

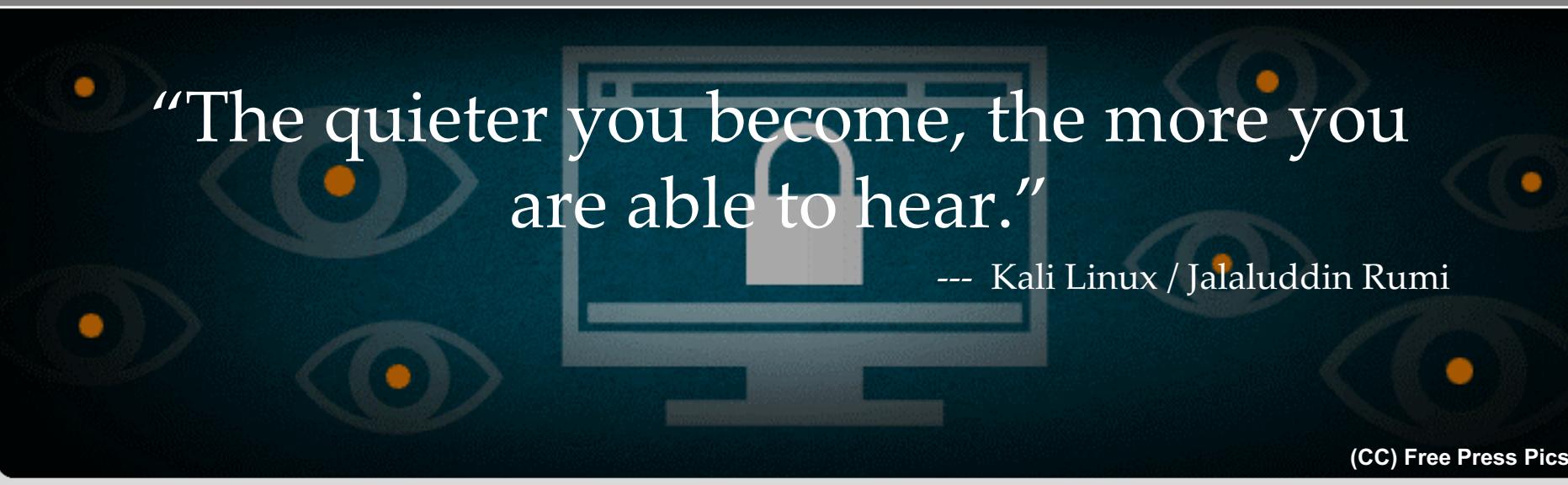
WPA2 Handshake and Half-Handshake Attacks

KA-IT-SI / 21. September 2017

Benny Görzig (bgoerzig@gmail.com), Florian Loch (me@fdlo.ch)

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IOSB und LKA BW

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IOSB und dem LKA BW



“The quieter you become, the more you are able to hear.”

--- Kali Linux / Jalaluddin Rumi

(CC) Free Press Pics

Über uns



Florian Loch (@FlorianDLoch)

- Web-Sicherheit und Software-Engineering
- Leidenschaftlicher Node.js- & Kotlin-Entwickler



Benny Görzig

- Kryptographie und Datenbanken
- Java-Enthusiast

Beide:

- Bachelor Angewandte Informatik an der DHBW Karlsruhe (mit SAP SE)
- Master Informatik am KIT (in progress)
- Werkstudenten bei SAP Research in Karlsruhe

Agenda

1. Einleitung
2. WPA2-Cracking
3. Handshakes mitschneiden
4. Fazit & Ausblick

1. Einleitung

2. WPA2-Cracking
3. Handshakes mitschneiden
4. Fazit & Ausblick

1. Motivation
2. Zugangsschutz
3. Nutzerverhalten

Motivation

- Drahtlose Funknetzwerke heute wohl verbreitetste Art der Netzwerkanbindung
- Übertragung sensibler Informationen
- Physikalische sehr exponiert, (passiver) Angreifer muss lediglich in Reichweite sein
- Entsprechender Schutz der Verbindung auf OSI-Schicht 2 obligatorisch
 - Vertraulichkeit
 - Integrität
 - (Authentizität)

Motivation

- Sicherheit (gemäß genannter Ziele) abhängig von:
 - Aufbau des kryptografischen Verfahrens
 - Komplexität und Länge des geheimen Schlüssels
 - Fehlerfreiheit der technischen Umsetzung/Implementierung (Heartbleed etc.)



Verfahren für den Zugangsschutz

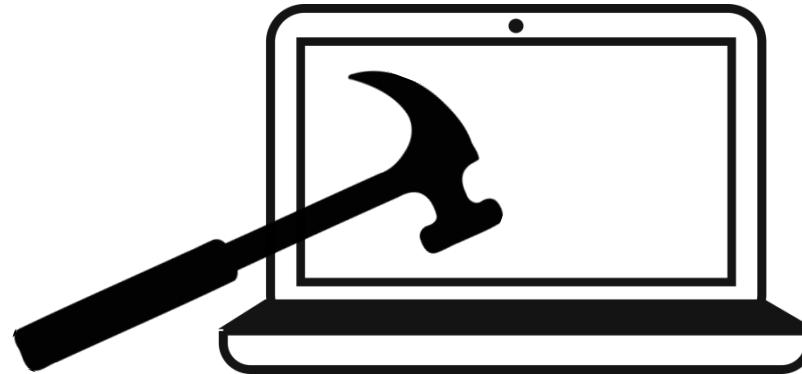
- Ziel: Absichern der drahtlosen Kommunikation auf Schicht 2
- Historie:
 - WEP (Wired Equivalent Privacy) Veraltet und sehr unsicher
 - WPA (Wi-fi Protected Access)
 - “Übergangslösung” bis zur vollständigen Standardisierung von IEEE 802.11i (a.k.a. WPA2)
 - Einsatz schwacher, heute als gebrochen eingestufter Kryptoverfahren wie TKIP auf Basis von RC4
 - WPA2 (Wi-fi Protected Access 2)
 - Verdrängt seit 2004 seine unsicheren Vorgänger

Zugangsschutz: WPA2

- Vollständige Umsetzung von IEEE 802.11i (RSN)
- Unterstützt zwei Authentifizierungsmodi
 - WPA2-PSK: „Personal“ mit Pre-Shared-Key
 - WPA2-EAP: „Enterprise“ mit 802.1X (EAP over IEEE 802)
- Aushandlung individueller Sitzungsschlüssel (PTK) in 4-Wege-Handshake
- Fokus heute: WPA2-PSK
 - De facto Standard für Heimnetzwerke & kleine Firmennetze

WPA2-PSK: Angriffe möglich?

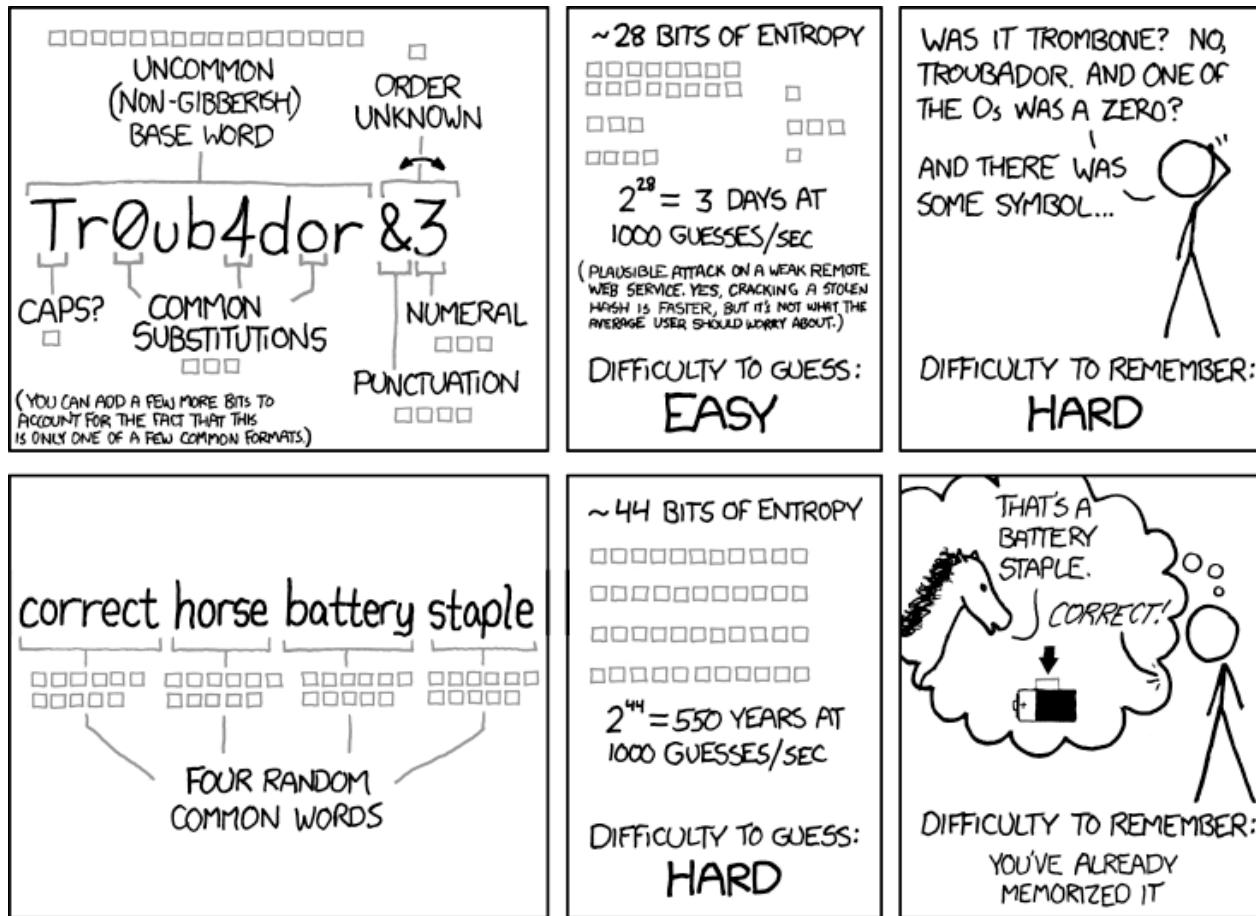
- Angriffe auf Protokollebene (theoretisch) existent, jedoch ...
 - ... starke Vorannahmen
 - ... oftmals nicht praktikabel
- Rückgriff auf Bruteforce-Angriff, um PSK zu ermitteln



WPA2-PSK: Bruteforce in Praxis realistisch?

- Beständigkeit von WPA2 gegenüber Bruteforce-Angriffen hängt maßgeblich vom verwendeten PSK ab
 - “*Most users will take the road of least resistance.*” [4]
 - Länge Ø 6 Zeichen (min. 8 für PSK bei WPA2)
 - 80% alphabetisch, nur 13.7% alphanumerisch
 - Menschen tendieren dazu, kurze, in Wörterbüchern gelistete Begriffe (oder Kombination daraus) zu verwenden
 - Standardpasswörter sterben nicht aus
 - ISPs und Hardware-Hersteller setzen teils erschreckend schlechte Standardpasswörter

WPA2-PSK: Angriffe in Praxis realistisch?



THROUGH 20 YEARS OF EFFORT, WE'VE SUCCESSFULLY TRAINED EVERYONE TO USE PASSWORDS THAT ARE HARD FOR HUMANS TO REMEMBER, BUT EASY FOR COMPUTERS TO GUESS.

Quelle: <https://xkcd.com/936/>

1. Einleitung
2. WPA2-Cracking
3. Handshakes mitschneiden
4. Fazit & Ausblick

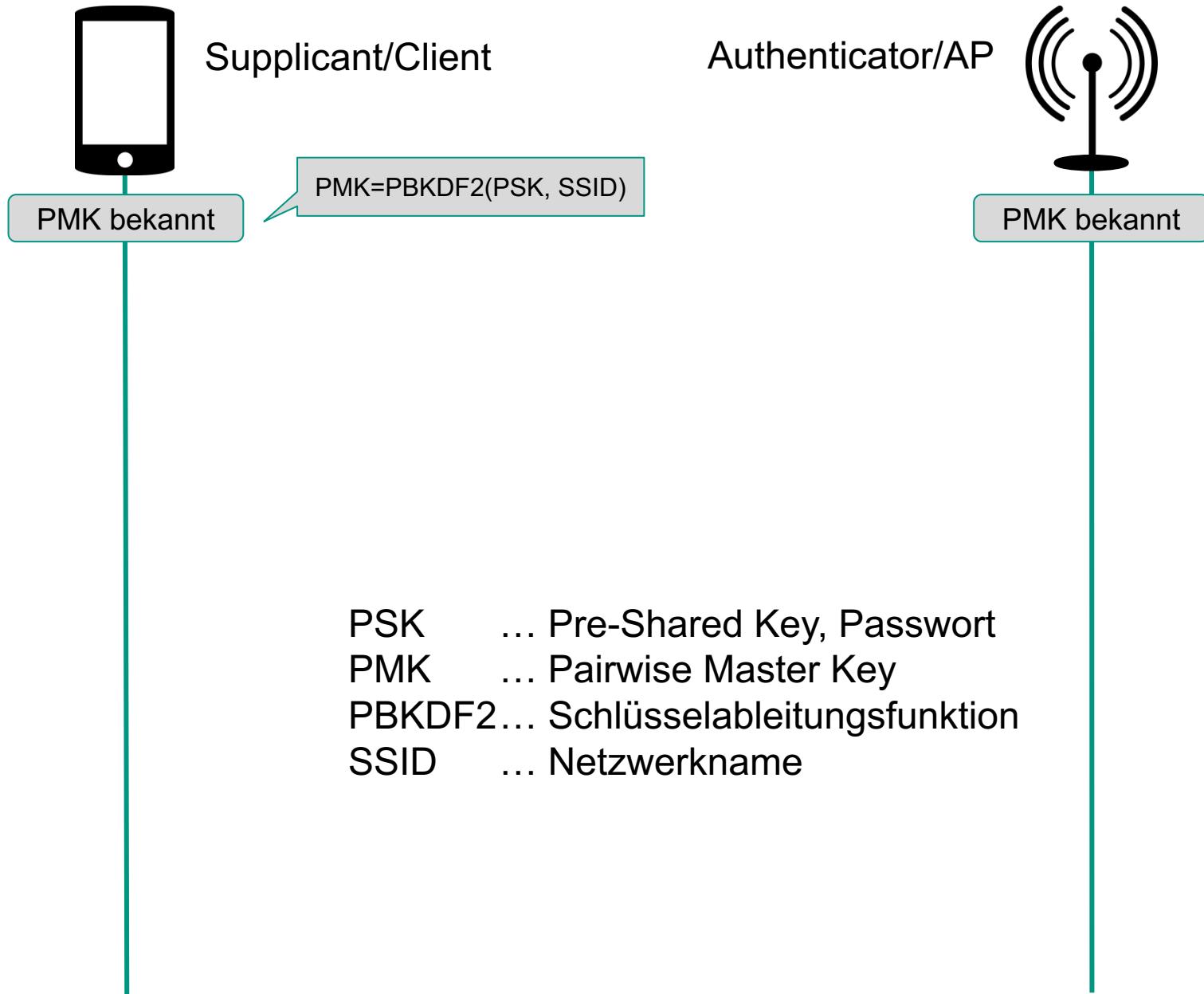
- Der WPA2-Handshake
- Online-Cracking
- Offline-Cracking

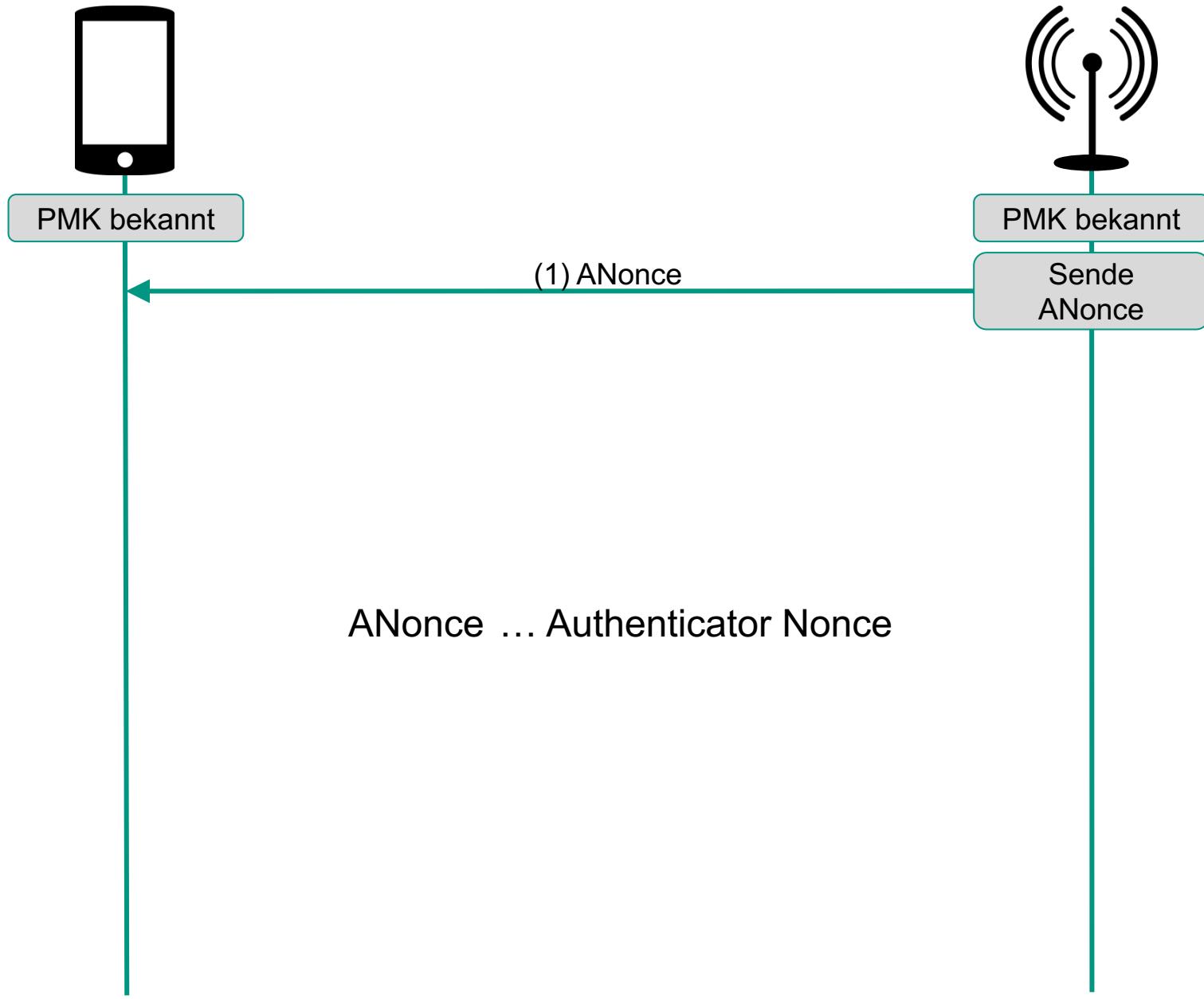
Cracking: Viele Wege führen nach Rom...

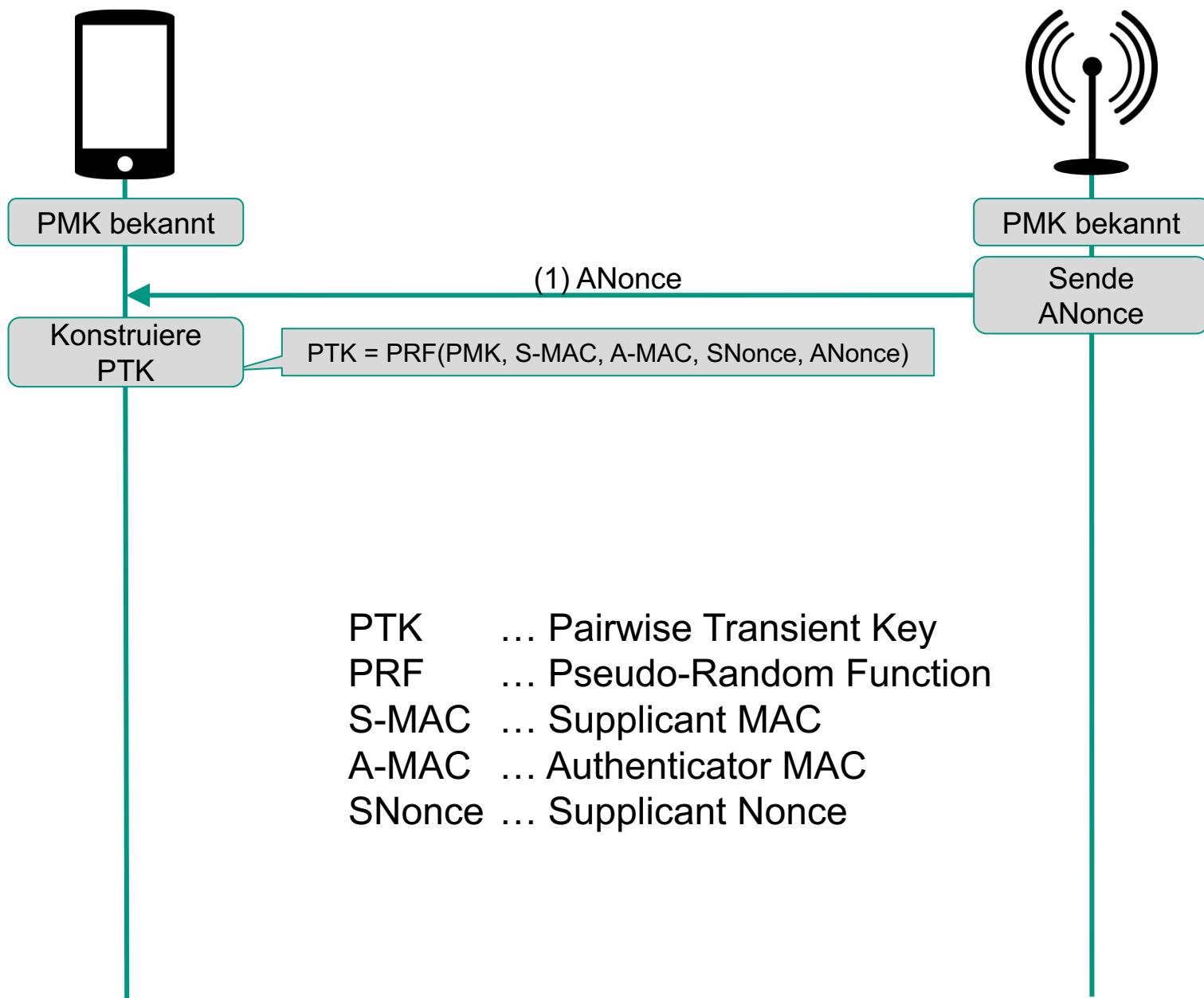
- Zwei generelle Ansätze für Bruteforce-Angriffe:
 - Online
 - Offline
- Für Bruteforce-Angriffe auf WPA2-PSK gilt immer:
 - Passwortkandidaten finden, mit dem Authentifikation beim Access Point möglich ist (Kollision)

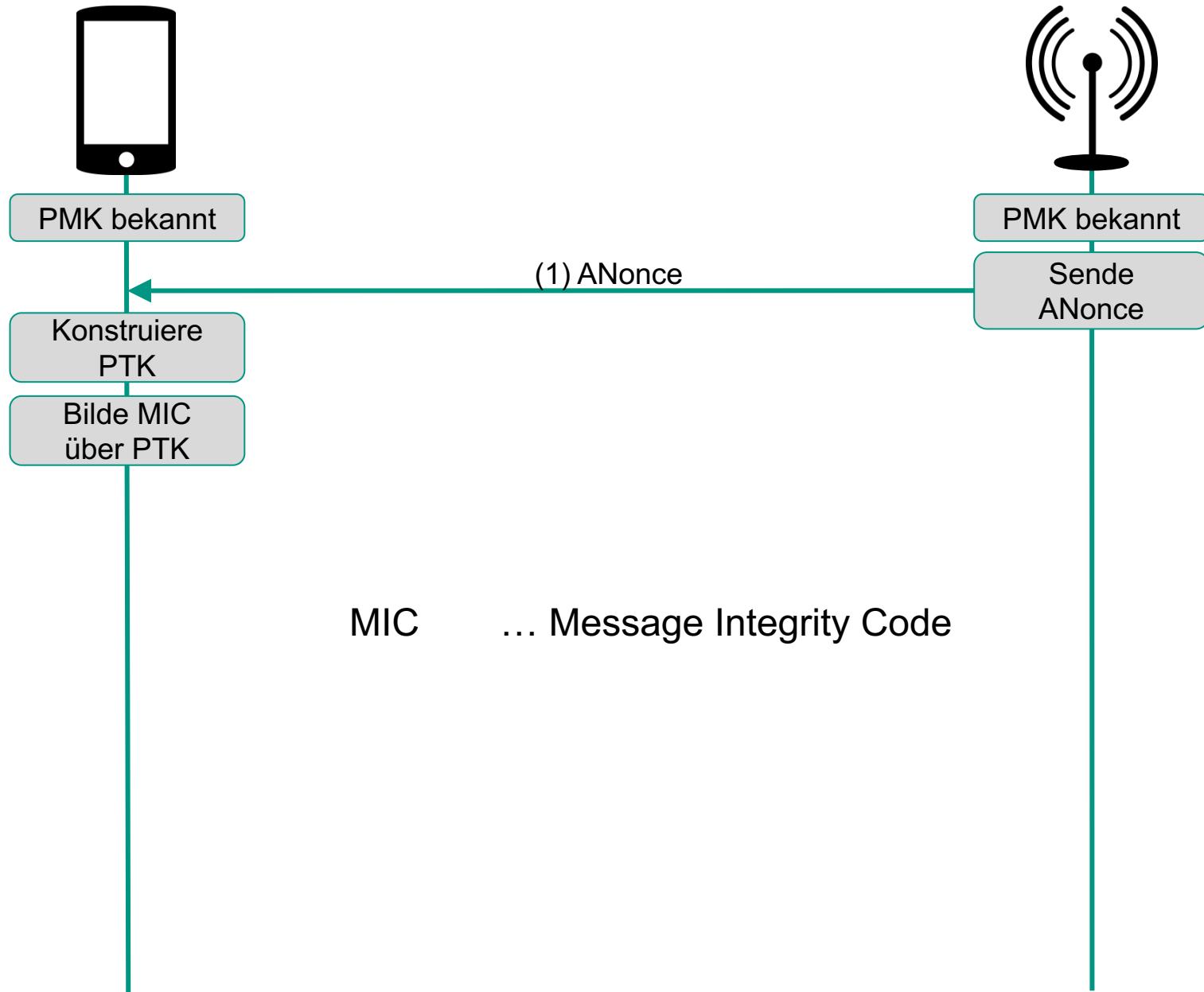
Cracking: Online

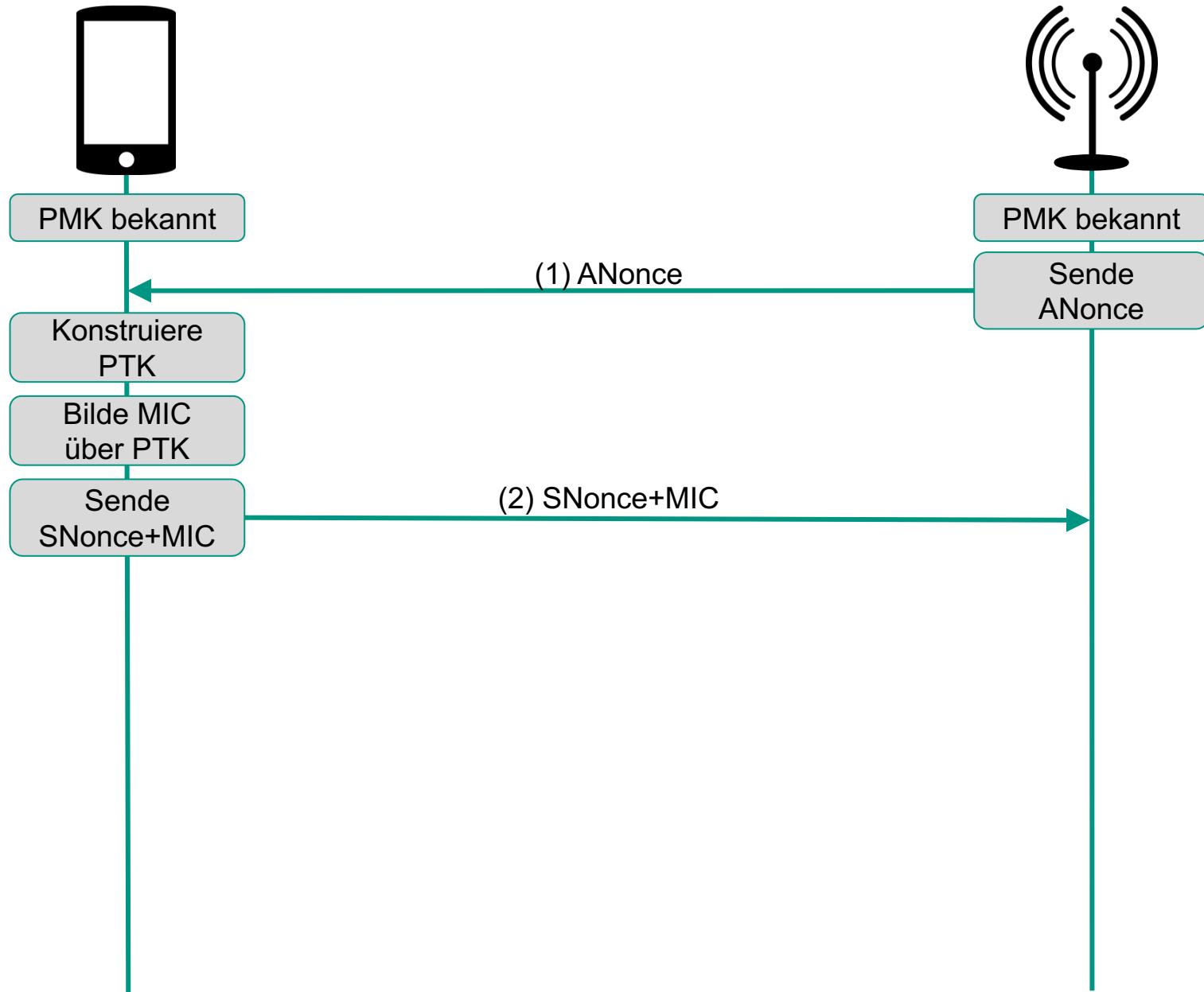
- Annahme: Angreifer in Reichweite von AP
- Angreifer „räbt“ das Passwort, gibt sich als Client aus
- Durchführen des Handshakes...
 - ... bis inklusive Schritt 3
 - Wenn MIC von AP akzeptiert und bestätigt → Passwort korrekt
- Nachteile:
 - Mehrere Bottlenecks (AP & Medium) auf die Angreifer keinen Einfluss hat
 - Angriff leicht zu detektieren und bspw. durch Wartezeiten einfach zu verhindern

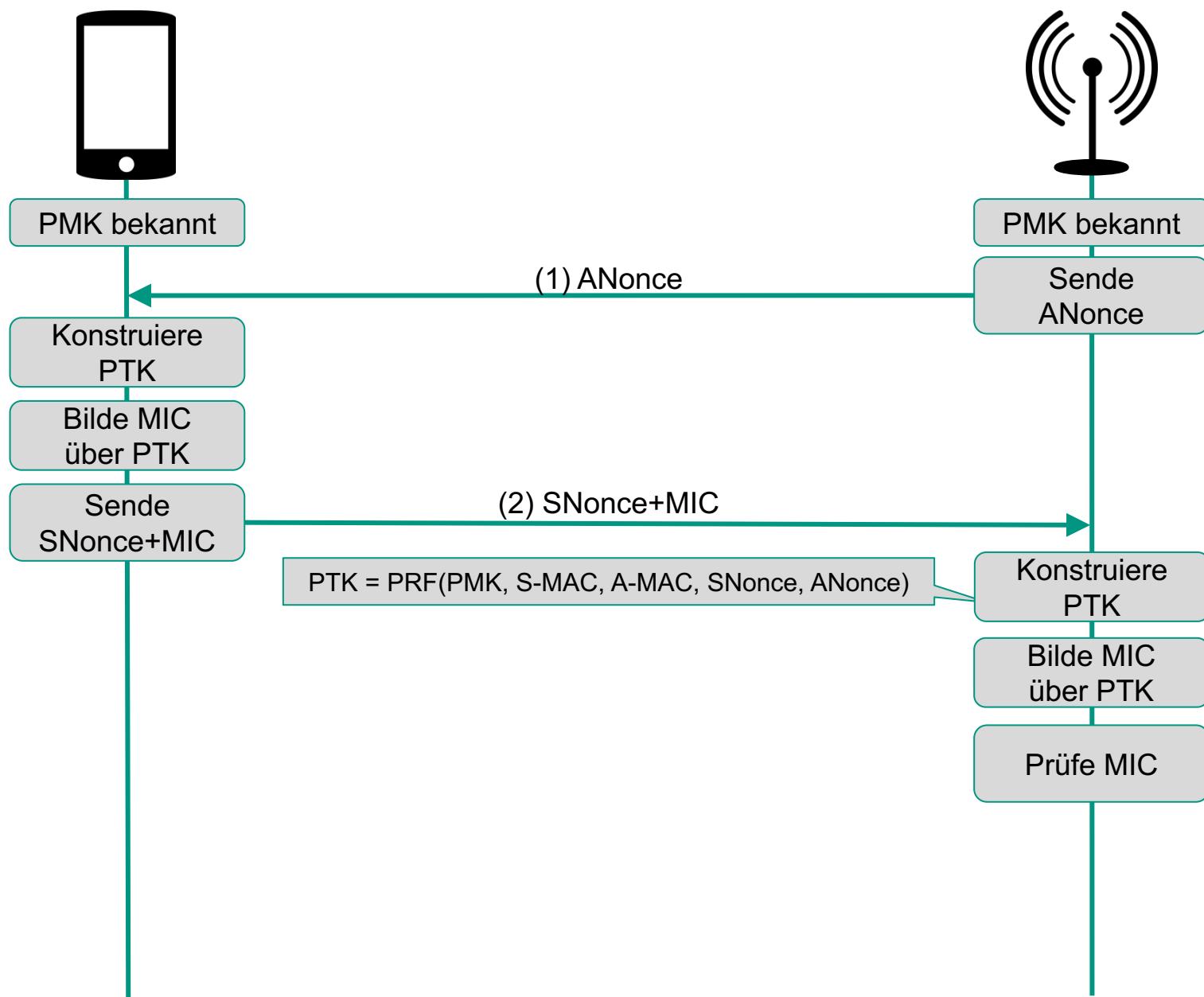


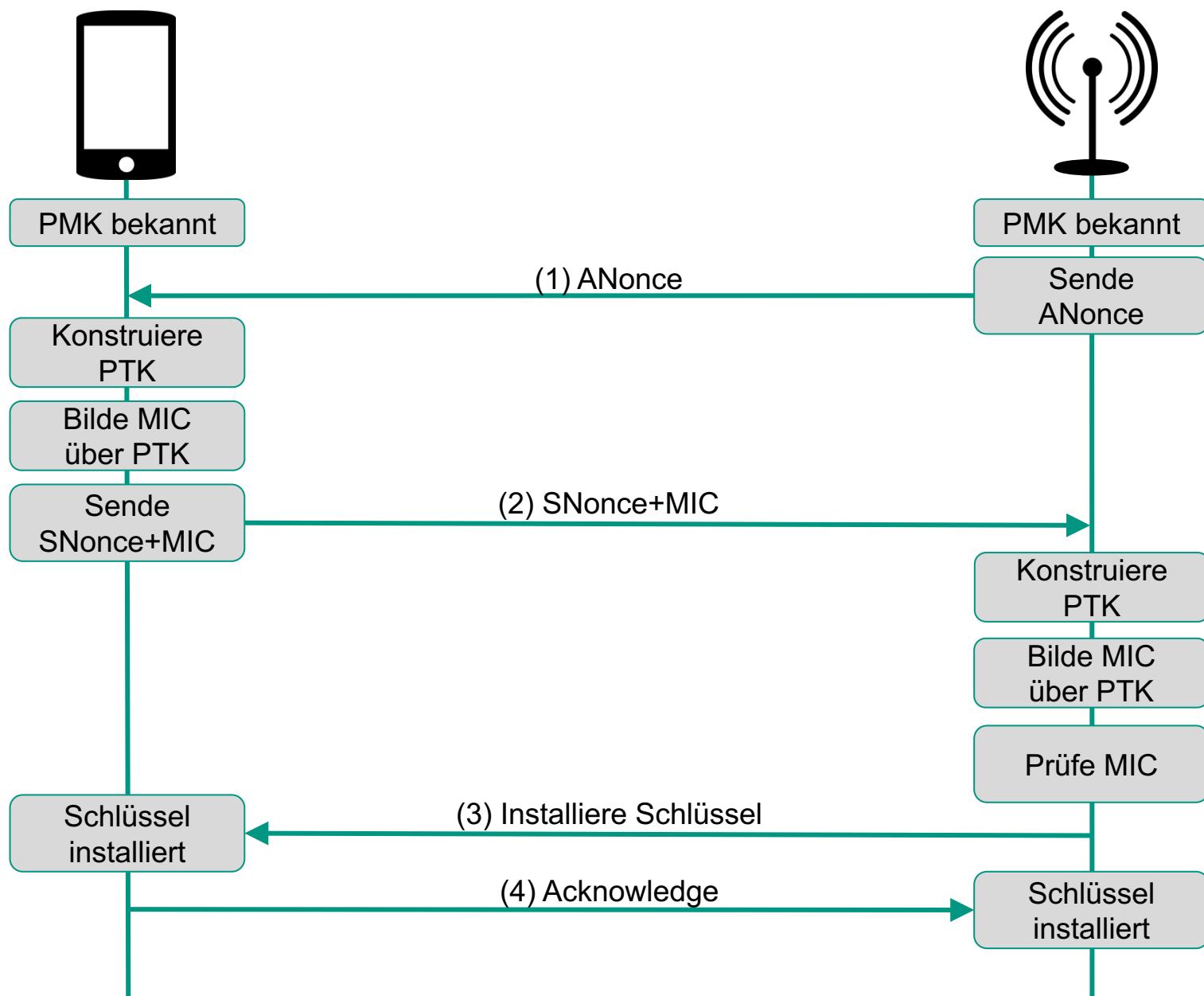










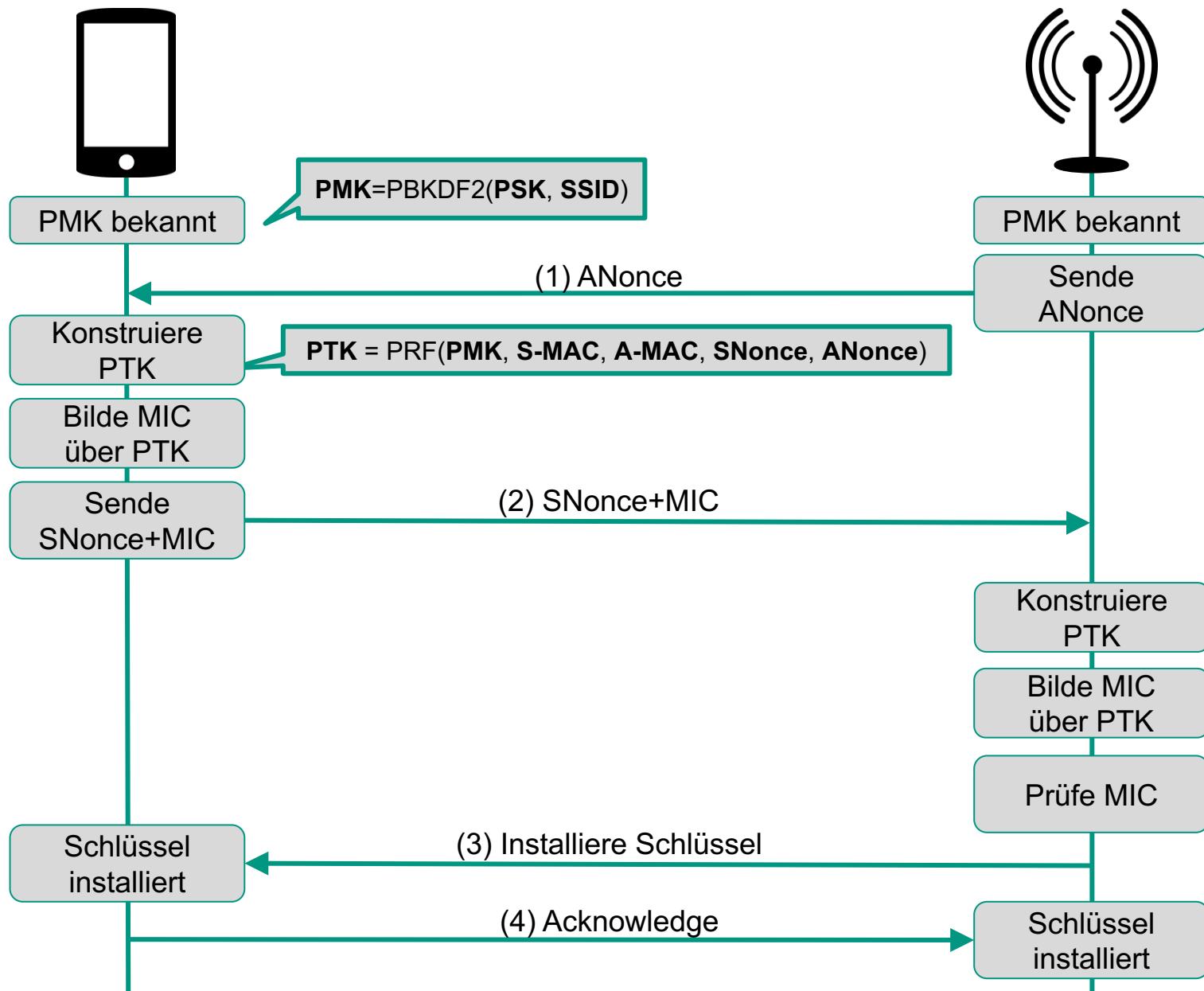


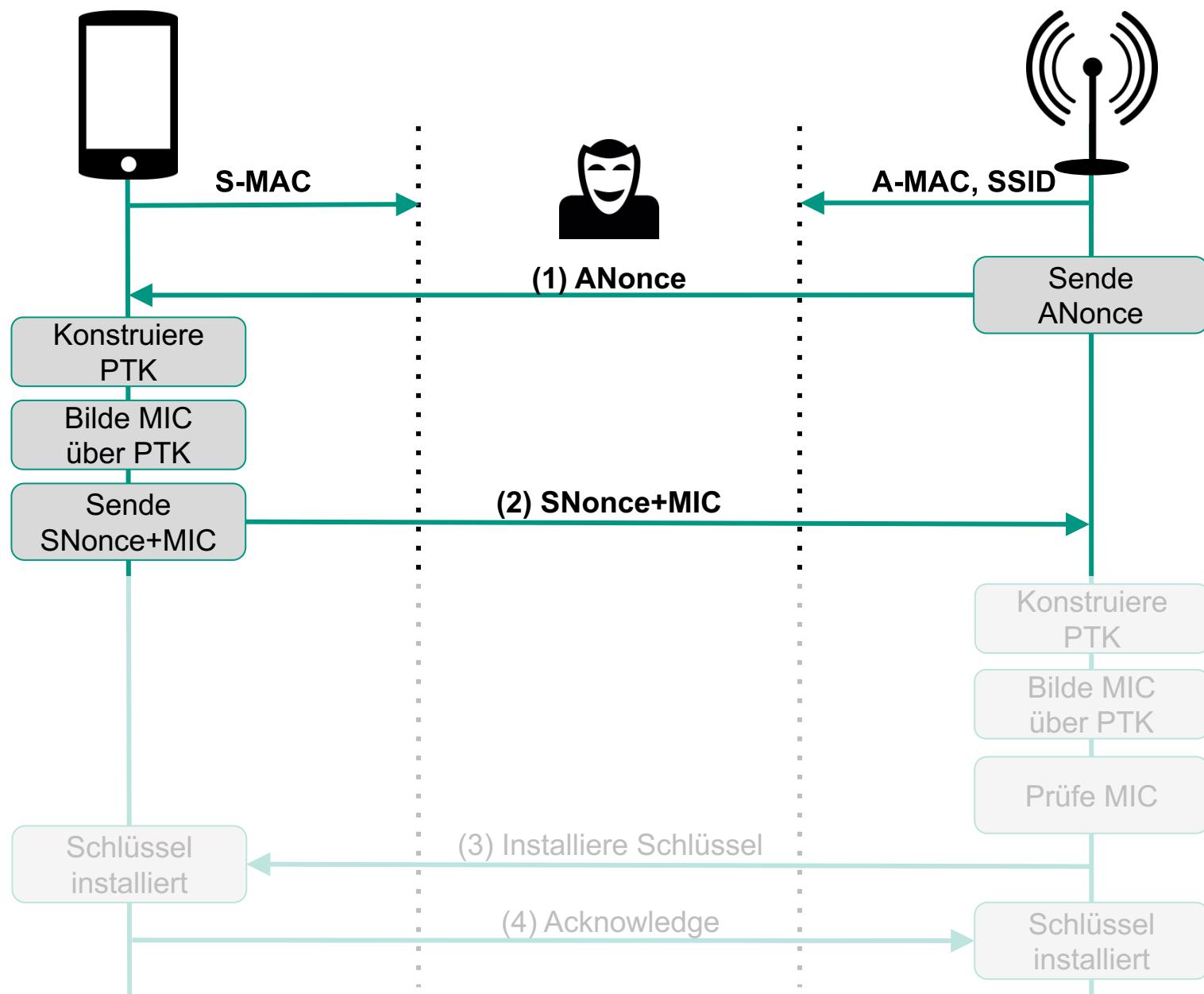
Online-Cracking: Realitätscheck

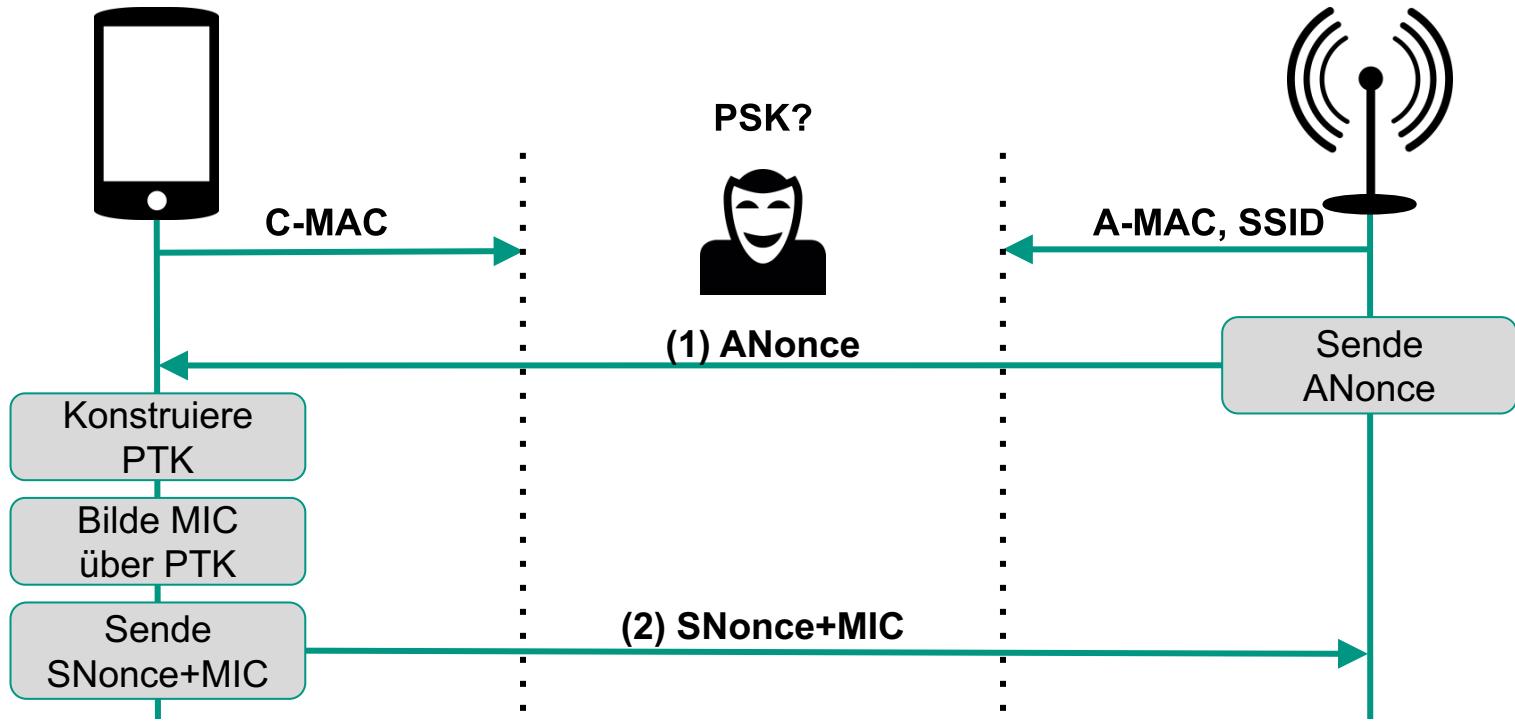
- Annahme:
 - Kompletter Handshake und Verifikation durch Router benötigt lediglich 50 ms, dann 20 Hashes/Sekunde
 - Es sei bekannt, dass das Passwort aus genau 8 Kleinbuchstaben besteht($= 26^8 = 208.827.064.576$)
- Hash-Kollision hier nach circa 165 Jahren zu erwarten
- Bedrohung also äußerst gering, Hashes/Sekunde-Rate viel zu limitiert
 - Erfolgschancen verschwindend gering
- Geht das nicht auch effizienter? ⇒ Offline-Cracking

Cracking: Offline

- Idee: Angreifer spielt Rolle des AP beim Handshake (später) lokal nach
 - Es werden allerdings einige Informationen benötigt: SSID, SNonce, ANonce usw.
- Woher diese nehmen? Siehe Handshake!







- Angreifer spielt Handshake jetzt lokal nach
 - Möglichen Wert für PSK bestimmen
 - PMK für diesen berechnen ($\text{PBKDF2} \rightarrow 4096$ Runden HMAC-SHA1)
 - Berechneter MIC == aufgezeichneter MIC? \rightarrow mögliches Passwort gefunden

Cracking: Offline (Tonspur)

- Benötigt werden:
 - Schicht-2-Adressen von Client und Access Point
 - S(uplicant)Nonce und A(uthenticator)Nonce, SSID, MIC
- ⇒ Alle nötigen Informationen nach Schritt 2 übertragen, Schritt 3+4 entbehrlich ⇒ sprich „halber“ Handshake benötigt
- Angreifer spielt Handshake lokal nach
 - Möglichen Wert für PSK bestimmen
 - PMK für diesen berechnen (4096 Runden PBKDF2-Hashfunktion)
 - Berechneter MIC == aufgezeichneter MIC? → mögliches Passwort gefunden

Offline-Cracking: Realitätscheck

- Hardware: Verbund aus 8 x Nvidia GTX 1080 + 2 x Intel Xeon E5 2620V3 leistet 3177,6 kHashes/Sekunde (Sagitta Brutalis, ca. 18500 \$) [7]
- Passwort aus vorherigem Beispiel voraussichtlich in 9h gebrochen (statt in 165 Jahren!)
- 8 alphanumerische Zeichen benötigen aber immer noch im Mittel 400 Tage
- Problem: Suchraum gigantisch, Laufzeit der erschöpfenden Suche explodiert
- Geht das nicht auch effizienter? ⇒ Wörterbuchangriff

Cracking: Offline mit Wörterbuch

- Motivation: Nutzer favorisieren leicht zu merkende Passwörter
 - *“Users may fulfill policy requirements in predictable ways, such as basing their passwords on names, or words” [5]*
 - Häufig: Simple Kombinationen (bspw. <Wort> + <Zahl>) und Substitutionen (O -> 0, A -> 4) um Richtlinien zu erfüllen
- Statt raten: Passwörter mit Wörterbuch „zusammenbauen“
- Probleme:
 - Güte und Verfügbarkeit von Wörterbuch entscheidend
 - 4096 Runden HMAC-SHA1 pro PMK sind teuer ; kann nur bedingt vorgeneriert werden da von SSID abhängig

Wörterbuch-Cracking: Realitätscheck

- Hardware: Verbund aus 8 x Nvidia GTX 1080 + 2 x Intel Xeon E5 2620V3 leistet 3177,6 kHashes/Sekunde (Sagitta Brutalis, ca. 18500 \$) [7]
- Annahmen:
 - Passwort aus max. 2 oft benutzen Wörtern (Top 10.000)
 - enthält bis zu eine Zahl aus maximal 2 Ziffern
 - Ordnung der Einzelteile beliebig
 - $= 10.001 * 10.001 * 111 * 3 = 33.306.660.333$
- Circa 3 Stunden für Prüfen des vollständigen Suchraums nötig
- Falls man keine entsprechende Hardware besitzt...
 - ... Kapazitäten bei AWS mieten
 - ... Online Services für WPA2-Cracking (Seriosität fraglich)

Offline-Cracking in der Cloud

- Falls man keine entsprechende Hardware besitzt...
 - ... Kapazitäten bei AWS mieten
 - ... Online Services für WPA2-Cracking
 - Bspw.: GPUHash.me
 - GPU-Cluster mit ca. 2 MHashes/Sekunde
 - 4\$/erfolgreichem Handshake, angeblich 25% Erfolgsrate
 - Viele weitere Services, auch „Vermittlungsplattformen“
 - Seriosität der Anbieter fraglich

1. Einleitung
2. WPA2-Cracking
3. Handshakes
mitschneiden
4. Fazit & Ausblick

- On-Site
- Off-Site

Handshakes (effizient) mitschneiden

- Es existieren zwei Familien von Angriffen
 - On-Site
 - Passives Lauschen, „Abwarten-und-Tee-Trinken“
 - Authentifizierungen eher selten, ineffizienter Angriff
 - Deauth-Angriff
 - Off-Site
 - Evil-Twin-Angriff
- Abstrakt: Schritt 1+2 des Handshakes zwischen Client und AP mitschneiden für späteres Offline-Cracking

Angreifer provoziert Handshake

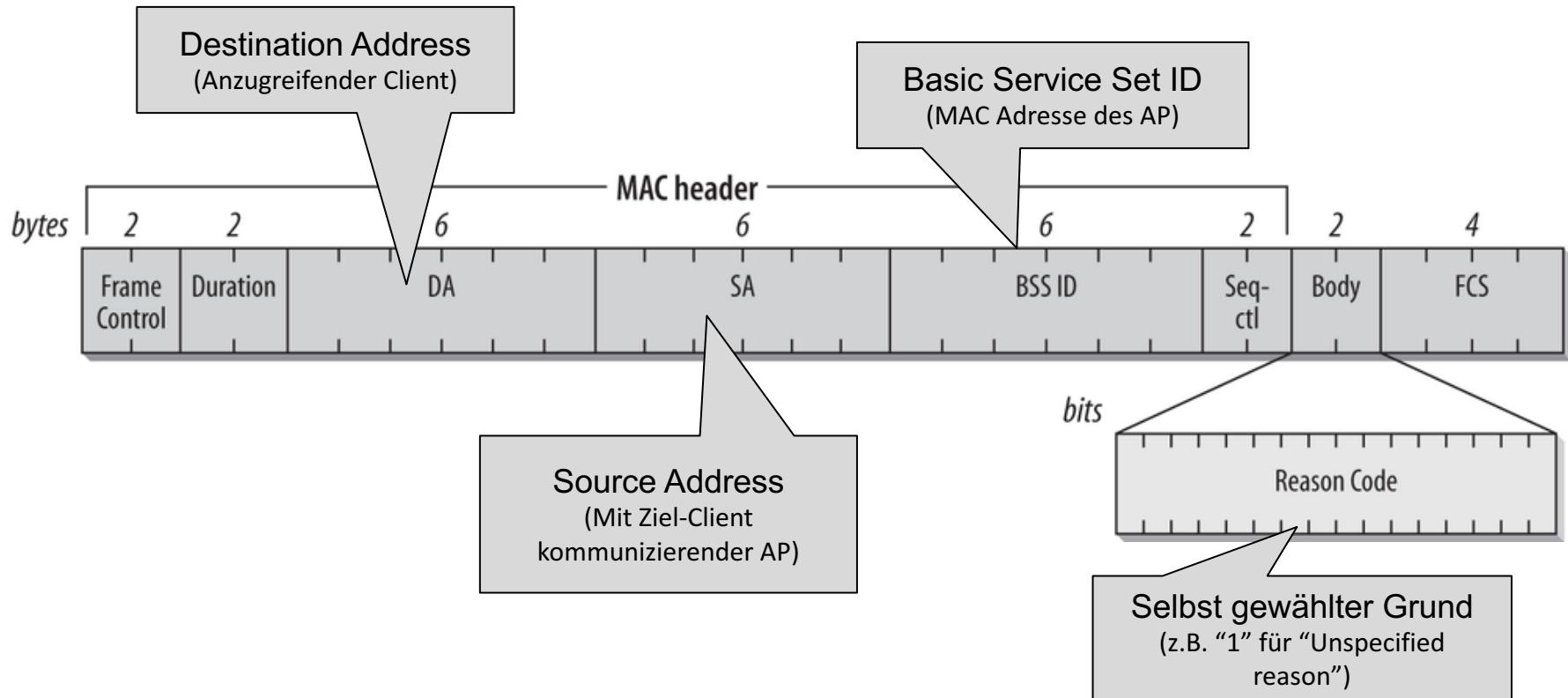
Sniffing: On-Site (passiv)

- Voraussetzung: AP und Client in Reichweite des Angreifers
- Angreifer lauscht auf Medium bis Handshake vorkommt
- Aufzeichnen des Nachrichtenverkehrs
 - Nachträglich auf Handshakes analysieren (.pcap Captures)
 - Live auf dem Interface (BPF einsetzen)
- Nachteile:
 - (Neu-) Authentifizierungen eher selten
 - AP muss in Reichweite sein, nur umgebende Netzwerke und deren Nutzer angreifbar

Sniffing: On-Site (aktiv), aka „Deauth-Attack“

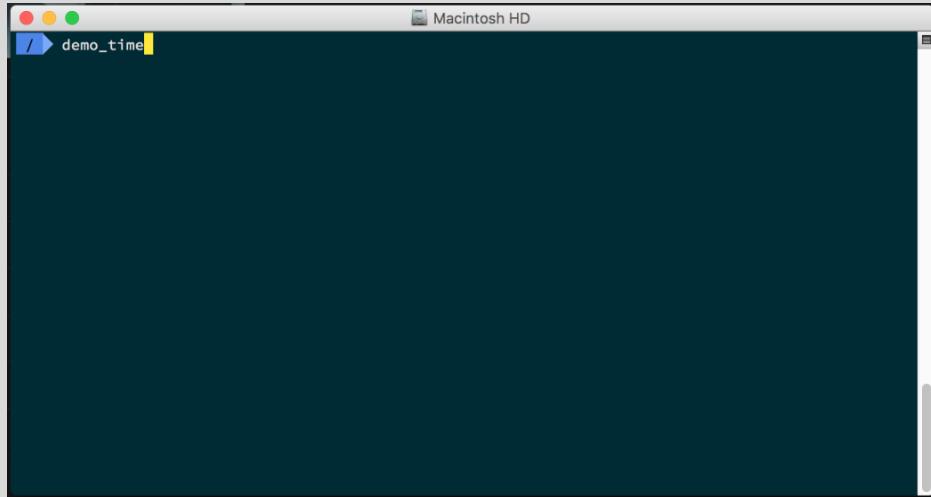
- Idee: Forciere Neu-Authentifizierung des Clients beim AP
- Ausnutzen von Deauthentication-Frames
 - Management-Frames unverschlüsselt; ohne Kenntnis von PSK erzeugbar
 - Angreifer sendet Deauth-Frame an Client (und AP)
 - Gespoofter Absender: MAC-Adresse des AP
 - Experiment zeigt: Funktioniert auch Disassociation-Paketen
- Nachteile:
 - Aktives Eingreifen in den Netzwerkverkehr
 - Je nach Szenario „leicht“ detektierbar, für Nutzer jedoch quasi nicht wahrnehmbar

Sniffing: On-Site (aktiv), aka “Deauth-Attack”



Quelle: <https://www.safaribooksonline.com/library/view/80211-wireless-networks/0596100523/httpatomoreillycomsourceoreillyimages1595847.png>

Demo

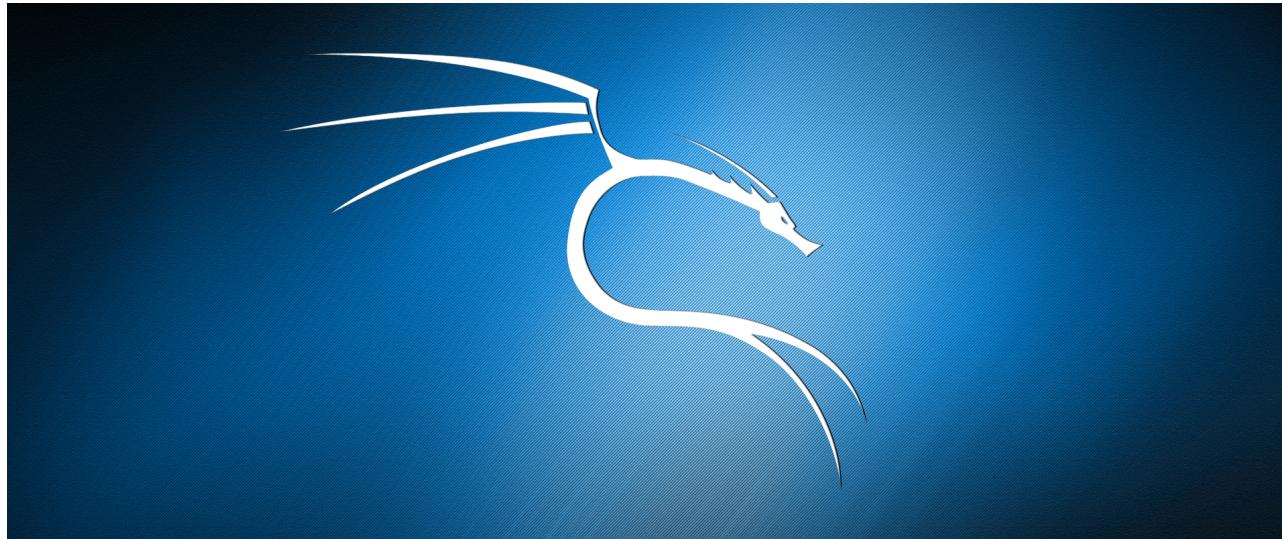


■ Deauth-Angriff:

- (Ziel auswählen)
- Deauth-Pakete senden
- Handshake mitschneiden
- Handshake mit Wörterbuch
brechen

Demo: Eingesetztes System

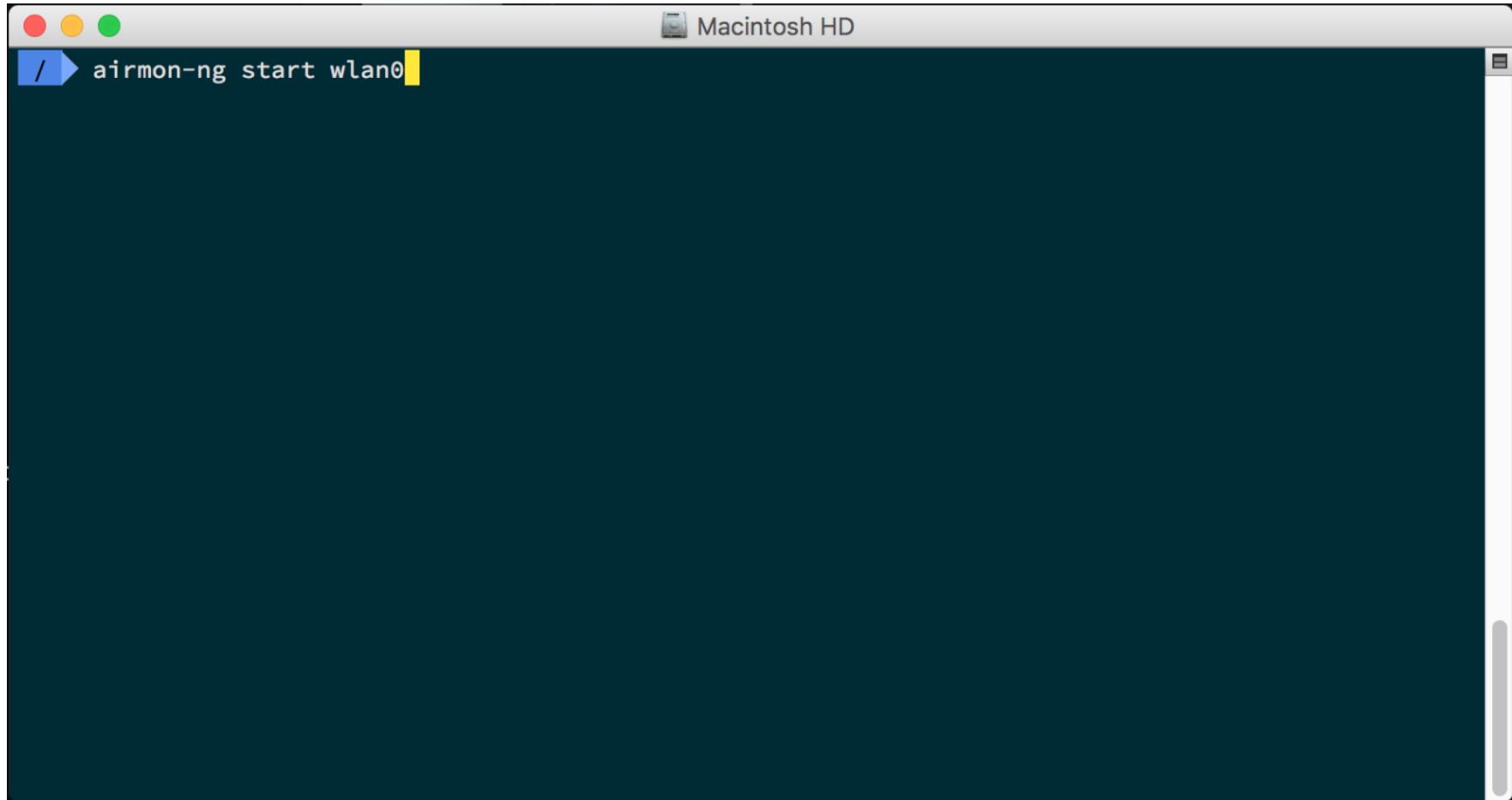
- Via Parallels virtualisiertes Kali Linux auf MacBook Pro
- Wi-fi-Adapter: TP-Link TL-WN722N mit Realtek rtl8187 Chipsatz



Cracking: Praktische Durchführung

- Monitor-Mode für Netzwerk-Interface aktivieren
 - `airmon-ng start wlan0`
- Aufzeichnen des relevanten Netzwerkverkehrs
 - `airodump-ng --bssid <BSSID> -c <CHANNEL> --write ... wlan0mon`
- Handshake provozieren, Client deauthentifizieren
 - `./deauth_jammer.py -a <BSSID> -t <TARGET MAC> -c <CHANNEL> -n 32`
- Verifikation mit `pyrit -r <DUMP> analyze`
- Handshake crachen
 - Hier Aircrack-ng
 - *Weitere Tools: Pyrit, Hashcat, Reaver, John The Ripper, CoWPAtty, Aircrack-ng, oclHashcat/cudaHashcat*





A screenshot of a Mac OS X terminal window titled "Macintosh HD". The window contains a single command: "/ airmon-ng start wlan0". The terminal has its characteristic blue arrow icon and red, yellow, and green close/minimize/maximize buttons.

„Deauth-Attack“: Realitätscheck

- Wie leicht zu erkennen?
- Feldversuch 1: WPA2-PSK Heimnetzwerk mit bis zu 8 aktiven Clients
 - Über 24 Stunden kein Deauth-Paket
 - Nur ein AP → keine Clientverwaltung notwendig
 - Keine Schlüsselneuaushandlung benötigt
 - Deauth-Attacke äußerst auffällig durch Spikes

„Deauth-Attack“: Realitätscheck

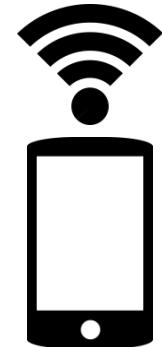
- Feldversuch 2: WPA2-EAP als Firmennetzwerk mit bis zu 30 aktiven Clients
 - Ca. 2 Deauth-Pakete/min, oftmals in Spikes (5-10 Pakete „zeitgleich“)
 - 3 APs in Reichweite → Clientverwaltung notwendig
 - Clients bewegen sich („Reasoncode 8“)
 - Stationäre Systeme benötigen Schlüsselneuaushandlung („Reasoncode 2“)
 - Auch hier: Deauth-Attacke auffällig durch (höhere) Spikes

Sniffing: Off-Site-Angriffe

- Ziel:
 - Angriffe gegen Client über Netzwerke, welche sich nicht in Reichweite befinden
 - Angriffsziele sollen nicht mehr von umgebenden Netzwerken sondern Clients in Reichweite abhängig sein
- Idee: Client zu Authentifizierungsversuch verleiten; Handshake provozieren
- Voraussetzungen:
 - Client muss sich weiterhin in Reichweite befinden
 - Konfiguration (SSID & Sicherheitskonfiguration) des Zielnetzwerkes muss bekannt sein
 - Woher erfährt der Angreifer die SSIDs die dem „Opfer“ bekannt sind ?

Exkurs: Probe-Requests und Probe-Responses

- APs senden in Intervallen sog. „Beacon-Frames“ aus, um Netzwerk und Konfiguration bekannt zu machen
- Client kann Probe-Requests versenden
 - zwingend für Detektion von „versteckten Netzen“
 - enthält SSID
 - AP antwortet mit Probe-Response
- Probe Response enthält u.a.:
 - Unterstützte Datenraten des APs
 - Sicherheitskonfiguration (z.B. OPN, WPA2 PSK)



Exkurs: Probe-Requests und Probe-Responses

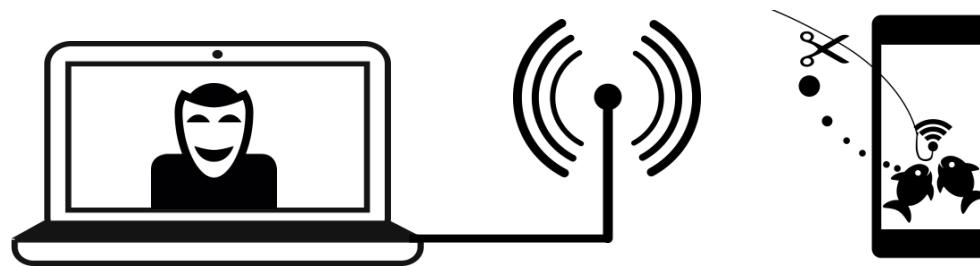
- Viele Geräte senden fortlaufend Probe-Requests aus...
 - Eigene Analysen:
 - Windows Phone, Windows 10, macOS
 - Android 6 sendet auch wenn verbunden!
 - ... auch für nicht versteckte Netze - unnötig und unsinnig!
- Problem dabei:
 - Öffnet Tracking von Endgeräten Tür und Tor
 - Client verrät ihm bekannte Gegenstellen

Sniffing: Off-Site: „Evil-Twin-Attack“

- Ist original AP nötig für validen Handshake? Nein!
 - Liefert lediglich ANonce und SSID
 - ANonce → beliebige Zufallszahl
 - SSID → bekannt aus Probe-Request
 - AP muss sich während WPA2-PSK-Handshake selbst nicht authentifizieren

Sniffing: Off-Site: „Evil-Twin-Attack“

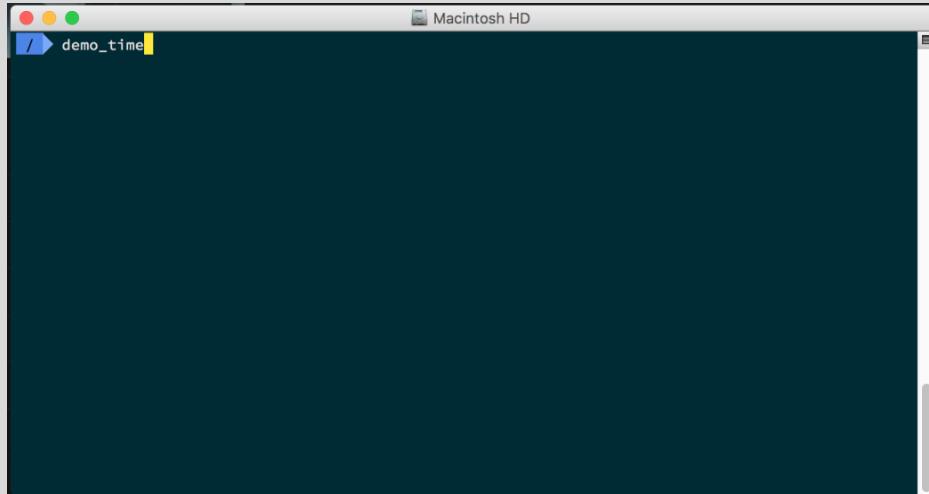
- Erstelle eigenen Mimikry-AP mit SSID aus Probe-Request
 - Sende Beacon-Frames bzw. entsprechende Probe-Response an Client
- Wenn Client „anbeißt“, dann Handshake bis Schritt 2 durchführen
- Anschließend Verbindungsabbruch
 - Agieren als MITM unmöglich, würde Kenntnis des PSK erfordern



Sniffing: Off-Site: „Evil-Twin-Attack“

- Nachteile:
 - Client muss in Reichweite sein
 - Fake-AP auffällig → aktives Teilnehmen im Netzwerk
- Abhängig vom Endsystem wird Fake-AP “erkannt”
 - Windows-Phone/Windows 10: Erkennt Abweichung des Profils
 - Android 5/6, Windows 8.1: Verbindet automatisch, manche Geräte wechseln sogar bei aktiver Verbindung wenn Signal stärker
- Lösung: Mehrere Konfigurationen auf dem Interface öffnen

Demo



■ Evil-Twin-Angriff:

- (Ziel auswählen)
- (Probe-Requests auslesen)
- Evil-Twin aufsetzen
- Handshake mitschneiden
- PSK brechen

Evil-Twin-Angriff: Befehle

- airmon-ng check kill // andere, interferierende Prozesse beenden
- airmon-ng start <interface> // in der Regel "wlan0"
- airodump-ng <interface> // Probe Requests mitlesen, Ziel wählen
- airbase-ng --essid <ESSID> -Z 4 -F dump <interface> // Fake-AP bereitstellen (interface in Monitoring-Mode, siehe Ergebnis von Schritt 2. AP verwendet WPA2-PSK und schreibt Traffic in PCAP-Datei)
- pyrit -r <dump.pcap> analyze // Prüfen, ob gültiger Handshake in dump enthalten
- ./combinr.py -n 2 wordlist.txt | aircrack-ng -e <ESSID> -w - <dump.cap>
// aircrack-ng versucht die generierten, über StdIn hineingereichten, Passwort-Kandidaten durch

1. Einleitung
2. WPA2-Cracking
3. Handshakes mitschneiden

4. Fazit & Ausblick

- Fazit
 - WPA2
 - Vorgestellte Angriffe
- Ausblick

Fazit: WPA2-PSK

- Management-Frames sind nicht (implizit) authentifiziert
 - Erweiterung 802.11w erlaubt Authentifizierung einiger Management Frames
- Keine Perfect-Forward-Secrecy
- AP muss sich gegenüber dem Client bei Handshake nicht authentifizieren
- Probe-Requests kritisch bzgl. Tracking von Endgeräten
 - Erkenntnis: Endgeräte zu gesprächig
 - Ø 50 Probe-Requests/Stunde pro Gerät [9]
 - Unsere Ergebnisse: Spitzen von 40 Probe-Requests/Stunde (Android 6)
 - Android sendet mehr Probe-Requests als iOS, Mac OS, Windows 10

Fazit: Praktikabilität vorgestellter Angriffe

- Komplexität des Schlüssel entscheidet letztlich über Sicherheit von WPA2-Netzen
 - Schwache Schlüssel stellen eine realistische Sicherheitsbedrohung dar
 - Hinreichend komplexe Schlüssel nicht in annehmbarer Zeit zu brechen
- Netze müssen für Angriff auf deren PSK nicht in Reichweite sein
- Vorgestellte On- und Off-Site-Verfahren stellen in Kombination mit Wörterbüchern einen praktikablen Angriff auf den PSK dar

Fazit: Praktikabilität vorgestellter Angriffe

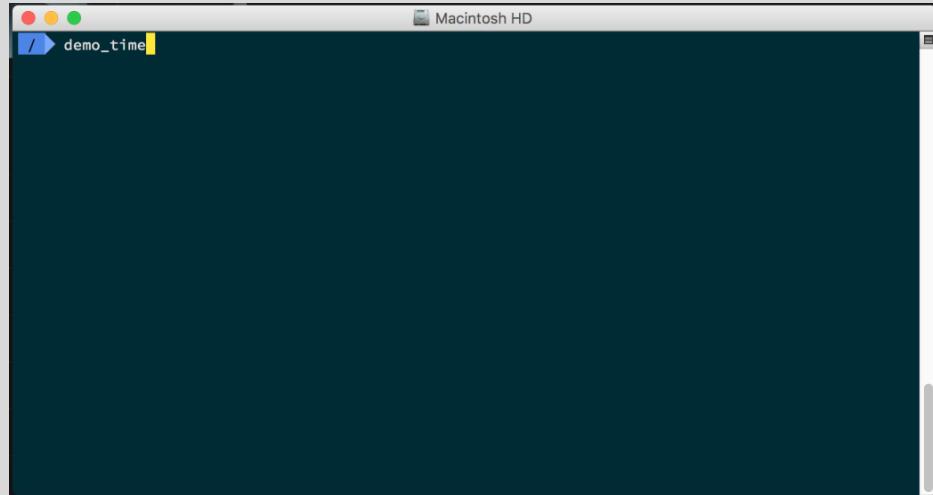
- Detektion von Deauth-Attacken:
 - Normalerweise: AP verwirft Pakete die nicht an ihn gerichtet sind
 - AP erhält Deauth-Paket von „sich selbst“ → möglicher Angreifer im Netz!
 - Nutzen fragwürdig, Clients authentifizieren sich trotzdem
- Prävention von Evil-Twin-Attacken:
 - MAC Randomization erschwert gezielte Angriffe macht sie jedoch nicht unmöglich
 - Speicherung von Netzwerkprofilen zum Erkennen von Evil-Twins bei „falscher“ Konfiguration
 - Speicherung von MAC-Adressen bekannter APs
 - neuer unbekannter AP → Nutzer benachrichtigen
 - Aufwändig für Clients bei vielen APs

Ausblick

- Ein Verbesserungsansatz: Automatisierung des Evil-Twin-Angriffs
 - Horizontale Skalierung:
 - Für alle Probe-Requests eines Clients falsche APs bereitstellen
 - Viele Handshakes mitschneiden
 - Jeden Handshake lediglich gegen eine effiziente Wortliste prüfen
 - “Jedes Smartphone war einmal mit einem schlecht gesicherten Café-WLAN verbunden”
 - ⇒ Suche nach der “lowest hanging fruit”

- Vorstellung von „TINDAHR“

Demo



Fragen?

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Benny Görzig (bgoerzig@gmail.com) & Florian Loch (me@fdlo.ch)

http://fdlo.ch/presentations/ka_it_si_wpa2.pdf

<https://github.com/kastel-wpa2>

Literatur & Quellen

- [1] Jörg Rech. Wireless LANs : 802.11-WLAN-Technologie und praktische Umsetzung im Detail; 802.11a/h, 802.11b, 802.11g, 802.11i, 802.11n, 802.11d, 802.11e, 802.11f, 802.11s, 802.11ac, 802.11ad.
- [2] SANS Institute. IEEE 802.11 Pocket Reference Guide.
- [3] IEEE Computer Society: IEEE Std 802.11TM-2012 (Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications). 2012.
- [4] Moshe Zviran: Password Security: An Empirical Study. 1999. URL:
http://calhoun.nps.edu/bitstream/handle/10945/40319/haga_password_security.pdf?sequence=1
- [5] Richard Shay. Correct horse battery staple: Exploring the usability of system-assigned passphrases. 2012. URL: https://cups.cs.cmu.edu/soups/2012/proceedings/a7_Shay.pdf

Literatur & Quellen

- [6] J. Bonneau, E. Shutova. Linguistic properties of multi-word passphrases. 2012. URL:
http://www.jbonneau.com/doc/BS12-USEC-passphrase_linguistics.pdf
- [7] Benchmark von Sagitta Brutalis. URL:
<https://gist.github.com/epixoip/a83d38f412b4737e99bbef804a270c40>
- [8] Why MAC Address Randomization is not Enough: An Analysis of Wi-Fi Network Discovery Mechanisms. URL: <http://papers.mathyvanhoef.com/asiaccs2016.pdf>
- [9] Short: How Talkative is your Mobile Device? An Experimental Study of Wi-Fi Probe Requests
<https://frdgr.ch/wp-content/uploads/2015/06/Freudiger15.pdf>

Bildquellen

<https://openclipart.org/detail/3619/hammer> Icon made by alst

<https://openclipart.org/detail/262305/smartphone> Icon made by ciubotaru

http://www.flaticon.com/free-icon/anonymous_14446 Icon made by Picol

<https://openclipart.org/detail/17423/wirelesswifi-symbol> Icon made by ispyisail

<https://openclipart.org/detail/208540/laptop> Icon made by jmlrtinez

<https://de.wikipedia.org/wiki/Aircrack#/media/File:Aircrack-ng-new-logo.jpg>

<https://www.kali.org/wp-content/uploads/2015/05/kali-dragon-middle.png>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Heartbleed#/media/File:Heartbleed.svg>