Bits ... Dezimalzahl mit über 600 Ziffern!)  
und mit Multiplikation, Restrechnung, ...

=> Aufwändiger, mindestens 1000 mal langsamer!

=> Schlecht durch Hardware oder Vektor-Befehle  
zu beschleunigen.

=> Unterschiedliche Algorithmen zur Ver- und Entschlüsselung

# Asymmetrische Verfahren (4)

Basieren auf Problemen der diskreten Mathematik (z.B. Zahlentheorie), die

- ***in einer Richtung schnell zu berechnen sind***  
(Berechnen eines neuen Schlüsselpaares)
- ***in der anderen Richtung nur extrem aufwändig***  
(z.B. nur durch Durchprobieren aller Zahlen)  
zu lösen sind  
(Berechnen des privaten Schlüssels  
aus dem öffentlichen Schlüssel)

**“Einweg-Funktion” bzw. “Falltür-Probleme”**

# Asymmetrische Verfahren (5)

## Beispiel 1: Faktorisierung großer Zahlen

Wenn  $p$  und  $q$  zwei sehr große Primzahlen sind,

- dann ist  $n = p * q$  "leicht" zu berechnen,
- aber die Berechnung von  $p$  und  $q$  aus  $n$  praktisch unmöglich  
(obwohl theoretisch bekannt  
und im Prinzip eindeutig lösbar)

Anwendung u.a.: ***RSA-Verschlüsselung***

# Asymmetrische Verfahren (6)

## Beispiel 2: “Diskreter Logarithmus”

$$a^x \text{ kongruent } m \text{ mod } p$$

für  $a, x, m, p$  ganzzahlig

- Leicht für  $a, x, p$  gegeben und  $m$  gesucht
- Sehr schwer für  $a, m, p$  gegeben (und groß!) und kleinstes lösendes  $x$  gesucht

Anwendung: **Diffie-Hellman, DSH, Elgamal**

# Asymmetrische Verfahren (7)

Ähnliche Idee: **ECC** = “*Elliptische Kurven*”

Im wesentlichen auch ein diskreter Logarithmus,  
aber nicht mit ganzen Zahlen,  
sondern mit Punkten auf Kurven!

Einzelne Rechenschritte sind

“schwieriger” und schlechter auf HW optimierbar

==> Kürzere Schlüssel reichen aus:

Derzeit 256 Bits, ev. 512 Bits

**ECDSA** für Signaturen, **ECDH** für Schlüsseltausch

“**Curve25519**” gilt als bestes ECC-Verfahren

# Hybride Verfahren

In der Praxis:

***Kombination*** beider Verfahren  
(z.B. SSL/TLS, IPsec, PGP, ...):

- Zuerst asymmetrisches Verfahren  
zum ***Austausch des symmetrischen Schlüssels***,  
z.B. Diffie-Hellman-Schlüsseltausch  
(sym. Schlüssel ist kurz ==> darf langsam sein!)
- Dann symmetrisches Verfahren  
zum Austausch der ***Nutzdaten***  
(schnell)

# \*SA vs \*DH (1)

Unterschied RSA / DSA / ECDSA und DH / ECDH:

- \*SA sind universelle Verschlüsselungsverfahren
- \*DH sind spezielle Algorithmen ausschließlich zur Berechnung und zum sicheren Austausch eines symmetrischen Schlüssels:

***“Schlüsselaustauschverfahren”***

(primär auf Netzwerk-Verbindungen)



## \*SA vs \*DH (2)

DH verwendet zusätzlich *Zufallszahlen*

==> DH bietet “*Forward secrecy*”, RSA nicht:

- Kenntnis des privaten asymmetrischen Keys:
  - aufgezeichnete verschlüsselte Daten
  - symmetrische Keysalter (schon beendeter) Verbindungen sind *nicht nachträglich knackbar*
- Kenntnis des symmetrischen Keys einer Verbindung  
==> Andere Verbindungen sind damit nicht knackbar

# Krypto-Analyse

Angriffe durch “*Krypto-Analyse*”:

- ( $\Rightarrow$ ) Klartext herausfinden)
- $\Rightarrow$  Schlüssel herausfinden!!!

Ein Verschlüsselungsverfahren ist gebrochen,  
wenn das mit deutlich weniger Aufwand als  
“Brute Force” (= alles durchprobieren)  
gelingt!

(z.B.  $2^{96}$  statt  $2^{128}$  Versuche)

# Anforderungen (1)

- Kein statistischer / struktureller Zusammenhang zwischen Klartext und Chiffre:

***“Pseudo-zufälliger Output”***

- Keine erkennbarer Zusammenhang  
*Bestimmte Bits im Input / Schlüssel  $\Leftrightarrow$   
Bestimmte Bits im Output*
  - Keine Beschreibung durch ein  
*algebraisches Gleichungssystem*
- $\Rightarrow$  Verhindert u.a. ***statistische Analysen***  
(z.B. *Zeichen-Häufigkeit*)

# Anforderungen (2)

Beständigkeit gegen “*Known Plaintext*”-Attacken:

- Klartext und Chiffrat bekannt  
(oder Chiffrat und Teile des Klartextes bekannt),
- Schlüssel gesucht

**Extremfall:**

Krypto-Box in Händen des Angreifers

=> beliebig viele Klartext/Chiffrat-Paare berechenbar!

*Trotzdem darf der Schlüssel daraus nicht “leicht”  
(schneller als durch Brute Force) ermittelbar sein!*

# Anforderungen (3)

Sonderfall “*Differenzielle Analyse*”:

Ganz kleine Änderung im Original

=> Rückschluss auf den Schlüssel / Schlüssel-Teile  
aus resultierender Änderung im Chifftrat?

=> Anforderung “*Lawinen-Effekt*” = “*Diffusion*”:

Kleine Änderungen im Klartext

bewirken große Änderungen im Chifftrat

(Ein einziges Bit im Input ändern

=> Jedes Bit im Output ändert sich  
mit 50 % Wahrscheinlichkeit)

# Anforderungen (4)

Beständigkeit gegen “*Seitenkanal-Attacken*”

- Timing- und Stromverbrauchs-Analyse
- Rückschlüsse aus Sprung- und Cache-Verhalten
- Analyse der Funk-Abstrahlung

==> Der Algorithmus muss  
für Beobachter von außen  
für alle Inputs & Schlüssel  
“gleich” rechnen!

# Anforderungen in Zukunft?

“*Quantencomputer-feste*” Krypto-Algorithmen

Weil: Quantencomputer können viele Probleme grundlegend schneller lösen!

Bisherige konkrete Ergebnisse: Quanten-Algorithmen

- ... halbieren die effektive Schlüssellänge von AES:  
128  $\Rightarrow$  64 Bit
- ... faktorisieren/logarithmieren in polynomialer Zeit:  
 $\sim L^*L^*\log(L)^*\log(\log(L))$  Schritte bei Zahl mit  $L$  Ziffern  
(Faktorisierung bisher:  
*Superpolynomiale, aber subexponentielle Zeit:  $\sim \exp(\sqrt{L^*\log(L)})$  )*

# Verschlüsselung langer Daten (1)

Wie verwende ich die bisherigen Verfahren  
(arbeiten alle auf fixer Blockgröße!),  
um einen beliebig langen Strom von Daten  
zu verschlüsseln?

=

Wie mache ich  
aus einem **Blockchiffre**-Verfahren  
ein **Stromchiffre**-Verfahren?



# Verschlüsselung langer Daten (2)

***ECB (“Electronic Code Book Mode”):***

- Datenstrom in Blöcke teilen
- Jeden Block separat verschlüsseln

Nachteile:

- ***Gleicher Block ==> gleiches Chiffre***
- Block-Reihenfolge ev. unbemerkt verfälschbar

Vorteil:

- Wiederaufsetzen nach Fehlern / Verlusten  
(nur ein Block kaputt)

# Verschlüsselung langer Daten (3)

***CBC (“Cipher Block Chaining Mode”):***

Bei jedem Block vor der Verschlüsselung:

***Xor mit vorigem Chiffrat***

(beim ersten Block:

Xor mit beliebigem ***“Initialisierungsvektor”***,

z.B. Zufallszahl)

==> Problem mit gleichen Blöcken behoben

==> Vertauschung der Reihenfolge fällt auf

Bei Fehlern: 2 Blöcke kaputt, dann wieder ok

# Verschlüsselung langer Daten (4)

*CFB (“Cipher Feedback Mode”)*

Verkettung ähnlich CBC:

Xor mit Plaintext  
nach der Verschlüsselung  
des vorigen Chiffrats

Selten!

# Verschlüsselung langer Daten (5)

***CTR (“Counter Mode”):***

Arbeitet pro Block, ohne Verkettung:

Verschlüsselt wird

**Zufallszahl + fortlaufender Zähler**

==> Erzeugt jedesmal anderen

**“zufälligen” Bitstrom**

Klartext wird danach dazu verschlüsselt:

**Xor mit diesem Bitstrom**

# Verschlüsselung langer Daten (6)

Verschlüsselung und Entschlüsselung sind ident:

- Der Empfänger erzeugt auf dieselbe Art (mit derselben Zufallszahl) ***denselben Bitstrom***
- ... und berechnet das *Xor von Chiffirat und Bitstrom*  
=> Liefert den Klartext

Bei *Bitfehlern* in der Übertragung:

Nur *genau entsprechende Bits*

der entschlüsselten Daten betroffen!

(kann Vorteil oder Nachteil sein: ***Verfälschbar!!!***)

# Verschlüsselung langer Daten (7)

Die Erzeugung des Bitstroms  
(= der aufwändige Verschlüsselungs-Algorithmus) ist

- parallelisierbar  
(jeder Block ist für sich berechenbar)
- vorausrechenbar  
(die Verschlüsselungsberechnung hängt nicht vom Klartext ab)

Echte **Stromchiffre**, kann Byte für Byte arbeiten!  
(Byte für Byte Xor von Klartext mit Bitstrom)

# Verschlüsselung langer Daten (8)

*OFB (“Output Feedback Mode”):*

Ähnlich CTR, aber mit Verkettung statt mit Zähler:

Initialisierungsvektor wird  
immer wieder verschlüsselt

Klartext wird danach mit Xor dazu verschlüsselt

Entschlüsselung ist ident

# Verschlüsselung langer Daten (9)

***GCM*** (*“Galois/Counter Mode”*):

Wie CTR mit Zähler,  
aber mit zusätzlicher Auth-Tag-Berechnung

Gilt als derzeit bestes Verfahren,  
in vielen Standards verwendet:

IPsec, SSH, TLS, OpenVPN, viele HW-Encodings, ...

Auth-Tag = Prüfsumme = kryptografischer Hash:

=> ***fälschungssichere Fehlererkennung!***

**“GMAC”**: Nur Auth-Tag-Berechnung, unverschlüsselt



# Disk Encryption (1)

Ist (außer dem User-Interface zur Konfiguration) normalerweise keine Anwendung, sondern sitzt

- im Betriebssystem
- als Treiber
- unmittelbar über den Disk-I/O-Hardware-Treibern weit unterhalb der Filesystem-Logik

==> Installation erfordert normalerweise ***Admin-Rechte***

# Disk Encryption (2)

- Verschlüsselt jeden einzelnen Disk-Block unmittelbar bevor er zur Platte geschickt wird
  - Entschlüsselt jeden einzelnen Disk-Block unmittelbar nachdem er von der Platte kommt
- ==> Die Verschlüsselung **“sieht” nur Disk-Blöcke** (ohne Kenntnis ihrer Bedeutung), hat keine Ahnung von Files, Filesystemen und File-Metadaten
- ==> ... ist Filesystem-unabhängig
- ==> ... verschlüsselt File-Inhalte und File-Metadaten, aber auch Swap-Spaces, Suspend-Partitionen usw.

# Disk Encryption (3)

Arbeitet *transparent* und “*on-the-fly*”  
(d.h. man merkt davon in der laufenden Arbeit nichts):

Sobald das Disk-Passwort o.ä. eingegeben ist  
(meist ein Mal beim Booten oder beim Login),

sind alle Daten  
auf dem verschlüsselten Datenträger

normal (=unverschlüsselt)  
sichtbar, lesbar und schreibbar

(grundsätzlich für alle Benutzer & Dienste)

# Unterschied File Encryption

## File Encryption

- verschlüsselt *nur die File-Inhalte*, aber nicht die File-Metadaten
- ist meist eine *normale Anwendung*, keine Betriebssystem-Komponente, erfordert keine besonderen Rechte
- wird *explizit* zum Ver- oder Entschlüsseln einzelner Dateien / Verzeichnisse *aufgerufen*
- erlaubt *verschiedene Passwörter* pro Benutzer / pro Datei oder Verzeichnis

# Zweck Disk-Encryption (1)

## Schutz vor

- Auslesen der Daten bei ***HW-Diebstahl***  
(vor allem bei Laptops usw.)
- Auslesen der Daten durch ***Booten***  
eines ***fremden Betriebssystems***  
(z.B. Linux von einem USB-Stick)
- Verwendung der Datenträger  
nach ***Einbau in andere Rechner***  
(bei *Hardware-Bindung durch TPM*)

# Zweck Disk-Encryption (2)

Schützt nicht vor Zugriff auf alle Daten

- *in einer angemeldeten Sitzung*  
(z.B. “Kollege während der Kaffeepause”)
- bzw. durch am Rechner laufene *Malware*,  
via *Fileshares* über's Netz usw.

Für diese Fälle:

***File-Encryption verwenden!***

# Angriffe (1)

- **RAM** enthält im laufenden Betrieb ständig den Key zur Entschlüsselung  
=> Zugriff auf das RAM über **ext. Schnittstellen**, die eigenständig RAM-Zugriffe machen können (Thunderbolt, Firewire, ...)
- **RAM** hält die Daten nach dem Abschalten für **einige Minuten** (je nach Temperatur, ...)  
=> Schneller Boot mit Diagnose-OS, Memory Dump
- **RAM** wird bei Suspend in den **Hibernate-File** geschrieben... (Disk-PW auch???)

# Angriffe (2)

- Disks bleiben *im Sleep-Mode entsperrt*, eingegebenes Passwort bleibt *erhalten*  
*==> Bei Laptop-Diebstahl im Sleep-Mode sind die Daten zugreifbar!!!*
- Bei Platten-Verschlüsselung in Hardware (im Laufwerks-Controller):  
Passwort gilt, *solange Strom da ist*  
*==> Ohne Unterbrechung der Stromversorgung mit anderem Betriebssystem booten oder Platten mit anderem Rechner verbinden*



# Backup

- ***File-basiertes Backup*** einer verschlüsselten Disk:  
*Files werden im Klartext am Backup gespeichert!*

Gegenmaßnahmen:

- *File-Encryption nutzen*: Files mit File-Encryption werden verschlüsselt am Backup gespeichert
- *Backup separat verschlüsseln*  
(Bandlaufwerk mit Hardware-Verschlüsselung)
- ***Image- bzw. Block-basiertes Backup***  
ist *je nach Software* verschlüsselt oder nicht!

# Datenträger (1)

Was kann eine Disk Encryption verschlüsseln?

1.) ***“Physical Volume” = Komplette Platte***

(incl. Boot Sector, Partitionstabelle, ...  
und allen Partitionen)

Die ganze Platte enthält dann *“zufälligen Bitsalat”*

==> Sieht *“unbenutzt”* bzw. *“bewusst gelöscht”*  
(mit Zufallszahlen überschrieben) aus

# Datenträger (2)

## 2.) ***“Logical Volume” = Ein Filesystem***

- Eine Partition
- Ein logisches RAID-Laufwerk
- Eine Volume (auch über mehrere Platten)  
in einem Logical Volume Manager

Ohne Boot-Sektor bzw. Partitionstabelle

## 3.) ***Container (“virtual drive”) = Ein eigenständiges Filesystem innerhalb eines großen Files***

(in Linux: “Loop mount”)

# Datenträger (3)

## 4.) *“Hidden Volume”*:

Eigenständiges Filesystem wie ein Container, aber nicht in einem File gespeichert, sondern

*“unsichtbar” in den unbenutzten Blöcken  
eines anderen Filesystems  
 (“Outer Volume”,  
 meist ebenfalls verschlüsselt)*

==> Kann im Kontrollfall *“abgestritten”*  
 bzw. verheimlicht werden:  
 Nur “Outer Volume” herzeigen!

# Datenträger (4)

Zu 2. auf Linux:

Alle Benutzer-Daten  
stehen unter **/home/username/...**

==> Häufig: Entweder **/home** als Ganzes  
oder jedes **/home/username** einzeln  
auf eigene Partition legen und verschlüsseln

Die System-Partition wird oft gar nicht verschlüsselt  
==> *Normaler, einfacher Boot-Vorgang möglich*

**Login-Password** entsperrt zugleich **Home-Partition**  
==> Benutzer-Daten erst nach Login sichtbar

# Passwort-Eingabe (1)

- Meist beim Booten: Passwort- oder Pin-Eingabe, Smartcard bzw. USB-Stick, Biometrie

*Bei kompletter Verschlüsselung  
der System-Platte:*

***“Pre-Boot”-Passwort-Eingabe* nötig**  
(derzeit noch kaum umgesetzt)

- Wenn nur Hardware-Bindung gewünscht:  
***Nur TPM***, ohne Authentifizierung
- Wenn nur Diebstahlschutz gewünscht:  
Nur ***Erreichbarkeit*** eines firmeninternen ***Servers***

# Passwort-Eingabe (2)

De facto bei verschlüsselter System-Partition meist:

- **Windows, Mac:**

BIOS bootet Minimal-System nur für PW-Abfrage aus versteckter, unverschlüsselter Partition

Dieses bootet nach Passwort-Eingabe  
das “echte” System  
in der verschlüsselten Partition

# Passwort-Eingabe (3)

- **Linux:**

Normales Booten des unverschlüsselten Kernels mit unverschlüsseltem Bootloader und unverschlüsselter initrd

***Passwort-Abfrage im initrd-Modus,***  
danach Umschaltung auf  
“echtes” verschlüsseltes Root-Filesystem

(unter Linux stehen Kernel & Initrd in vielen Fällen nicht in der System-Partition, sondern entweder in einer eigenen, unverschlüsselten Boot-Partition oder als UEFI-Exe in der UEFI-Partition)



# Passwort-Eingabe (4)

Bei vollständiger Implementierung  
und Verwendung von TPM  
(“*Secure Boot*” in Maximalversion):

*TPM erkennt jede Veränderung  
an den unverschlüsselten Teilen  
vor dem Booten bzw. bis zur PW-Abfrage!*

# Verschlüsselung (1)

*Symmetrisch*, meist

- *AES* 128 oder 256 (in kommerziellen Produkten)
- *Twofish* oder *Serpent* o.ä. (bei Open Source)

**Problem:**

*Key dafür muss 128 oder 256 Bits lang sein!*

==> Key direkt als Passwort wäre unpraktisch,  
schlecht einzugeben!

Entweder: Key ist gehashtes *Passwort*

# Verschlüsselung (2)

Oder:

Der eigentliche Key für die Verschlüsselung  
wird meist zufällig erzeugt  
und mit dem Passwort verschlüsselt

Nur der verschlüsselte Key wird gespeichert!  
(der Klartext-Key wird als Recovery Key ausgegeben  
und dann gelöscht)

=> Zugriff auf die Daten nur nach Entschlüsselung  
des verschlüsselten Keys mit dem Passwort  
(Key weg oder Passwort weg => kein Zugriff!)

# Recovery

Beim Konfigurieren der Verschlüsselung und Festlegen eines Passwords:

***Recovery-Key oder Recovery-File***  
(mit dem Original-Key) werden angezeigt

Zweck: Daten-Rückgewinnung

- bei ***Verlust des Passwords***
- bei ***Defekt des TPM***

***Offline sicher aufbewahren!***  
(Papier & Tresor oder USB-Stick & Tresor)

# Verschlüsselung (3)

Die einzelnen *Disk-Blöcke* (512 B bzw. 4 KB) werden *unabhängig voneinander* verschlüsselt (ohne Verkettung der Verschlüsselung)

*Innerhalb eines Disk-Blocks* werden die AES-Blöcke miteinander *verkettet*, damit sich wiederholende Klartext-Bitmuster unterschiedliche Verschlüsselungen haben

- Früher: Normales **CBC** (Cipher-Block Chaining)
- Dann: **LRW** (Liskow, Rivest, Wagner)
- Heute meist: **XTS** (extra für Disk-Verschlüsselung entwickelt)

# Verschlüsselung (4)

Problem dabei:

*Welcher IV (Initialisierungsvektor)  
wird für jeden Disk-Block verwendet?*

- **Fixer IV: Ganz schlecht**  
(gleicher Klartext-Disk-Block  
==> Gleicher verschlüsselter Disk-Block)
- **IV = Sektornummer des Disk-Blocks**  
Etwas besser, aber Teil-Angriffe möglich  
(z.B. feststellen, ob eine Datei mit präpariertem Inhalt verschlüsselt gespeichert wurde oder nicht)

# Verschlüsselung (5)

- **Jedesmal neuer, zufälliger IV:**  
*Sicherer*, aber *aufwändig*:  
IV für jeden Disk-Block muss separat verschlüsselt gespeichert werden
- **IV = verschlüsselte Sektor-Nummer:**  
Heute bestes Verfahren, z.B. in XTS  
Verwendet einen Key doppelter Länge:
  - Eine Hälfte für die eigentliche Daten-Verschlüsselung
  - Eine Hälfte für die Verschlüsselung der Sektor-Nummer für IV

# HW-Verschlüsselung (1)

## *“Self encrypting drives”*

Es gibt Platten- und Bandlaufwerke  
mit eingebauter Hardware-Verschlüsselung  
(OPAL-Standard, verwendet AES 128 oder 256)

... oder “Verschlüsselungs-Zwischenstecker”  
für die Datenleitung zum Laufwerk

=> Ver- und Entschlüsseln selbsttätig  
ohne Performance-Verlust



# HW-Verschlüsselung (2)

- Key wird im Laufwerk zufällig erzeugt, ***verlässt das Laufwerk nie!***
- Key ist auf dem Laufwerk mit einem Passwort verschlüsselt gespeichert
- “Freischalten” des Keys bzw. des Datenzugriffs durch Übermittlung des Passwords beim Booten
- “***Quick delete***”-Feature:

*Verschlüsselten **Key** im Laufwerk **löschen***

*==> Alle Daten am Laufwerk  
dauerhaft nicht mehr lesbar*

# Produkte

**BitLocker:** Bestandteil von Windows

**dm-crypt:** Bestandteil von Linux und BSD

(basierend auf LUKS =

Offener Standard für verschlüsselte Filesysteme)

**FileVault:** Bestandteil von macOS

**VeraCrypt (früher TrueCrypt):**

Open-Source-Software für Win, Mac, Linux, ...

- Sehr gründliches Security-Audit
- Sehr viele Krypto-Algorithmen zur Wahl
- Kann “Hidden Volumes”

# Hash

Bei Dateien, Mails, ...:

- Nur Unverfälschtheit:

**Hash** (kein Schlüssel o.ä.)

- Unverfälschtheit +  
Authentizität & Vertrauenswürdigkeit &  
“Nicht-Abstreitbarkeit” des Absenders

**Hash**

+ **Signatur** (beruht auch auf Hashes)

+ **Zertifikats-Infrastruktur**

# Hash (1)

*Hash = “Prüfsumme” (“fingerprint”)*

Bei der Erzeugung: Kein Passwort oder Schlüssel

==> Jeder kann Hash erstellen und prüfen

Hashwert ist normalerweise kürzer als Nachricht (z.B. fix 256 Bits), daher keine bijektive Funktion

==> Informationsverlust:

Original-Nachricht nicht aus Hash herstellbar

==> Verschiedene Original-Nachrichten

können (ganz selten!) gleichen Hash haben

# Hash (2)

Unterschied zu Hashfunktion z.B. bei Hashtable:  
Mit besonderen Eigenschaften / Anforderungen!

## “Kryptographische Hashfunktion”

- ***Kollisionsresistent*** (nächste Folie)
- ***“Lawineneffekt”***:  
Kleine Änderungen im Original  
=> Große Änderungen im Hash
- ***Einweg-Funktion***: Darf nie “rückrechenbar” sein  
(selbst bei gleicher Länge wie Original-Nachricht)

# Kollision Fall 1 (1)

**Gegeben, fix:**

- Nur Hashwert
- Oder Nachricht A und deren Hashwert

**Gesucht:**

Andere Nachricht B, die denselben Hash ergibt

==> A kann durch B ersetzt werden,  
ohne dass es auffällt

==> Wenn der Hash des echten Passwortes A  
bekannt ist, wird auch B als Passwort akzeptiert  
(ohne dass man A kennen muss)

# Kollision Fall 1 (2)

Ziel bei Dateien / Nachrichten in der Praxis:

***Konstruiere B*** so, dass es besteht aus

- Großen Teilen, die ident zu A sind (z.B. Nachrichten-Anfang)
- Einer (kleinen) gezielten, fixen, böswilligen Veränderung im Vergleich zu A
- Einigen beliebigen, “dazukonstruierten”, möglichst unauffälligen Veränderungen zur “Korrektur” des Hash-Wertes

# Kollision Fall 2

**Gegeben:**

Oft: Gewünschte Nachrichten-Schnipsel (z.B. Anfang)

**Gesucht:** Konstruiere 2 verschiedene Nachrichten, die diese Schnipsel enthalten und denselben (aber nicht fix vorgegebenen) Hashwert haben

==> z.B.: Verschicke B, aber behaupte nachher, dass A die echte Nachricht ist

In vielen Fällen:

Erstes Pärchen ist schwer, weitere gehen “schnell”



# Kollision allgemein

*Ein Hash-Verfahren ist gebrochen,  
wenn Fall 1 oder Fall 2 deutlich schneller  
als mit “Durchprobieren” zu lösen ist!*

*(d.h. wenn Kollisionen intelligenter  
als durch simples Durchprobieren  
erzeugt / gefunden werden können)*

(Fall 2 ist meist leichter als Fall 1)

# Hash-Verfahren (1)

... sind vom Code her ähnlich  
wie symmetrische Verschlüsselungen:

***Bitoperationen (Xor, Shift, ..)  
auf großen Bit-Blöcken fixer Länge***

==> schnell

==> mit HW-Unterstützung (z.B. SSE / AVX)  
implementierbar

# Hash-Verfahren (2)

***MD4 / MD5: “Message Digest”:***

Zu alt (seit 1990 und 1992), zu wenige Bits (128),  
seit > 10 Jahren praktisch geknackt  
(auf einem PC in wenigen Minuten)

***SHA, SHA-1 (1995): “Secure Hash Algorithm”***

Seit 2005 theoretisch und seit 2017 praktisch  
geknackt (hat 160 Bits, Hack-Komplexität  $\leq 2^{64}$ )

***SHA-2 = SHA-256, SHA-384 und SHA-512:***

Längere Varianten davon, noch sicher

***SHA-3*** (seit 2015, 224 - 512 Bits)

# Hash: Anwendungen (1)

- Unverfälschtheit von Dokumenten & Nachrichten

Siehe später:

- Speicherung von Passwörtern
- Lange / hochwertige Zufallszahlen
- One Time Passwords
- Challenge-Response-Verfahren
- Blockchain

# Hash: Anwendungen (2)

*Das gesamte System der **Krypto-Zertifikate** beruht kritisch auf Hash-Funktionen!*

Hash-Funktion knackbar

==> Zertifikate fälschbar oder falsch zertifizierbar,  
ohne dass es auffällt

(siehe z.B.: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kollisionsangriff> :  
Wie mache ich mich selbst heimlich zur Zertifizierungsstelle?)

# Kryptographische Zufallszahlen

## Verwendung:

- Schlüsselgenerierung (z.B. https-Verbindungen)
- Initialisierungsvektor für Stromverschlüsselungen
- Challenge-Response-Abfragen
- Password-Salt, ...

Wichtige Eigenschaft aus Sicht der Kryptographie:

*Die verwendete bzw. die nächste / vorige Zufallszahl darf **nicht berechenbar / vorhersagbar** sein!*

# Normale Zufallszahlen (1)

... sind *Pseudo-Zufallszahlen*,  
d.h. nach *bekannten Formeln berechnet*  
(aus einem *internen Status* des Generators)

=> Absolut *vorhersagbar!*  
(letzte Zahlen bekannt => nächste berechenbar)

=> *Zyklisch* = Ein “Kreis” von Zahlen  
(Ein Maß für die *Qualität* der Generatoren:  
*Länge des Zyklus* =  $2^{15} \dots 2^{\text{(einige Zehntausend)}}$ ,  
wobei die Länge des Zyklus kleinergleich  
(meist gleich) der Größe des internen Status ist)

=> Nicht für Kryptografie verwenden!!!

# Normale Zufallszahlen (2)

Startwert = “**Seed**” = Anfangswert des internen Status

Bei gleichem Startwert:

Genau gleiche Folge von Zufallszahlen!

In der Praxis üblich:

Bei jedem Programmstart anderer Startwert

(bitte nicht “Zeit in Sekunden”,  
sondern 64 bit Nanosekunden, TSC o.ä.!)

Trotzdem nicht für Kryptografie verwenden!!!



# Physikalischer Zufall (1)

Wirklich zufällige Zahlen müssen auf Kombination mehrerer physikalischer Ereignisse basieren!

De facto meist Zeitabstände zwischen Interrupts:

- 1.) Netz-Paketen auf Ethernet, WLAN, ...
- 2.) Tastatureingaben, Mausbewegungen, Touch
- 3.) Wartezeit bei Festplatten-Zugriffen  
(nicht bei SSD, streut zu wenig!)

plus **Bewegungs-Koordinaten** von Maus & Touch,  
Touch-Zeit und -Stärke, ...

# Physikalischer Zufall (2)

*Nur in endlicher Menge / Datenrate verfügbar!*

Problem vor allem ...

- kurz nach dem Booten: Noch wenig / kein I/O
- bei Servern und vor allem Embedded Devices, Smartcards, ...: Keine Eingabe-Geräte, keine beweglichen Teile, ev. kein Netzwerk
- bei virtuellen Maschinen: Keine phys. Geräte, viele Maschinen mit identem Umfeld  
=> generieren gleiche Zufallszahlen?

# Physikalischer Zufall (3)

Besser:

Zusätzlich *echter Zufallsgenerator*  
in Hardware!

Basiert auf

*“weißem bzw. thermischem Rauschen”*  
von Halbleitern u.ä., d.h. digitalisiertem  
*zufälligem elektrischem Analogsignal*

(oder: Radioaktiver Zerfall, elektromagnet. Hintergrund-Rauschen, ...)

==> Schneller / besser,  
aber auch begrenzte Datenrate

# Zufallszahl berechnen (1)

Im einfachsten Fall:

- Phys. Inputs auf Qualität prüfen,  
Quelle bei zu wenig Zufall verwerfen!
- Mehrere phys. Quellen zusammenhängen
- Kryptografischen Hash davon berechnen

# Zufallszahl berechnen (2)

Für mehr Zufallszahlen als die Physik liefert  
(z.B. bei Linux `/dev/random` und `/dev/urandom`):

- Pseudo-Zufallszahl-Generator mit *langer Periode*  
(z.B. Mersenne Twister usw.)
- Initialisierung und regelmäßige Re-Initialisierung  
(spätestens nach Größe Ausgabe = Größe interner Status)  
mit Hardware-basierter Zufallszahl
- Mehrere Ausgabe-Zahlen nochmals hashen,  
damit interner Status nicht rückrechenbar ist

# Kryptographische Generatoren (1)

Alternative z.B.

## ***BBS-Generator***

(Blum-Blum-Shub-Generator)

Beruhrt auf Produkt  $n$  von 2 geheimen, großen (hunderte Stellen!) Primzahlen und mod-Rechnung

Unbrechbarkeit hängt u.a. ab von der Schwierigkeit der Faktorisierung

Aber wie jeder “gerechnete” Generator:

***Periodisch, nur endlich viele “Zufalls”-Zahlen!***

# Kryptographische Generatoren (2)

Außerdem:

Man nutzt nicht alle Bits des internen Status für die Ausgabezahl, sondern nur eines oder ein paar

==> Aus den gelieferten Zufallszahlen ist

- der interne Status

- der Startwert

- die große Zahl  $n$

nicht praktisch berechenbar

==> Ohne Kenntnis von  $n$  ist

***Vorwärts-Rechnen nicht möglich!***

# Zufallszahlen-Fails (1)

Entweder:

- ***Ergebnismenge*** ist viel *kleiner als erwartet*,  
d.h. *nur wenige Zahlen* kommen als Ergebnis vor  
==> *Durchprobieren* geht *schneller* als erwartet

Oder:

- Berechnen der ***vorigen / nächsten Zahl*** oder  
des internen Status ist viel *einfacher als erwartet*  
==> Aus der Kenntnis einer Zahl  
sind *alle weiteren vorhersagbar*



# Zufallszahlen-Fails (2)

1.) NSA hatte heimlich geschwächten Generator “***Dual\_EC\_DRBG***” standardisieren lassen

==> Für bestimmte Parameter:

- Schlecht verteilte Zufallszahlen
- Nächste Zahl voraus berechenbar

2.) Debian baute versehentlich einen **Bug im KeyGen** von **OpenSSL** ein: **Nur  $2^{15}$  Zufallszahlen!**

==> Viele Millionen leicht knackbare Keys weltweit für SSH, OpenVPN, DNSSEC, X.509 Zertifikate, ...

3.) Der **MIFARE Hack** (schlechter Random Seed)

# Passwort-Speicherung (1)

- Wenn Klartext-Passwort nicht gebraucht wird (sollte der Normalfall sein!):

***Einweg-Verschlüsselung = Hash***

(==> wenn Passwort-Datei geklaut:  
Passwords nicht rückrechenbar!)

- Hash-Algorithmus darf & muss langsam sein!!!

==> Hash ev. einige tausend Mal rechnen!

(Argon2, **scrypt**, **bcrypt**, (PBKDF2))

==> verzögert Brute-Force-Attacken

und vor allem Berechnung von Rainbow Tables

# Passwort-Speicherung (2)

- Beim Hashen: ***“Salzen”!!!***

***Salz = Zufallszahl***

wird

- bei jedem Ändern eines Passworts neu erzeugt
- mitgehasht und im Klartext mitgespeichert
- beim Prüfen des Passworts auch mitgehasht

Wenn  $n$  Möglichkeiten für's Salz:

Rainbow Tables werden  
 **$n$  Mal so groß &  $n$  Mal so langsam!**

# Passwort “online” knacken

*Online = durch Anmelde-Versuche*

*“Brute force” = viele Passwörter durchprobieren*

*==> “Brute-Force-Bremsen” einbauen!!!*

- 1.) Wartezeit nach jedem Fehlversuch*
- 2.) Account-Sperre nach x Fehlversuchen*
- 3.) Fehlermeldung darf nicht zwischen “User falsch”  
und “Passwort falsch” unterscheiden*

*==> Quadriert die Anzahl der Versuche  
bei unbekanntem User!*

# Passwort “offline” knacken (1)

*Offline = gestohlene Passwort-Datei liegt vor*

Grundprinzip:

- Zu testende Passwort-Kandidaten hashen
- Prüfen, ob Hash in der Datei vorkommt

*“Passwort-Kandidaten”: “Alle” dauert viel zu lange!*

*==> Aus “Wörterbuch”!*

- Normale Wörter, umgedrehte Wörter,  
normale Wörter in Leetspeak, ...
- Häufig benutzte Passwörter,  
“tippfreundliche” Zeichenkombinationen, ...
- *Zuerst kurz, dann immer länger!*

# Passwort “offline” knacken (2)

## Beschleunigung:

Hashes nicht jedesmal frisch berechnen & prüfen,  
sondern Hashwerte der Passwort-Datei  
in fertigen, vorberechneten Tabellen  
mit Klartextpasswort & Hashwert suchen!

- 1.) Tabelle nur mit Wörterbuch-Passwörtern
- 2.) Tabelle aller möglichen Zeichenkombinationen  
... wäre bei direkter Speicherung viel zu groß!  
(viele TB oder PB)

# Passwort “offline” knacken (3)

“Rainbow Table” = *Spezielle Datenstruktur* dafür

(kleiner, effizient durchsuchbar)

Praktikabel für einfache Hash-Algorithmen (MD4/5)  
ohne Salz, kurze Passwörter (max. 10 Zeichen).

**Gegenmaßnahmen:**

==> **Salzen**

==> **Lange Passwörter** erzwingen

==> **Guten** (= aufwändigen) **Hash** verwenden

# Passwort setzen (1)

- ***Mindestlänge*** fordern!

Empfohlen: Min. 12 Zeichen, Obergrenze min. 64

- ***Großen Zeichensatz*** (Sonderzeichen) erlauben, Groß- und Kleinschreibung unterscheiden (!!!), Ziffern & Sonderzeichen fordern

Bei 12 Zeichen:

- Nur Kleinbuchstaben und Ziffern:  $36^{12} = 4,7 \cdot 10^{18}$
- Alle sichtbaren ASCII-Zeichen:  $95^{12} = 5,4 \cdot 10^{23}$

***==> Über 100000 Mal so viele Möglichkeiten!***



# Passwort setzen (2)

**Ziel:** Schutz gegen Wörterbuch-Attacken

**Daher:**

*Schon beim Eingeben*

***gegen Wörterbücher prüfen!***

*(Passwort-Wörterbücher, nicht normale)*

**Weiters:**

***Prüfung gegen Passwort = Userid usw.***

# Passwort setzen (3)

Pflicht zur regelmäßigen Passwort-Änderung ist  
eher konterproduktiv!

Hilft nur gegen heimlich geklaute  
Klartext-Passwörter!

==> Technisch: Für Knackbarkeit irrelevant!

==> Praktisch: Benutzer

- verwenden deshalb eher einfachere Passwörter
- notieren sich das Passwort eher
- ändern Teile des Passworts systematisch  
("Jan", "Feb", ... oder fortl. Nummer)

# Passwort setzen (4)

Größte Gefahr:

*Selbes Passwort  
für viele Dienste, Webseiten, ...*

Eine davon wird gehackt

*==> selber Benutzer  
auf allen anderen Systemen kompromittiert!  
... ohne dass es gleich auffällt / bekannt wird!*

Gegenmaßnahme:

*Dienstanweisung, Schulung, ...*

# Passwort setzen (5)

Mögliche Gegenmaßnahme für hochsichere Systeme:

*Nur* Passwörter von **Passwort-Generator** erlauben!

Müssen gut merkbar sein  
(werden sonst aufgeschrieben!)

z.B. Statt kurzem, zufälligen “Zeichensalat”:  
Lange Passphrasen aus “Silben” und Sonderzeichen!

Ev. mehrere Passwörter zur Wahl!

Achtung auf ausreichend Möglichkeiten &  
nach außen unbekannte Generator-Logik!

# Programmierung (1)

Im Systemlog protokollieren:

Alle Passwort-Änderungen

Alle erfolgreichen & fehlerhaften Anmeldungen

Ev. auch bei jedem Login anzeigen:

“*Letzte Anmeldung am ...*”

Passwort-Änderung:

Neues Passwort muss  
doppelt eingegeben werden  
(gegen Tippfehler)

# Programmierung (2)

## Systempasswörter:

*Es darf kein Betrieb ohne Passwort oder mit Default-Passwort möglich sein!*

*==> Regelbetrieb blockieren,  
bis Systempasswort geändert wurde!*

## Benutzer-Passwort:

Administrator-gesetztes Passwort

- muss bei jedem Benutzer anders sein
- muss sofort bei erster Anmeldung geändert werden

# Programmierung (3)

- Jede String-Variable, die ein Passwort enthielt, sofort mit gleichlangem String überschreiben (nicht auf Leerstring setzen, nicht einfach freigeben!)
- Variablen mit Klartext-Passwörtern in nicht-swapbaren Speicherbereich legen
- Programme mit Klartext-Passwörtern
  - dürfen nicht debug-bar sein
  - dürfen keine Core dumps schreiben

***100 % Schutz nicht möglich!***  
***(z.B. Ausführung in VM?!)***

# Mehr-Faktor-Authentifizierung

- Etwas, das man *hat*:  
Handy, *Chipkarte*, Key-Token, ...  
iTAN-Karte  
*biometrische* Eigenschaften
- Etwas, das man *weiß*:  
*Passwort* oder Passphrase  
Sicherheitsabfrage, ...
- Etwas, das sich jedesmal *ändert*:  
*Zeit*, *zufällige* Challenge



# Authentifizierung über's Netz (1)

***Niemals*** ein Klartext-Passwort  
über das Netz übertragen  
(wenn wirklich kritisch:  
auch nicht SSL-verschlüsselt!)

Und auch nie einen ***jedesmal gleichen*** Hash!

Weil: ***Replay-Attacken!***

(= ***Netz-Daten abfangen & damit nochmals anmelden***)

==> Hash schon am Client rechnen!

==> Selbe Message vom Client  
darf nicht zwei Mal gültig sein!

# Authentifizierung über's Netz (2)

1.) Listenbasierte One-Time-Passwörter:

z.B. TAN-Listen

2.) Hashbasierte One-Time-Passwörter:

***$i$ -ter Passcode =  
 $n-i$  Mal gehashter Geheimcode***

==> Aus dem  $i$ -ten Passcode  
ist der vorige berechenbar,  
aber nicht der nächste!

# Authentifizierung über's Netz (3)

## Der Server

- speichert den zuletzt verwendeten Passcode  
(uninteressant, 1 Mal mehr gehasht als das aktuelle)
- hasht den empfangenen Passcode ein Mal  
==> muss gleich dem gespeicherten Passcode sein!

## Der Client

- hasht das eingegebene Passwort  
in der richtigen Anzahl (?)
- oder hat eine geheime, vorberechnete Liste

# Authentifizierung über's Netz (4)

## 3.) Security Token (z.B. RSA SecurID)

**zeigt einzugebenden Passcode an**  
(oder überträgt ihn via USB, ...)

“Einweg-Fall”: Passcode wird berechnet aus:

- *Fix eingebranntem, geheimen, individuellen **Key***
- **Zeit** (==> jedesmal anderer Passcode!)
- Ev. eingetipptem Geheimcode

oder “Challenge-Response-Verfahren”

# Challenge-Response-Verfahren

- Server schickt **“Challenge”**  
(bei Tokens: Übertragung z.B. optisch, manuell, Funk, ...)  
z.B. Zufallszahl & Zeitstempel *gehasht*  
(==> jedesmal anders)
- Client oder Token berechnet den **“Response”**  
aus Challenge & Passwort und/oder Key  
(==> auch jedesmal anders,  
Passwort darf daraus nicht rückrechenbar sein!)
- Server kann an Hand des Response prüfen,
  - ob Passwort bzw. Key am Client stimmen
  - ob die Antwort zu genau dieser Challenge passt

# Zero Knowledge Protocol (1)

*“Beweise, dass Du einen Schlüssel besitzt,  
ohne den Schlüssel preiszugeben”*

- A besitzt geheimen Schlüssel
- B will prüfen, ob A diesen Schlüssel besitzt, darf aber den Schlüssel dabei nicht erfahren und auch nicht berechnen können
- A darf nicht vortäuschen können (durch “trickreiche” Antworten an B), dass er den Schlüssel kennt, obwohl er ihn gar nicht kennt

# Zero Knowledge Protocol (2)

## 1.) Vorbereitung:

- Große Zahl  $n$  als Produkt zweier Primzahlen berechnen und veröffentlichen (nur das  $n$ , nicht die Primzahlen)
- A wählt zufälligen privaten Schlüssel  $s$ , berechnet öffentlichen Schlüssel  $v$  aus  $n$  und  $s$ , veröffentlicht  $v$

## 2.) Prüfung (in mehreren Runden):

- A und B tauschen pro Runde 3 Zahlen aus, die sie in jeder Runde neu aus einer Zufallszahl berechnen
- B prüft mit einer Rechnung die ausgetauschten Zahlen gegen die öffentlichen  $n$  und  $v$

# Zero Knowledge Protocol (3)

Mit jeder erfolgreichen Prüfungsrunde  
verdoppelt sich die Sicherheit

mit der B annehmen kann,

dass A wirklich das  $s$  zu  $n$  und  $v$  besitzt,

ohne dass B (oder ein außenstehender Zuhörer)  
daraus dieses  $s$  berechnen könnte!



# Signatur (1)

## Der Sender / Ersteller

- Berechnet Hashwert der zu signierenden Daten
  - Verschlüsselt den Hash mit seinem Private Key
  - Verschickt Originaldaten  
plus Signatur (enthält verschlüsselten Hashwert)
- ==> Nur der Besitzer des Private Key kann signieren!

## Der Empfänger

- Entschlüsselt Hash in der Signatur mit Public Key
  - Berechnet Hash der Originaldaten & vergleicht
- ==> Jeder kann Signatur prüfen!

# Signatur (2)

Entschlüsselter Hash aus der Signatur und Hashwert der Daten sind nur gleich wenn:

- Daten und Signatur unverfälscht sind
- Der Public Key zum Private Key passt

Wieso signiert man den Hash statt der Daten selbst?

- Bei Daten: *Zu einer beliebigen Signatur wären “dazupassende” Daten berechenbar, ohne den Private Key zu kennen!*
- Rechenaufwand bei langen Daten

# Voraussetzungen Signatur (1)

Das System ist nur vertrauenswürdig, solange

- 1.) Niemand außer dem Absender  
**Zugang zum Private Key** hat
- 2.) Der **Zusammenhang zwischen  
Schlüsselpaar und Identität der Person**  
zuverlässig nachvollziehbar ist

# Voraussetzungen Signatur (2)

Zu 1.):

Z.B. “*Qualifizierte elektronische Signatur*”:

Private Key ist auf Chipcard gespeichert und  
*verlässt die Karte nie!*

==> Aktive Karte, kann rechnen

==> Hash der Daten wird zum Signieren auf die Karte  
geladen, Signatur wird auf der Karte berechnet

Die CA darf keine Kopie des Private Key haben!

# Voraussetzungen Signatur (3)

Zu 2.):

***PKI = “Public Key Infrastructure”***

System zur

- Sicherstellung der ***Vertrauenswürdigkeit*** von Public Keys
- ... und ihrer ***Zuordnung*** zu Personen, Firmen, Domains, ...
- sicheren *Identifizierung* von Personen, z.B. via Chipkarten

# PKI (1)

PKI's basieren auf Zertifikaten

Zertifikat =

- ***Public Key + Informationen*** dazu
- ausgestellt von einer Zertifizierungsstelle  
= ***CA "Certificate Authority"***
- ***signiert*** mit dem ***Key der CA***  
d.h. überprüfbar, manipulationssicher, ...

# PKI (2)

Informationen in einem Zertifikat,  
z.B. im genormten X.509-Format:

- **Public Key**
- **Person / Firma**, zu der dieser Key gehört
- Bei https-Keys: **Für welche Domains** zulässig?
- **Aussteller** des Zertifikats (= CA),  
**fortlaufende Nummer**
- **Gültigkeitsdatum** Anfang und Ende
- Versions- und Algorithmus-Information

# PKI (3)

Aber wie prüft man den Key der CA  
(um die Signatur des Zertifikats zu prüfen)???

Hierarchisches System:

*Übergeordnete CA* zertifiziert *Key der CA*

==> Für jedes Zertifikat muss gelten:

Lückenlose Kette von CA's und ihren Zertifikaten

bis zu einer **“Root CA”**

(Root CA hat *“self-signed-Zertifikat”*  
= signiert ihr Zertifikat selbst mit eigenem Key)



# PKI (4)

Weltweit gibt es ein paar hundert Root CA's

==> ***Explizite Liste***

von Root CA's und deren Zertifikaten  
fix im Betriebssystem / Browser gespeichert,  
gelten ohne weitere Prüfung als vertrauenswürdig

Beispiele Root-CA's:

- VeriSign (!?), DigiCert, D-Trust, ... (kosten!)
- *freie* "Community CA's", z.B. CAcert, "Let's Encrypt"  
(CAcert ist u.a. die CA hinter der freien Krypto-Initiative von c't)

# PKI (5)

## Überprüfung eines Zertifikates:

- **Signatur** des Zertifikates korrekt?  
==> Daten im Zertifikat unverfälscht
- Zertifikat **zeitlich gültig?**  
(im Zertifikat gespeichertes von...bis-Datum)
- Oft: **Richtiges** Zertifikat?  
(z.B. passt die Domain im Zertifikat zur Domain in der URL?)
- Zertifikat **widerrufen?** (OCSP, CRL)
- Zertifikat **vertrauenswürdig?**  
(Zertifizierungskette bis zu einer Root-CA ok?)

# Aufgaben einer CA

- CA (oder vorgeschaltete Registrierungsstelle) prüft Korrektheit der Zertifikats-Daten, Identität und Berechtigung des Antragstellers
- CA erzeugt Schlüsselpaar
- CA stellt Zertifikat für Public Key aus, übermittelt Private Key geheim an den Antragsteller
- CA führt Liste aller von ihr ausgestellten Zertifikate (Antragsteller, öffentl. Schlüssel, ...)
- CA verwaltet Sperrliste

# Sperren von Zertifikaten (1)

Wenn:

- Private Key geklaut
- Daten des Antragstellers stimmen nicht mehr
- Kriminelle Aktivitäten des Antragstellers

**==> Ungültig-Erklärung vor Ablauf der Gültigkeit**

- ***CRL = “Certificate Revocation List”:***  
Sperrliste, “Gegenteil” der Root-CA-Liste

Im Browser / OS gespeicherte Datei,  
wird regelmäßig automatisch aktualisiert (?)

- ***Online-Zertifikats-Prüfdienst, z.B. OCSP***

# Sperren von Zertifikaten (2)

Auch Sperre einer CA

= **Sperre aller von ihr ausgestellten Zertifikate**

z.B. weil

- CA stellt Zertifikate an Unberechtigte aus (z.B. Problem Google / Symantec), besonders Sub-CA-Zertifikate (zum Zertifizieren)
- Privater Schlüssel der CA wird kompromittiert
- Angreifer bricht in CA ein und stellt (heimlich?!) Schlüsselpaare & Zertifikate aus
- CA arbeitet unsicher (z.B. “verliert” Private Keys)

# Probleme CA-System (1)

Kette zu einer Root CA irgendwo unterbrochen  
(z.B. Vertrauen in eine CA verloren &  
CA-Zertifikat widerrufen, passiert z.B. bei Einbruch)

==> alle "darunterliegenden" CA's und Zertifikate  
werden **plötzlich ungültig!**

- Behebung für SSL-Zertifikate, ID-Karten, ...:  
Neue Zertifikate ausstellen

==> Hoher organisatorischer Aufwand, dauert!

- Behebung bei signierten Dokumenten: **Keine!!!**  
(weil Signatur nicht nachträglich änderbar ist!)

# Probleme CA-System (2)

Angriffspunkt lokale Root-CA-Liste:

Dort Fake-CA-Eintrag dazu

**==> “*Alles ist möglich*”**

- “Böse” SSL-Server werden als vertrauenswürdig & einer falschen Firma zugehörig angezeigt
- “Man-in-the-middle-Attacken” auf SSL möglich

(Erweiterung der Root-CA-Liste war bzw. ist üblich  
z.B. für Corporate Virens scanner, SW-Auto-Update,  
für lokale Self-Signed-Zertifikate, ... ==> **Don't!**)

# Probleme CA-System (3)

Beantragung von Zertifikaten kostet

***Zeit, Aufwand und (teilweise) Geld***

==> Viele Institutionen setzen intern selbsterzeugte **Self-Signed-Zertifikate** ein, wo Zertifikate technisch nötig sind, aber die Beantragung eingespart werden soll

***Don't!!!***

Erzieht Benutzer, "niedrige" Sicherheit bzw. "schwache" Zertifikate zu akzeptieren!



# Alternative zum CA-System (1)

*“Web of Trust”:*

Nicht-hierarchisches

**Netz gegenseitigen Vertrauens**

ohne zentrale Institutionen (CA's), z.B. für PGP

2 Beziehungen zwischen Teilnehmern:

- **X kennt Y** (persönlich)  
=> **X signiert Schlüssel von Y**
- **X vertraut Y**,  
dass Y nur Schlüssel von Leuten signiert,  
die er tatsächlich kennt

# Alternative zum CA-System (2)

X vertraut von Y signierten Schlüsseln

&

Y hat Schlüssel von Z als “bekannt” signiert

==>

X betrachtet Schlüssel von Z als gültig

Parameter zum “Finetuning”:

- **Weniger streng:**

Auch indirekt über mehrere “vertrauende” Personen hinweg

- **Strenger:**

Mehrere vertrauenswürdige Y müssen Z signiert haben

# Alternative zum CA-System (3)

Dazu notwendig: *Schlüsselsever*

Enthalten

- *Public Keys* der Teilnehmer
- Gegenseitig ausgestellte *Signaturen*

Werden zur Validierung von Public Keys abgefragt

Achtung: *Datenschutz-Problem!!!*

(Namen, Mail-Adressen, “kennt” und “vertraut” sind sensible personenbezogene Daten!)

# E-Mail-Verschlüsselung

Stand der Technik:

- **Keine** *“End-to-End-Verschlüsselung”*:  
Mail liegt auf allen Zwischen-Servern im Klartext!
- Verschlüsselung bestenfalls *“Host-To-Host”*:
  - Zwischen zwei Servern
  - Zwischen Server und Client

Nach “kleinsten gemeinsamen Nenner”-Prinzip:  
*“Verschlüsselungsunwilliger”* Server  
==> Übertragung im Klartext!

# E-Mail-Authentizität

*Mail-Header sind “Schall und Rauch”:*

Weder Verschlüsselung noch Prüfsumme möglich!

(nur der Mail Body könnte verschlüsselt werden)

- Header können schon vom Absender beliebig gefälscht werden
- Header können von jedem Zwischen-Server beliebig gefälscht werden

==> Absender, Datum, Empfänger, Mail-Weg, ...  
ist nicht nachvollziehbar (z.B. Spam)

# DKIM usw. (1)

Standardisierter grundlegender E-Mail-Schutz:

***SPF & DKIM & DMARC***

Verschlüsselung: nein

Signatur und Authentizität: Ja, aber ...

- Nicht ab Client, erst ab sendendem Server
- **Nicht personenbezogen**,  
sondern nur Domain-bezogen

Hauptziel **nicht** “Mail sicherer machen”,  
sondern “Spam vermeiden / erkennen / verwerfen”

## DKIM usw. (2)

***SPF = “Sender Policy Framework”***

Eintrag im DNS der Domain des Senders als **txt**-Record:

***“Welche Mailserver dürfen Mail mit einer “From”-Adresse aus dieser Domain versenden?”*** (Whitelist, nicht Blacklist)

==> Erkennbar,

- wenn eine Mail ein gefälschtes “From” hat
- wenn eine Mail von einem für den Absender “unzuständigen” Mailserver kommt

# DKIM usw. (3)

***DKIM = “Domain Keys Identified Mail”***

Der sendende Mailserver:

- ***Berechnet Hashes*** des Mail Bodies und ausgewählter Header-Zeilen, die sich beim Transport nicht ändern dürfen
- ***Signiert*** die Hashes mit dem private Key der Domain
- ***Codiert*** Hashes und Signatur Base64 als ASCII (weil Mail nicht 8-bit-transparent ist)
- Fügt das als ***neue Header-Zeile*** oben in die Mail ein:  
**“DKIM-Signature: ...”**



# DKIM usw. (4)

Technisch: *RSA + SHA-256*

*Der Public Key der Domain für DKIM  
steht als **txt**-Record  
im DNS der Absender-Domain*

- ==> Jeder Zwischen-Server einer Mail und  
der empfangende Server / Client können **prüfen***
- ob die Mail vom Server dieser Domain kommt*
  - und ob der Body und die wesentlichen Header  
(z.B. "From:", "Subject:", "Date:", "To:", "Reply-To:")  
unverfälscht sind*

# DKIM usw. (5)

***DMARC = “Domain-based Message Authentication, Reporting and Conformance”***

Noch ein **txt**-Record im DNS der Absende-Domain:

*“Ist SPF und/oder DKIM für Mails von dieser Domain Pflicht?”*

*“Wie ist auf fehlendes oder falsches SPF bzw. DKIM zu reagieren?”*

Möglichkeiten u.a.:

- Mail verwerfen?
- Fehlermeldung an den Postmaster senden?

# DKIM usw. (6)

- Noch ein paar offene konzeptionelle Fragen, z.B. bei der Umsetzung für Mailing Lists:

*Der sendende Server einer Mailing-List-Mail ist unabhängig und verschieden von der “From:”-Domain der Mail!*

- Die praktische Umsetzung hängt von Providern ab:
  - Bei SPF und DKIM relativ hoch (u.a. weil von Google usw. **für jede einlangende Mail gefordert!**)
  - Bei DMARC noch eher dürftig ...

# PGP (1)

*“Pretty Good Privacy”*

Standard: RFC4880

Implementierungen (frei):

- **OpenPGP**
- **GPG** = “Gnu Privacy Guard”

Primärer Einsatz:

*Mail-Verschlüsselung & -Authentizität*

Z.B. auch:

*Absicherung automatischer SW-Verteilung*

# PGP (2)

Kombination sym. & asym. Verfahren:

- Falls gewünscht: Fügt Signatur zur Nachricht (verschlüsselt mit dem Private Key des Senders)
- Verschlüsselt den Mail-Inhalt symmetrisch: Schlüssel wird jedesmal zufällig erzeugt
- Verschlüsselt den sym. Schlüssel asymmetrisch (verschlüsselt mit dem Public Key des Empfängers) mit Elgamal (weil lizenz- und patentfrei, ähnlich Diffie-Hellman-Verfahren)
- Base64-Kodierung für die Mail (==> nur sichtbare ASCII-Zeichen)

# PGP (3)

Probleme:

- Sicherheit des Schlüsselringes?
- Authentizität:  
Wer garantiert die Zuordnung  
zwischen Schlüsseln und Personen?

# De-Mail (1)

Technisch:

- Über's Internet, normales Mail-Format, SMTP / POP / IMAP oder HTTPS, SSL/TLS ist Pflicht!
- Kein Austausch mit "normaler" Mail
- Zwei-Faktor-Authentifizierung Pflicht (z.B. mTAN), aber qualifizierte Signatur (Chipkarte) nicht
- Zusätzliche Sende- und Empfangs-Nachweise (wie "Einschreiben"), vom Dienstanbieter signiert

Organisatorisch:

- Nur von zertifizierten Anbietern
- Durch Ausweisprüfung identifizierte Benutzerkonten

# De-Mail (2)

Sicherheit:

- Verpflichtend:  
*Host-to-Host-Transport-Verschlüsselung (SSL/TLS),  
zusätzlich Host-to-Host-Inhalts-Verschlüsselung*
- Aber: *Inhalt wird auf jedem Server entschlüsselt!*  
*End-to-End-Verschlüsselung ist nur optional  
(muss vom Sender / Empfänger mit eigener SW  
erfolgen, z.B. PGP), aber zentraler Key-Server*
- *Hashwert für Integrität, optional: Signatur  
(beides am ersten / letzten Server, nicht am Client!)*



# De-Mail (3)

Viele Datenschutz-Aspekte offen:

- ***Vorratsdatenspeicherung*** des De-Mail-Verkehrs?
- Gesetzlich sehr großzügig geregelter Zugriff auf die ***Personendaten*** zu einer Mail-Adresse und auf das ***De-Mail-Passwort!***

***==> Alles andere als “vertraulich” oder “geheim”!***

***==> Finger weg?!***

# Bitcoin (1)

... besteht aus bzw. ist der Name von ...

- Einer ***Blockchain*** zum Speichern von Transaktionen zwischen Wallets
- Einem ***Peer-to-Peer-Netzwerk*** von Knoten, die Daten austauschen über
  - einzelne Transaktionen
  - die Blöcke der Blockchain
- ***Regeln*** (und einem Client, der sie implementiert):

***Wie wird die Blockchain  
um neue Transaktionen erweitert?***

# Bitcoin (2)

... basiert an zwei Stellen auf **Kryptographie**:

- Erzeugung und Unverfälschbarkeit der Blockchain:

**Hashing** mit **SHA-256**

- Absicherung der Wallets,  
Sicherstellung des Zugriffs nur durch den Besitzer:

**Signatur** mit 256 bit **ECDSA**

(= Public-Key-Verfahren mit elliptischen Kurven)

# Blockchain (1)

*Blockchain =*

*Manipulationssichere Liste von Blöcken*

Jeder Block enthält:

- Kryptographischen *Hash des vorigen Blockes*
- *Zeitstempel*
- *Beliebige Nutzdaten*

==> Sehr *viele Anwendungsmöglichkeiten!*  
(nicht nur Krypto-Währungen)

# Blockchain (2)

- Jede nachträgliche Modifikation des Inhalts eines Blockes oder der Block-Reihenfolge ist erkennbar (weil der Hash im nächsten Block nicht mehr stimmt!)
- Verwendung für alles, was fälschungssicher protokolliert werden muss
- Es wird nur hinten angehängt, alles davor muss unverändert erhalten bleiben:  
=> **Blockchain wird immer größer**  
(z.B. Bitcoin derzeit >> 100GB)

# Blockchain (3)

Bei Bitcoin:

- Nutzdaten = *Transaktionsdaten*  
(viele Bitcoin-Transaktionen pro Block)
- Nur die Transaktionen in der Blockchain sind  
“bestätigt / gültig / unwiderruflich”!  
(wegen Kollisionsbehandlung: Erst nachdem  
eine gewisse Anzahl von Blöcken dahinter erzeugt ist)
- Jeder Block enthält zusätzlich ein paar Bits,  
die durch “Mining” bestimmt werden

# Blockchain (4)

==> Bis jetzt wäre alles einfach!

Bei Krypto-Währungen usw.:

- Blockchain ist **dezentral** gespeichert:  
Keine Hierarchie, keine Zentralstelle

==> Viele gleichberechtigte lokale Kopien,  
über die ganze Welt verteilt!

==> Nicht nur “brave” Knoten!

- Kommunikation dazwischen ist nicht synchron:  
*Langsam, verzögert, unsicher, unzuverlässig, ...*

# Blockchain (5)

## *“Konsensproblem”*

==> Wer darf anhängen?

==> Welcher neue Block wird von allen  
als nächster gültiger Block akzeptiert?

==> “Einigkeit im Netz suchen”

- Weil asynchrones Netz, “bad guys”: **Schwierig!!!**  
(Problem: Mehrere verschiedene, konkurrierende neue Blöcke  
an verschiedenen Orten, die voneinander zu spät erfahren!)
- Viele Verfahren denkbar!  
(z.B. iterative verteilte Mehrheits-Abstimmungen)



# “Proof of work” (1)

“Proof-of-Work”-Konzept (z.B. Bitcoin):

***Der erste, der eine Rechenaufgabe richtig löst,  
darf anhängen***

Problem Kollisionsbehandlung:

***Was ist, wenn mehrere  
fast gleichzeitig “gewinnen”?***

Regeln legen fest, wer überlebt & wer verworfen wird

==> Längerer Zeitraum, in dem eine Transaktion  
wieder aus der Blockchain rausfliegen kann!

# “Proof of work” (2)

“Rechenaufgabe”: *Hash-Kollisions-Problem*

**Gegeben:**

- Große Teile des Datenblocks: Transaktionsdaten
- Kriterien für den Hashwert: *Vorne x viele 0-Bits*

**Gesucht:**

*“Richtige” Ergänzung des Datenblocks,*  
sodass der Hashwert die Kriterien erfüllt

*Geht nur durch **Ausprobieren!***

*(sehr viele Versuche, im Schnitt ein paar Trillionen!)*

# “Proof of work” (3)

**Warum** Rechenzeit für Mining opfern?

Für jede erfolgreiche Lösung bekommt der “Gewinner”:

- Eine **Belohnung**: Fixer Betrag Bitcoins, derzeit 12,5
- **Transaktionsgebühren**  
der damit bestätigten Transaktionen (weniger)

*Mining-Belohnungen sind der einzigste Weg,  
durch den Bitcoins neu entstehen!*

# “Proof of work” (4)

Derzeit: Rund alle 10 Minuten weltweit eine Lösung.

- Mining **zu langsam**:

Folge: Rückstau von offenen Transaktionen!

==> Belohnung (Transaktionsgebühren) erhöhen,  
bewirkt Steigerung der Rechenleistung

==> Kriterium erleichtern

- Mining **zu schnell** (z.B. schnellere Hardware):

==> Belohnung senken

==> Kriterium verschärfen (mehr Versuche nötig)

# “Proof of work” (5)

## ***Kollisionsbehandlung***

(wenn unabhängig voneinander  
zwei neue Blöcke parallel angehängt werden):

***Warten!***

... bis an einem der beiden Ende  
ein weiterer Block dazukommt!

***Dann: Längste Kette gewinnt!***

==> “Verlierender” Block wird ungültig erklärt!  
(dessen Transaktionen wandern zurück  
in den Pool unbestätigter Transaktionen!)

# “Proof of work” (5)

## Gefahr:

*Wer deutlich mehr Rechenleistung kontrolliert als alle anderen zusammen, kann das System sabotieren!*

## Wie?

- An einem alten Block ansetzen
  - Neue Nebenkette berechnen,  
die schneller wächst als die Hauptkette
- ==> Letzte gültige Blocks der Hauptkette werden *nachträglich wieder ungültig!*

# Vor dem Mining eines Blocks

- ***Prüfung*** der einzelnen Transaktionen, u.a. auf Besitz der transferierten Bitcoins
- Peer-to-Peer-Broadcast “neuer” Transaktionen  
***==> Verteilter Pool offener Transaktionen***
- Jeder Miner für sich: ***Auswahl*** offener, aber noch nicht in der Blockchain bestätigter ***Transaktionen für den nächsten neuen Block***  
(nach Transaktions-Gebühr, Wartezeit, Lust, ...)
- Eigene “Belohnungs-Transaktion” dazu!

# Transaktionen

- ... transferieren Bitcoins von einem Wallet zu einem anderen
- ... werden mit dem ***Private Key des abgebenden Wallets signiert***  
=> Nur der Besitzer des Wallets (des Keys) kann abgehende Transaktionen erzeugen!  
Aber jeder kann sie mit dem Public Key prüfen!  
(Wallet vorhanden, genug Bitcoins drin, ...)  
=> *Hack-Überfälle auf Bitcoins*  
waren meistens Diebstahl der privaten Schlüssel!



# TPM (1)

***TPM = “Trusted Platform Module”***

Auf den ersten Blick: Ähnlich Smartcard usw.

- ***Generiert und speichert Schlüsselpaare (weltweit eindeutige!), prüft Schlüssel***
- ***Verschlüsselt und entschlüsselt “on Chip”***  
(Schlüssel braucht TPM nicht verlassen)
- Berechnet sichere ***Zufallszahlen*** und ***Hashes***
- ***Signiert***

RSA, ECC, AES, SHA1, SHA256, HMAC, ...

# TPM (2)

Auf den zweiten Blick:

***“Trusted System”***  
***“Tampering Protection”***

- Berechnet, speichert und verifiziert  
***Prüfsummen von Software & Hardware***

Offiziell: Zur Software-Sicherheit

***Lückenlos abgesicherte Boot-Kette***  
***von HW & BIOS bis zur Anwendung***

==> PC bootet nur in “sicherem” (?) Zustand

# TPM (3)

**Weniger:**

Der Benutzer kann seinem System vertrauen

**Vor allem:**

Dritte (Rechte-Inhaber)

können dem System vertrauen

**==> TPM schützt die Software vor dem Benutzer?!**

Dazu:

- TPM verwaltet **weltweit eindeutige ID's & Keys**  
(pro Gerät und pro User)

# TPM (4)

- ==> **“Zugesperrte” PC’s**,  
lückenlose Kontrolle der Software  
wie bei Smartphones, Spielkonsolen, ...  
(“Schutz” vor Knack-Software)
- ==> **“Hardware-gesicherte” Lizenz- & DRM-Prüfung**
- ==> individuelle, fixe **Bindung**  
von Lizenzen & DRM-Inhalten  
an ein bestimmtes Gerät
- ==> Bindung an bestimmte Software-Anbieter  
(nur Anbieter, die SW gültig signieren können)

# Von wem?

TPM ist hersteller-unabhängiger Standard  
verwaltet von der

***TCG = “Trusted Computing Group”***

= Viele Hersteller von HW & SW  
(Intel, Microsoft, ...)

+ alle großen PC-Hersteller  
(HP, Dell, Lenovo, Acer, Asus, ...)

# Hardware

***TPM = Eigener Prozessor + RAM + ROM + EEPROM***

(zumindest in Version 1.x, nicht zwingend bei 2.x)

angebunden z.B. über LPC- oder SPI-Bus

als steckbares Modul

(oder im Chipset integriert)

==> TPM ist kein Busmaster,

kann das System nicht von sich aus ansprechen

==> TPM wird nur aktiv,

wenn es von der Haupt-CPU abgefragt

bzw. angestoßen wird!

# Software (1)

***CRTM = “Core Root of Trust for Management”***

Kurz: *“Trusted Root”* oder *“Authenticated Root”*

In BIOS oder eigenem Chip realisiert,  
muss *von sich aus sicher & vertrauenswürdig* sein

Vor dem eigentlichen Booten, vor dem TPM:

- Initialisiert TPM
- Schickt Prüfsummen von HW & BIOS an das TPM
- Fragt Passworteingabe, Smartcard o.ä. ab und schickt sie an das TPM

# Software (2)

***TSS = “Trusted Software Stack”  
oder “TCG Software Stack”***

In Betriebssystem, Libraries usw.:

***Treiber, Dienste und  
Software-Schnittstellen (API's)  
für den Zugriff von Anwendungen  
auf das TPM***

Noch kaum vollständige Implementierungen!



# Status (1)

Große Diskussion vor 10-15 Jahren

**==> TPM wurde *größtenteils skeptisch aufgenommen bzw. abgelehnt***

- Wegen Angst vor DRM und SW-Monopolisierung
- Wegen Politik der TCG:
  - Geheime Arbeit, geheime Dokumente
  - Hohe Kosten für Mitgliedsbeiträge, Lizenzen und Zertifizierungen (nur für Große)

Seitdem ist es sehr still um TPM geworden

(Open-Source-TPM-Code ruht de facto seit 2006)

# Status (2)

Nach “Abkühlung” der Diskussion

- **2014** Standardisierung von **TPM 2.0**  
(ganz heimlich, still & leise)
- Erstmals Implementierung direkt im Prozessor  
(ein bisschen HW, vor allem **Firmware**): **“fTPM”**
- Seit Windows 11 Pflicht

# Angriffe

Auf die TPM-Hardware:

Wenige, nur spezifisch für bestimmte Module:

- ***Seitenkanal-Attacken***  
(meist über Stromverbrauch)
- Ein Hersteller erzeugte  
***knackbare RSA-Schlüsselpaare***

==> HW gilt als relativ sicher und ausgereift

SW ist Stückwerk in zweifelhaftem Zustand

# Der EK (1)

***EK = “Endorsement Key”***

Hart eingebrannt, *nicht* auslesbar

Codiert *Echtheit des TPM & Hersteller des TPM &*  
***weltweit eindeutige ID***

= Basis zur Prüfung der *TPM-Vertrauenswürdigkeit*

Endorsement-Zertifikat zum EK + Plattform-Zertifikat

+ Conformance-Zertifikat + Validation-Zertifikate

(alle Zertifikats-Schlüssel im TPM hinterlegt)

= “*gesamtes System (HW + SW) entspricht der TCG-Spezifikation*”

= Basis für *alle weiteren Keys*

## Der EK (2)

Prüfung der EK-basierten Vertrauenswürdigkeit eines Systems mit TPM erfolgt

nicht durch den Dienste-, Lizenz- bzw. DRM-Inhaber

(er darf nur “seinen” AIK erfahren, aber nicht die mit dem EK verbundene eindeutige Identität!)

sondern

- indirekt über unabhängige CA's
- oder mittels Zero-Knowledge-Protokoll

***Netz-Verbindung erforderlich!***

# Der EK (3)

## Problem:

- TPM-Hersteller lässt sich aus dem TPM ermitteln
- ***TPM-Hersteller kennt den privaten EK***

==> Der TPM-Hersteller könnte

- ... das System tracken
- ... Keys im TPM knacken / Keys fälschen
- ... den EK an Agencies usw.. weitergeben

Daher TPM-Feature ***“Neuen EK erzeugen”***

**Problem:** Neuer EK ist nicht vertrauenswürdig,  
nicht zertifiziert ==> weitgehend nutzlos!

# Der SRK

***SRK = “Storage Root Key”***

= *“Wurzel” des gesamten Schlüssel-Baumes*

wird bei Erstbenutzung des TPM generiert aus

***EK + Passwort des Users*** (oder Bio-Daten, ...)

einmalig, Neu-Generierung oder User-Wechsel

ist nicht möglich

# Die PCR's (1)

***PCR = "Platform Configuration Register"***

(mehrere, mindestens 24)

= im TPM sicher berechnete und gespeicherte

***Hashwerte*** über

- ***Hardware*** (z.B. Platten-Seriennummern)
- ***Firmware*** (BIOS, MBR, ...)
- ***Betriebssystem***
- ***Software & Konfig-Dateien***

kann *in AIK-Berechnung mit einbezogen* werden



## Die PCR's (2)

Jedes PCR ist nach dem Booten leer & wird ein- oder mehrmals um Hashes erweitert

In die jede Hash-Berechnung eines PCR's geht sein voriger Wert mit ein

=> Nachträglich nicht fälschbare Kette von Hash-Werten

***Jeder Schritt vom Boot-Prozess bis zum Anwendungsstart verlängert die PCR-Ketten um die Prüfsummen des als nächstes zu startenden Schrittes***

# Die AIK's (1)

*AIK = “Attestation Identity Key”*

Im TPM erzeugte und permanent gespeicherte Keys zum SW-Schutz, für Lizenz- und DRM-Zwecke, ...

*Für jeden Dienste-, Lizenz- oder DRM-Anbieter wird ein neuer AIK erstellt*

==> Jeder Anbieter “sieht” einen anderen Key

Grund: ***Schutz der Anonymität***

Eigene, unabhängige Identitäten für jeden Anbieter sollen Anbieter-übergreifendes Tracking und Rückschluss auf den konkreten PC vermeiden.

# Die AIK's (2)

Erstellung von AIK's, z.B. bei Lizenz-Erwerb:

Mittels Challenge-Response-Protokoll aus

- **Challenge** & Daten des Anbieters  
(z.B. *individueller Lizenz-Key*)
- **EK**  
=> Bindung an ein *bestimmtes Gerät* / TPM
- **Signierte Hashes von PCR's** nach Wahl  
=> Bindung an *bestimmten HW- & SW-Zustand*,  
Erkennung von HW- und SW-Änderungen

# Die AIK's (3)

Prüfung von AIK's bei jedem Start der SW, ...:

Ebenfalls mit Challenge-Response-Protokoll,  
u.a. mit Vergleich mit aktuellen PCR-Werten

==> Für eine AIK-Prüfung müssen Netzverbindung  
und Server des Anbieters verfügbar sein

Bei jeder AIK-Erstellung und AIK-Prüfung:

Validierung der Vertrauenswürdigkeit des TPM  
(Prüfung von EK-Zertifikat usw. durch CA)

# Steganographie (1)

Wörtlich:

*“Verdeckt schreiben”*  
(oder *“geheim schreiben”*)

De facto:

*Verstecken von Daten in anderen Daten*  
(zum Speichern oder zum Transport),  
*ohne dass es auffällt*

(= Tarnung, nicht Verschlüsselung)

# Steganographie (2)

Die “*offensichtlichen*” Daten

- sind *unverschlüsselt*
- sehen *harmlos & unverdächtig* aus
- stehen in *keinem inhaltlichen Zusammenhang* zu den eigentlichen “Nutzdaten”
- lassen *nicht auf den ersten Blick erkennen*, dass darin andere Daten versteckt wurden
- sind aber im Normalfall *unauffällig verfälscht* (meist nur *bei Kenntnis des Originals* feststellbar)

# Steganographie heute (1)

Die “offensichtlichen” Daten sind im Normalfall

***Bilddateien*** (Fotos) oder ***Tondateien***

Eine Veränderung der  
1 oder 2 hintersten (niederwertigsten) Bits  
in Farb- oder Tondaten fällt kaum auf

==> Pro Farbwert oder Ton-Sample  
können ***1-2 Bits “Nutzdaten”***  
“verpackt” werden!

# Steganographie heute (2)

In der Praxis:

*“Nutzdaten” trotzdem  
vor dem Verpacken verschlüsseln!*

- Verschlüsselung liefert  
*zufällige, unauffällige, gleichverteilte Bits*  
==> Manipulation der Trägerdaten  
*fällt weniger auf*
- Nutzdaten bleiben geschützt,  
auch wenn Steganographie entdeckt wird



# Steganographie früher (1)

Statt Nutzdaten nachträglich  
in vorgegebene Originaldaten  
zu “verpacken”:

Nachträglich extra  
rund um vorgegebene Nutzdaten  
eine unauffällige  
“Verpackung” konstruieren!

# Steganographie früher (2)

In der Praxis:

*“Harmlose” Texte rund um  
vorgegebene Wörter  
oder Buchstaben erfinden.*

Beispiele für einfache Codes:

- Der 2. Buchstabe jedes Wortes zählt
- Tabelle mit mehreren möglichen Wörtern  
für jeden Buchstaben

*Auch wesentlich komplizierter!*

# Sonderfall MIC

## “Machine Identification Code”

Z.B. bei Laserdruckern in sensiblen Organisationen:

*Laser druckt außer dem gewünschten Ausdruck z.B. einzelne “verirrte” Pixel an ganz bestimmten Stellen (bei Farblasern meist gelb, fällt am wenigsten auf) oder “verliert” einzelne Pixel an Buchstabenkanten*

Lage dieser Pixel codiert

- **Druckernummer** &
  - **Datum+Uhrzeit** des Ausdrucks
- ==> Ausdruck rückverfolgbar!

# Sonderfall Wasserzeichen

## Zweck:

*Kodiert unauffällig **Copyright / Besitzer**  
oder **eindeutige Kopien-Nummer**  
in Video-, Bild- oder Tondateien*

## Anforderung:

- Wenig Daten
- Aber hohe Robustheit gegen
  - Umcodierung, Kompression, Ausschnitte, ...
  - Wiedergabe und Re-Digitalisierung