

# Sicherheit von Betriebssystemen – VO 03: Sicherheitskonzepte von macOS – Einführung

Rafael Vrecar

Research Group for Industrial Software (INSO)

<https://www.inso-world.com>



**RISE**  
Research Industrial Systems Engineering



**FACHHOCHSCHULE  
WIENER NEUSTADT**  
University of Applied Sciences - Austria





# Agenda

- Vorbemerkungen
- Allgemeines über macOS
- Secure Enclave (Prozessor)
- Apple File System (APFS)
- FileVault
- Keychain & Find My
- Private Relay
- Intelligent Tracking Prevention
- Weitere Sicherheitsmaßnahmen
- Zusammenfassung, Abschlussbemerkungen, Literatur

# Vorbemerkungen

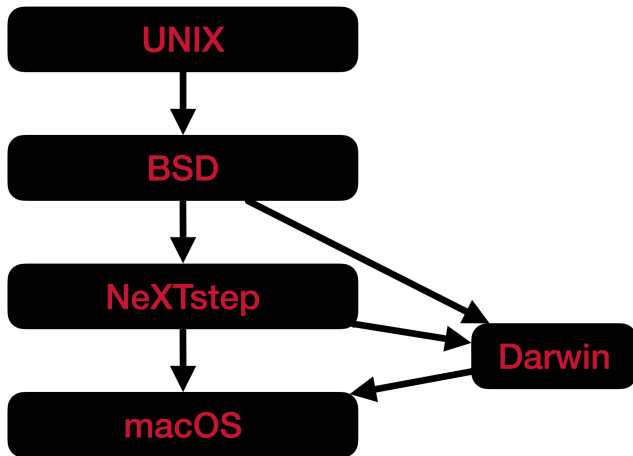
- Apples Software ist im Allgemeinen (Darwin ausgenommen) „Closed Source“
- ⇒ bzgl. Informationen *abhängig* von ...
  - Apple
  - Researcher:innen, die „Reverse Engineering“ betreiben
- ⇒ Vorlesungseinheit basiert stark auf ...  
(Details im Literaturverzeichnis)
  - Apples Dokumentation
  - Papers von Researcher:innen
- einige der vorgestellten Konzepte werden auch von anderen Betriebssystemen/Plattformen verwendet

# Update-Zyklus & Architektur von macOS

- jährlicher Versionssprung („große“ Features, Designänderungen)
- Point-Releases im Verlauf des Jahres (Security, kleinere Features)
- **Support:** Geräte erhalten  $\approx 7$  Jahre aktuelle Version  
+  $\approx 3$  Jahre Sicherheitsupdates für letzte unterstützte Version (Dies sind Erfahrungswerte. Offizielle Supportzeiträume gibt es von Apple nicht.)
- größtenteils „Closed Source“, nur auf Apple Geräten unterstützt  
(aber: „Hackintosh“ Community)
- Hybrid Kernel (GNU/Linux: monolithisch, Windows: hybrid seit NT)
- geschrieben in (u.a.): C, C++, Assembler, Objective-C, Swift
- aktuelle Version (Herbst 2025): macOS 26 – Tahoe

# BSD als Basis von macOS

- „UNIX-basiert“, BSD-Basis  $\Rightarrow$  nicht(!) GNU/Linux



# Secure Enclave (Prozessor): Definition & unterstützte Geräte

**Abkürzungen:** SE ...Secure Enclave, SEP ...Secure Enclave Processor

- „Enclave“  $\hat{=}$  isolierter Bereich, vom Hauptprozessor abgegrenzt
- seit A7 auf Apples Chips enthalten (iPhone 5S, 2013)

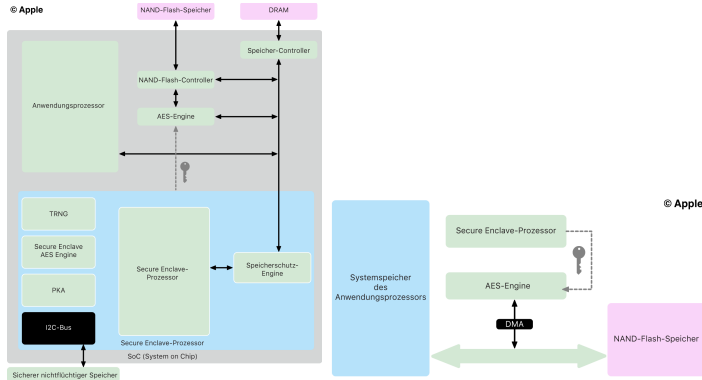


- seit MacBook Pro 2016 mit Touch ID als T1 dediziert zusätzlich zu Intel Prozessor, Upgrade (T2) erstmals bei iMac Pro 2017



- in Apple Silicon Macs ebenfalls direkt am Chip (M1 und folgend, seit Herbst 2020)

# Secure Enclave (Prozessor): Aufbau (bei Apple Prozessoren)



(Vergleiche <https://support.apple.com/de-at/guide/security/sec59b0b31ff/web>)

# Secure Enclave (Prozessor): Abgrenzung & Speicherschutz

- SEP wird ausschließlich(!) von SE benutzt
- Ziel der Abgrenzung: Verhinderung von **Side-Channel-Attacken**
- niedrige Taktrate soll **Clock- & Power-Attacken** verhindern
- Speicher der SE vom Anwendungsprozessor isoliert (Speicherschutz-Engine)
  - beim Start wird zufälliger Schlüssel generiert
  - Daten, die SE schreibt, werden *verschlüsselt* und ein Message Authentication Code (MAC), genannt „Tag“, zur Sicherung der *Authentizität* (vgl. Vorlesungen 2 & 3) generiert
  - wenn SE Daten entschlüsseln will, wird MAC geprüft
  - MAC gültig ⇒ Daten werden entschlüsselt

# Secure Enclave (Prozessor): Weitere Bestandteile

- **TRNG** (True Random Number Generator):  
generiert Zufallszahlen, bspw. für die Erstellung eines Schlüssels
- **PKA** (Public Key Accelerator):  
dedizierter Hardware-Block für Operationen der *asymmetrischen* Verschlüsselung
- **AES-Engine**: für Operationen der *symmetrischen* Verschlüsselung zuständig
- **Sicherer nicht flüchtiger Speicher**:  
nur(!) SE kann auf diese Komponente zugreifen, beinhaltet „Entropie“, die zur Generierung von Schlüsseln etc. verwendet wird.

# Secure Enclave (Prozessor): Aufgaben

- wie aus den Komponenten ersichtlich wird, zuständig für Verschlüsselung und Schutz von Benutzer:innen-Daten...
- ...insbesondere auch für FileVault
- Biometrie-Informationen (Touch ID auf Macs & i(Pad)OS-Geräten bzw. Face ID auf i(Pad)OS-Geräten) werden ebenfalls mithilfe der SE verschlüsselt aufbewahrt
- durch Abgrenzung vom Hauptprozessor haben Programme von Dritten keinen direkten Zugriff auf Daten der Secure Enclave und operieren auch nicht auf deren Speicher

# Apple File System (APFS)

- Standard File System seit macOS 10.13 (2017)
- optimiert für Flash-Speicher
- **Aufbau:** („Container“  $\hat{=}$  „Partition“, kann mehrere „Volumes“ beinhalten):

```
-- Container 1
-- Container 2
  |---- Volume 1
  |---- Volume 2
  |---- ...
  |---- Volume n
...
-- Container n
```

- Speicherort  $\hat{=}$  „NAND-Flash-Speicher“ auf Folie 7

# Aufbau des File Systems bei einer Standard-Installation (1/2)

- macOS 10.15 (2019): „*read-only*“ **System Volume** d.h. isoliertes Volume, das im Betrieb nicht modifiziert werden kann.
- seit macOS 11 (2020): System Volume dadurch geschützt, dass es signiert wird (kurz **SSV** – Signed System Volume)
  - Kernel überprüft zur Laufzeit, ob Inhalte unverändert
  - falls Integrität gewährleistet
    - ⇒ Code darf ausgeführt werden, sonst nicht
- System Volume enthält „nativ“ installierte Programme

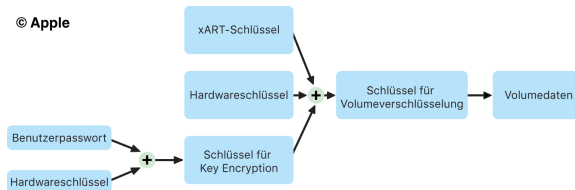
# Aufbau des File Systems bei einer Standard-Installation (2/2)

- **Data Volume** enthält User:innen-Daten, insbesondere auch von dem:der User:in installierte Programme, durch FileVault geschützt!
- **Preboot Volume** enthält Boot-Informationen
- **VM Volume** = Swap File Storage
- **Recovery Volume** enthält recoveryOS, inkl. Festplattendienst- & Terminalprogramm

# FileVault: Definition & Funktionsweise

- = Apples Festplatten-Vollverschlüsselung; verwendet AES-XTS
- operiert auf Volume-Ebene
- SE kümmert sich um Schlüsselverwaltung  
(bei Macs mit T2 & Intel oder Apple Prozessor)

- Funktionsweise:



(Vergleiche

<https://support.apple.com/de-at/guide/security/sec4c6dc1b6e/1/web/1>)

# FileVault deaktiviert ... Was nun?

- Festplatte auch verschlüsselt, wenn FileVault deaktiviert (T2 oder neuer)...
  - ...allerdings nur auf Hardware-UID basierend
  - ...sobald aktiviert, wird durch **Anti-Replay-Mechanismus** verhindert, dass alter Schlüssel verwendet werden kann
  - **Funktionsweise:** siehe vorherige Grafik, allerdings ohne „Schlüssel für Key Encryption“ und dessen Eltern-Knoten
- erleichtert auch das sichere Löschen der Festplatte
  - Schlüssel werden „weggeworfen“
  - Angreifer:in hat daher nur verschlüsselte Daten, die nicht sinnvoll gelesen werden können

# FileVault: unterstützte Geräte & Unterschiede

- vorhergehende Version verschlüsselte nur Home-Verzeichnis
- seit OS X Lion (10.7) in Version 2 (aktuelle Version) verfügbar (Festplatten-Vollverschlüsselung)
- Unterschiede zwischen Macs:
  - Macs ohne SEP oder mit T1 (+ Intel jeweils): Festplatte nicht verschlüsselt wenn FileVault deaktiviert; Schlüsselverwaltung (bei Macs ohne SEP) gänzlich durch Intel-Prozessor
  - Macs mit 1) T2 + Intel oder 2) Apple Chip: Festplatte mit Hardware-UID verschlüsselt wenn FileVault deaktiviert; Schlüsselverwaltung nur(!) durch SEP

# Keychain & Find My

- **Keychain:**

- Passwortmanager mit 2FA-Token-Speicher ab macOS 12
- verwaltet z.B. Zertifikate, Schlüssel, gespeicherte WLANs
- Passwörter etc. können über Apple ID mit anderen (Apple) Geräten synchronisiert werden

- **Find My:**

- sofern Gerät verloren, kann es über Apple ID remote gelöscht werden
- funktioniert auch wenn offline (dann über Bluetooth, indem zu nahegelegenen Apple Geräten kommuniziert wird)

# „Private Relay“ in Safari (iCloud+ ⇒ kostenpflichtig)

- **Idee:** keine Partei (Apple, Website-Provider, ... ) weiß *gleichzeitig* wer man ist & was man sich ansieht
- IP-Adresse ist für Netzanbieter *sichtbar* & für 1. Relay (Apple)
- angefragte Website ist für Netzanbieter & Apple *nicht(!) sichtbar*
- 2. Relay (Drittanbieter) generiert *temporäre IP-Adresse*, kennt aber *IP-Adresse von User:in nicht*, dafür kann es *Anfrage entschlüsseln*; ...danach selber Weg zurück ...
- Aspekte von VPN oder Tor, Unterschied u.a.: hält sich an Geo-Blocking, unterstützt (vorerst) nur Safari ⇒ Zielpublikum: Endnutzer:innen; keine Vorteile (außer, dass de facto keine Konfiguration notwendig ist) gegenüber VPN(-Angeboten) oder Tor.

# „Intelligent Tracking Prevention“ in Safari

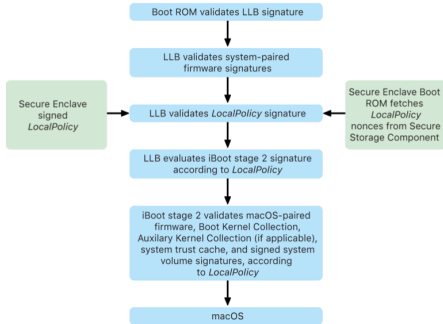
- soll „**Profiling**“ von Dienstleistenden im Internet verhindern
- „on-device Machine Learning“ soll Tracking Technologien blockieren
- Safari legt für User:innen sogenannten „**Privacy Report**“ an, wo blockierte Tracking-Versuche gelistet werden
- soll ebenfalls gegen „**Fingerprinting**“ helfen, indem nur ein *vereinfachtes Profil* mit Dienstleistenden geteilt wird
- Safari keineswegs einziger Browser, der Privacy Maßnahmen setzt; **Beispiel:** Firefox

(<https://support.mozilla.org/en-US/kb/enhanced-tracking-protection-firefox-desktop>) U.A.

# XD, ASLR, SIP

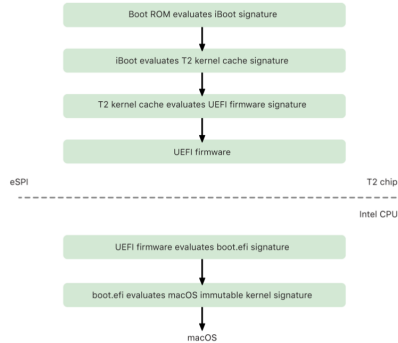
- **XD** (eXecute Disable): einzelne Bereiche im Speicher werden vom Betriebssystem als „nicht ausführbar markiert“, Prozessor verweigert die Ausführung von etwaigem Code, der in diesen Bereichen liegt
- **ASLR** (Address Space Layout Randomization): soll vor **memory corruption bugs** schützen, Programm-Blöcke werden nach Zufallsprinzip im Speicher abgelegt ⇒ deutlich unwahrscheinlicher, dass Schadcode an nachfolgender Adresse abgelegt werden kann.
- **SIP** (System Integrity Protection):
  - Mechanismus um spezifische Speicherorte *read-only* zu machen, d.h. während der Ausführung des Betriebssystems können dort befindliche Dateien nur gelesen werden
  - seit OS X 10.11 standardmäßig aktiviert, kann deaktiviert werden

# Secure Boot



Boot process steps when a Mac with Apple silicon is started.

© Apple



macOS T2 secure boot chain.

© Apple

(Vergleiche [https://manuals.info.apple.com/MANUALS/1000/MA1902/en\\_US/apple-platform-security-guide.pdf](https://manuals.info.apple.com/MANUALS/1000/MA1902/en_US/apple-platform-security-guide.pdf), p. 31 & 46)

# Malware & Downgrade erkennen, Systemressourcen-Zugriff

- eingebaute Signatur-basierte Malware Erkennungssoftware („**XProtect**“)
- eingebauter Schutz vor **Downgrade** Angriffen: Zurücksetzen auf ältere Versionen (mit u.U. bekannten Schwachstellen) nicht gestattet
- **Zugriff auf Systemressourcen** (CPU, Speicher, Festplatte, Software, gespeicherte Daten) wird vom Betriebssystem überwacht

# Programme installieren, Berechtigungen & Sandboxing

- **Installation von Programmen:**

- Mac App Store ⇒ App-Review!

(allerdings nicht alle Anwendungen über App Store beziehbar)

- „**Gatekeeper**“: aus dem Internet geladene Applikationen werden auf *Authentizität* geprüft

(Code Signatur mit Developer Certificates)

- **Berechtigungssystem:** einzelne Ressourcen müssen manuell von Nutzer:inne:n freigegeben werden (bspw. Zugriff auf Kamera oder Mikrofon muss jeweils gesondert erlaubt werden)

- **Sandboxing** schützt Daten vor nicht autorisiertem Zugriff durch Anwendungen

# Ältere macOS Versionen nutzen ... gute Idee?

- keine offiziellen Support-Zeiträume  $\Rightarrow$  nur Erfahrungswerte
- Support kann abrupt, i.A. ohne Ankündigung, enden
- **Heuristik:** Vorgängerversion sollte i.d.R. sicher zu benutzen sein, Version  $n - 2$  evtl. schon nicht mehr, aktuelle Version scheint in Apples Update-Policy logischerweise Priorität zu haben
- $\Rightarrow$  **Empfehlung:** 1) aktuellste Version nutzen, sofern keine anwendungsspezifischen Einwände (bspw. endete durch macOS 10.15 Support für 32bit-Anwendungen) & 2) Berichte über Beta-Versionen im Auge behalten, evtl. sinnvoll zwecks Stabilität (wie bei anderen Betriebssystemen auch) erst nach 1. Point-Release upzugraden

# Zusammenfassung

- macOS basiert auf BSD (Unix) und hat jährliche Versions sprünge
- Secure Enclave (Prozessor) ist zuständig für Festplattenverschlüsselung (FileVault) und Biometrie Verwaltung
- Passwort-Management, Ortung von eigenen verlorenen Geräten & Schutzmaßnahmen bzgl. Tracking sind direkt ins Betriebssystem integriert
- Code Signatur hilft beim Schutz vor Malware und Downgrade ist nicht erlaubt
- Sandboxing und ein systemweites Berechtigungssystem sollen vor nicht autorisierten Zugriffen auf Daten & Ressourcen schützen

# Abschlussbemerkungen

- macOS hat viele Sicherheitsvorkehrungen, nutzen Sie diese!
- Bleiben Sie kritisch und bedenken Sie, dass Apples Sicherheitsmaßnahmen keinesfalls vor Fehlern gefeit sind. ;)
- Behalten Sie im Hinterkopf, dass Apples Code (größtenteils) nicht offen ist und daher mehr Vertrauen erfordert, da Sie ihn nicht (einfach) überprüfen bzw. selbst kompilieren können.
- Updates installieren ist (i.A.) natürlich (auch bei Apple) eine gute Idee.
- ...und zuletzt: **Don't be evil!** – Apple hat ein Security Bounty Programm (<https://developer.apple.com/security-bounty/>)

# Literaturverzeichnis 1/6

- Apple Inc. [Kernel Architecture Overview](https://developer.apple.com/library/archive/documentation/Darwin/Conceptual/KernelProgramming/Architecture/Architecture.html), a.  
`https://developer.apple.com/library/archive/documentation/Darwin/Conceptual/KernelProgramming/Architecture/Architecture.html`
- Apple Inc. [Find out which macOS your Mac is using](https://support.apple.com/en-us/HT201260), i.  
`https://support.apple.com/en-us/HT201260`
- Apple Inc. [Apple Events](https://podcasts.apple.com/us/podcast/apple-events-video/id275834665/), m.  
`https://podcasts.apple.com/us/podcast/apple-events-video/id275834665/`
- The Linux Kernel Archives. <https://www.kernel.org/>

# Literaturverzeichnis 2/6

- Microsoft. [Windows Kernel-Mode Kernel Library](#).

`https://docs.microsoft.com/en-us/windows-hardware/drivers/kernel/windows-kernel-mode-kernel-library`

- Apple Inc. [Secure Enclave, k](#).

`https://support.apple.com/de-at/guide/security/sec59b0b31ff/web`

- Apple Inc. [Apple File System \(APFS\), l](#).

`https://support.apple.com/de-at/guide/disk-utility/dsku19ed921c/mac`

- Apple Inc. [Volumeverschlüsselung mit FileVault in macOS, c](#).

`https://support.apple.com/de-at/guide/security/sec4c6dc1b6e/1/web/1`

# Literaturverzeichnis 3/6

- Apple Inc. [Daten auf deinem Mac mit FileVault schützen](https://support.apple.com/en-us/HT204837), o.  
<https://support.apple.com/en-us/HT204837>
- Omar Choudary, Felix Grobert, und Joachim Metz. [Infiltrate the vault: Security analysis and decryption of lion full disk encryption](https://eprint.iacr.org/2012/374.pdf).  
*Cryptology ePrint Archive*, 2012.  
<https://eprint.iacr.org/2012/374.pdf>
- Apple Inc. [Find My Mac](https://support.apple.com/en-us/HT204756), h.  
<https://support.apple.com/en-us/HT204756>
- Apple Inc. [Get ready for iCloud Private Relay](https://developer.apple.com/videos/play/wwdc2021/10096), 2021.  
<https://developer.apple.com/videos/play/wwdc2021/10096>

# Literaturverzeichnis 4/6

- Apple Inc. [Privacy.That's Apple.](https://www.apple.com/privacy/), q.  
<https://www.apple.com/privacy/>
- Mozilla. [Enhanced Tracking Protection in Firefox for desktop.](https://support.mozilla.org/en-US/kb/enhanced-tracking-protection-firefox-desktop)  
<https://support.mozilla.org/en-US/kb/enhanced-tracking-protection-firefox-desktop>
- Apple Inc. [Systemsicherheit – Übersicht](https://support.apple.com/de-at/guide/security/sec114e4db04/1/web/1), f.  
<https://support.apple.com/de-at/guide/security/sec114e4db04/1/web/1>
- Apple Inc. [Sicherheit bei Apps – Übersicht](https://support.apple.com/de-at/guide/security/sec35dd877d0/1/web/1), g.  
<https://support.apple.com/de-at/guide/security/sec35dd877d0/1/web/1>

# Literaturverzeichnis 5/6

- Apple Inc. [Sicherheit der Apple-Plattformen, Mai 2024.](#)  
<https://support.apple.com/de-at/guide/security/welcome/web>
- Apple Inc. [Security. Built right in., p.](#)  
<https://www.apple.com/macos/security/>
- Apple Inc. [Hardwaresicherheit – Überblick, d.](#)  
<https://support.apple.com/de-at/guide/security/secf020d1074/1/web/1>
- Apple Inc. [Verschlüsselung & Datensicherheit – Überblick, b.](#)  
<https://support.apple.com/de-at/guide/security/sece3bee0835/1/web/1>

# Literaturverzeichnis 6/6

- Apple Inc. [iCloud data security overview](https://support.apple.com/en-us/HT202303), j.  
<https://support.apple.com/en-us/HT202303>
- Apple Inc. [Apple Support](https://support.apple.com/), n.  
<https://support.apple.com/>
- Apple Inc. [Apple Platform Security \(May 2021\)](https://manuals.info.apple.com/MANUALS/1000/MA1902/en_US/apple-platform-security-guide.pdf), e.  
[https://manuals.info.apple.com/MANUALS/1000/MA1902/en\\_US/apple-platform-security-guide.pdf](https://manuals.info.apple.com/MANUALS/1000/MA1902/en_US/apple-platform-security-guide.pdf)
- Joshua Long. [n-1 and n-2: Should we really trust in you? An examination of macOS security updates, 2021](https://objectivebythesea.com/v4/talks/OBTS_v4_jLong.pdf).  
[https://objectivebythesea.com/v4/talks/OBTS\\_v4\\_jLong.pdf](https://objectivebythesea.com/v4/talks/OBTS_v4_jLong.pdf)

**Vielen Dank!**

`https://establishing-security.at/`