Hybride Verschlüsselung und weiterführende Themen

Kryptologie IL (Vorlesungsteil)

Andreas Unterweger

Studiengang ITS
FH Salzburg

Sommersemester 2024

Kurzwiederholung

- Symmetrische Kryptografie
  - Schlüsseltausch
  - DH(E)
  - AES
- Asymmetrische Kryptografie
  - Öffentlicher Schlüssel
  - Privater/geheimer Schlüssel
  - RSA
- Kryptographische Hashes
  - Kollisionsresistenz
  - (Second-)Preimage-Resistenz
  - SHA-2

Überblick

- Hybride Verschlüsselung
  - Schlüsseltausch wiederaufgegriffen (mit Schlüsselableitung)
  - Hybrides Verschlüsselungsschema
  - Challenge-Response-Schema
- Beispiele der kombinierten Verwendung von Kryptografie
  - Sichere Passwortspeicherung
  - Transport Layer Security
  - Praktische Protokolle (Auswahl)

Schlüsseltausch wiederaufgegriffen I

- Diffie-Hellman-Schlüsseltausch
  - Alice und Bob potenzieren Zufallszahlen in einem Modul (multiplikative Gruppe)
  - Potenzregeln liefern Alice und Bob dasselbe Gruppenelement
  - Finales Gruppenelement kann verwendet werden, um einen gemeinsamen Schlüssel abzuleiten
  - Für Eve ist der gemeinsame Schlüssel unzumutbar zu berechnen (Diskretes-Logarithmus-Problem und Diffie-Hellman-Vermutungen)
- Herausforderungen
  - Sichere Gruppen wählen
  - Finales Gruppenelement in Schlüssel umwandeln $\rightarrow$ Schlüsselableitung

Schlüsseltausch wiederaufgegriffen II

- Schlüsselableitung
  - Leite einen Schlüssel k aus dem finalen Gruppenelement f ab
  - Beispiel: Erhalte 128-Bit-AES-Schlüssel aus 1.024-Bit-Gruppenelement
  - Mehrere Möglichkeiten
- Hashen zur Schlüsselableitung
  - Berechne kryptografischen Hash: $k := H(f)$

  $\rightarrow$ Entfernt jede verbleibende algebraische Struktur

  $\rightarrow$ Liefert ein Ergebnis fester Länge (Schlüssel)
- Standardisierte erweiterte Varianten, z.B. PBKDF2
  - Wiederholte Verwendung von Hashes, z.B. 1.000 Iterationen

  $\rightarrow$ Verlangsamt Angreifer deutlich
  - Verwendung von zusätzlichem Salz (Details später)

[1] Kaliski, B.: PKCS #5: Password-Based Cryptography Specification Version 2.0. `https://www.ietf.org/rfc/rfc2898.txt` (Zugriff am 8.10.2022), 2000.

Hybride Verschlüsselung I

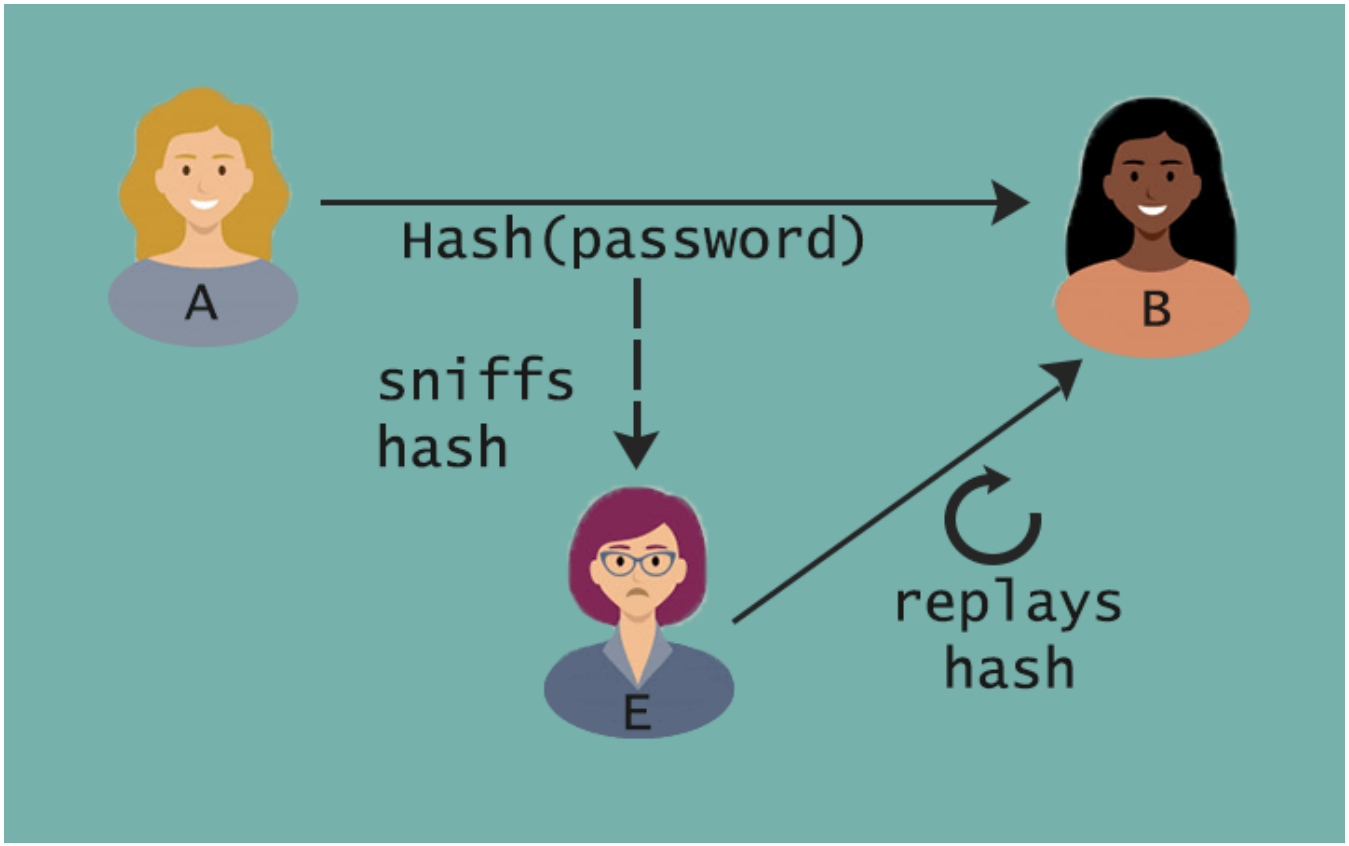
- Alternative zu Diffie-Hellman-Schlüsseltausch
- Kombiniere asymmetrische und symmetrische Chiffren
- Annahmen
  - Bob hat ein Schlüsselpaar $\left(k^A_{oeffentlich}, k^A_{privat}\right)$
  - Alice kennt Bobs öffentlichen Schlüssel (zur Erinnerung: Zertifikate!)
- Schlüsseltauschschritte:
  1. Alice generiert einen zufälligen Schlüssel k
  2. Alice verschlüsselt k mit Bobs öffentlichem Schlüssel: $k_e = E(k^B_{oeffentlich}, k)$
  3. Alice schickt den verschlüsselten Schlüssel k_e an Bob
  4. Bob entschlüsselt den empfangenen Schlüssel mit seinem geheimen Schlüssel: $k = D(k^B_{private}, k_e)$
  5. Alice und Bob können Nachrichten mit dem symmetrischen Schlüssel k austauschen

Hybride Verschlüsselung II

- Warum nicht asymmetrische Kryptografie für alle Nachrichten verwenden?
  - Kryptografie mit öffentlichen Schlüsseln ist weit weniger effizient als Kryptografie mit geheimen Schlüsseln (längere Nachrichten benötigen viel aufwändigere Berechnungen)
  - RSA-Schlüssel sind viel länger als AES-Schlüssel mit demselben Sicherheitsniveau (zur Erinnerung: elliptische Kurven sind eine gangbare Alternative!)
- Zusammenfassung von hybrider Verschlüsselung
  - Verwende Kryptografie mit öffentlichen Schlüsseln, um den Schlüssel auszutauschen
  - Verwende Kryptografie mit geheimen Schlüsseln, um Nachrichten auszutauschen
  - Der symmetrische Schlüssel ist praktisch zufällig
  - Bobs öffentlicher Schlüssel muss vorab bekannt sein, damit das funktioniert
- Ergänzung zu diesem Schema: Challenge-Response-Schema

Challenge und Response I

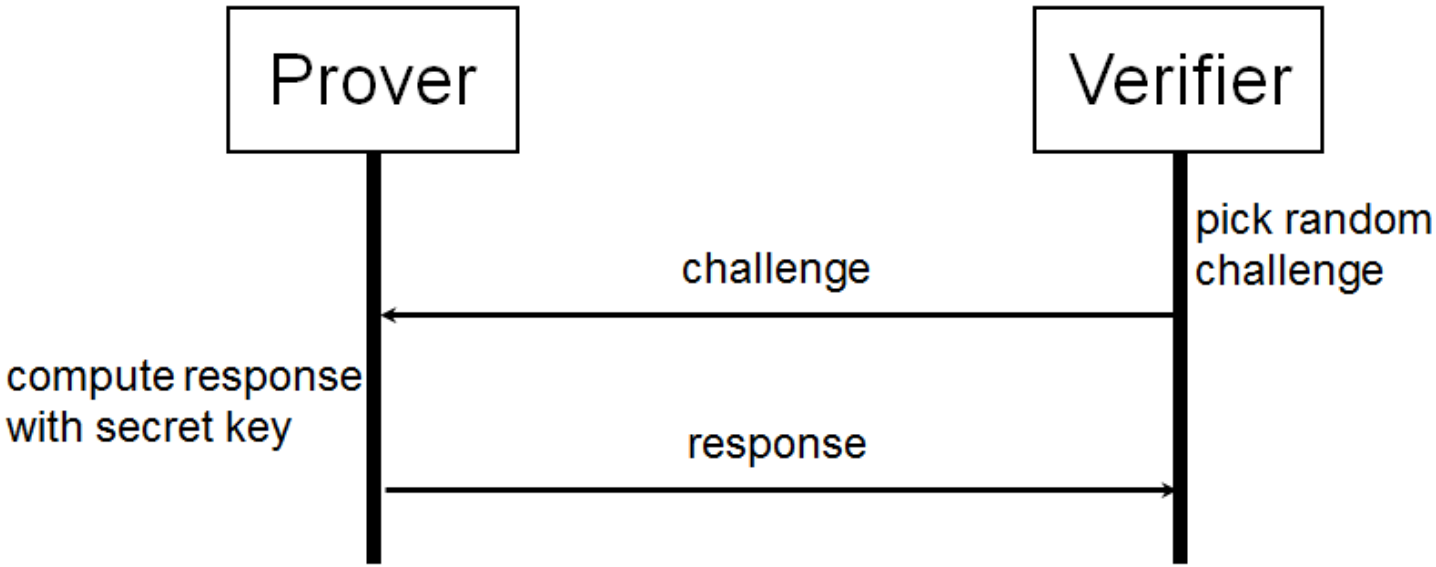
- Wie überprüfen, dass Bob mit Alice spricht und nicht mit Eve?
- Risiko von Replay-Angriffen durch Eve



Quelle: Gibson, D.: Replay Attacks. https://cybersecurityglossary.com/replay-attacks/ (Zugriff am 8.10.2022), 2020.

Challenge und Response II

- Wie Authentifizierung lösen?
  - Zertifikate (fehlt es an Lebendigkeit, erlauben Replay-Angriffe)
  - Challenge und Response (verhindern Replay-Angriffe, indem sie Lebendigkeit prüfen)



Quelle: Rathgeb, C.: IT-Sicherheit, Kapitel 6 – Authentifikation. `https://www.dasec.h-da.de/wp-content/uploads/2014/05/06_authentifikation.pdf` (Zugriff am 8.10.2022), 2014.

[2] Barrett, D. J. and Silverman, R. E.: SSH: The Secure Shell: The Definitive Guide, 1st ed., O'Reilly, 2001.

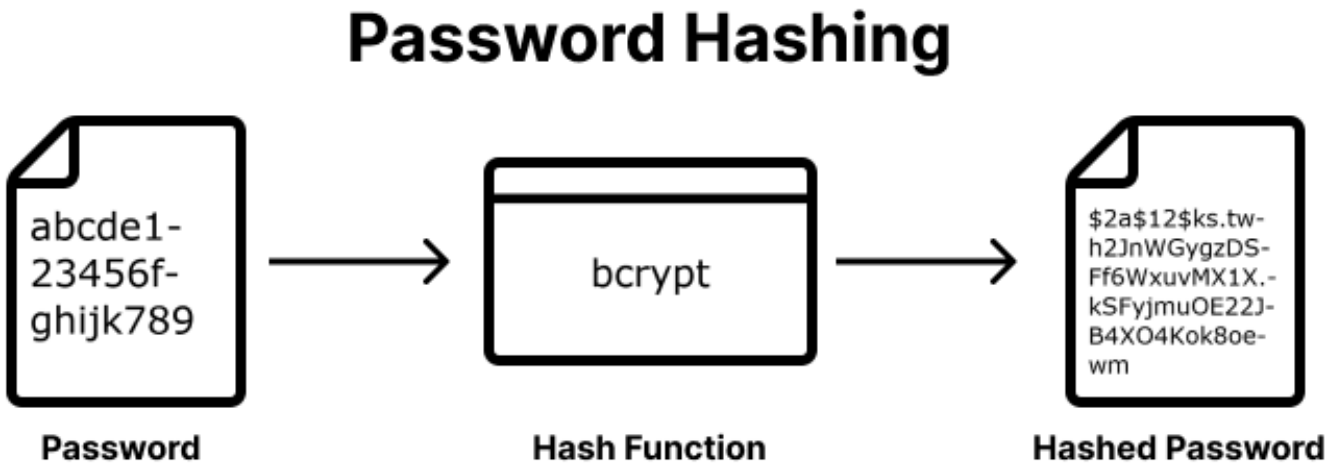
Challenge und Response III

- Beispiel: Challenge-Response-Schema zur Authentifizierung öffentlicher Schlüssel im Secure-Shell-(SSH)-Protokoll (vereinfacht):
  1. Alice sendet ihren öffentlichen Schlüssel $k_{oeffentlich}$ an Bob
  2. Bob generiert eine zufällige Challenge r and verschlüsselt sie mit Alices vermeintlichem öffentlichen Schlüssel: $c := E(k_{oeffentlich}, r)$
  3. Bob schickt die Challenge c an Alice
  4. Alice entschlüsselt die vermeintliche Challenge c' mit ihrem geheimen Schlüssel k_{geheim}: $r' = D(k_{geheim}, c')$
  5. Alice hasht die entschlüsselte Challenge r': $h' := H(r')$
  6. Alice schickt die gehashte Antwort (Response) h' an Bob
  7. Bob hasht seine zufällige Challenge r: $h := H(r)$
  8. Bob überprüft, ob $h = h'$ (wenn nicht, könnte er mit Eve sprechen)
- Zufälligkeit verhindert Replay-Angriffe
- Hashing ist erforderlich, damit Chosen-Plaintext-Angriffe vermieden werden können

[2] Barrett, D. J. and Silverman, R. E.: SSH: The Secure Shell: The Definitive Guide, 1st ed., O'Reilly, 2001.

Überblick über sichere Passwortspeicherung

- Wie (Benutzer)-Passwörter speichern?
  - Nicht im Klartext (offensichtlich)
  - Verschlüsselt? $\rightarrow$ Schlüssel zur Entschlüsselung liefert Klartextpasswörter
  - Gehasht? $\rightarrow$ Identische Passwörter liefern identische Hashes

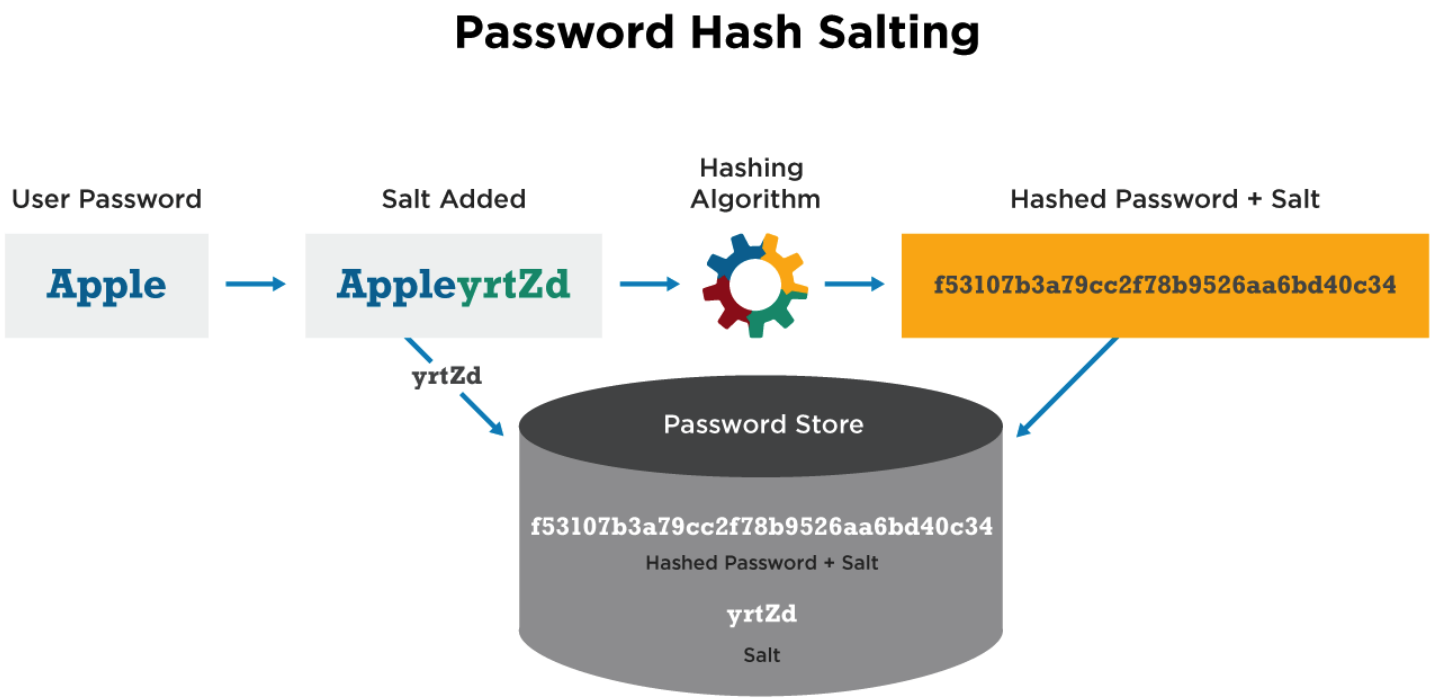


Quelle: Authgear: Password Hashing and Salting Explained. `https://www.authgear.com/post/password-hashing-salting` (Zugriff am 8.10.2022), 2022.

[3] Arias, D.: Adding Salt to Hashing: A Better Way to Store Passwords. `https://auth0.com/blog/adding-salt-to-hashing-a-better-way-to-store-passwords/` (Zugriff am 8.10.2022), 2021.

Salzen

- Salz: Zufallszahl (zusammen mit Passwort gespeichert) **pro Benutzer**
- Salzen: Passwort p und Salz s vor dem Hashen aneinanderhängen
- Gesalzenes Hashing: $\hat{H}(p, s) := H(p||s)$

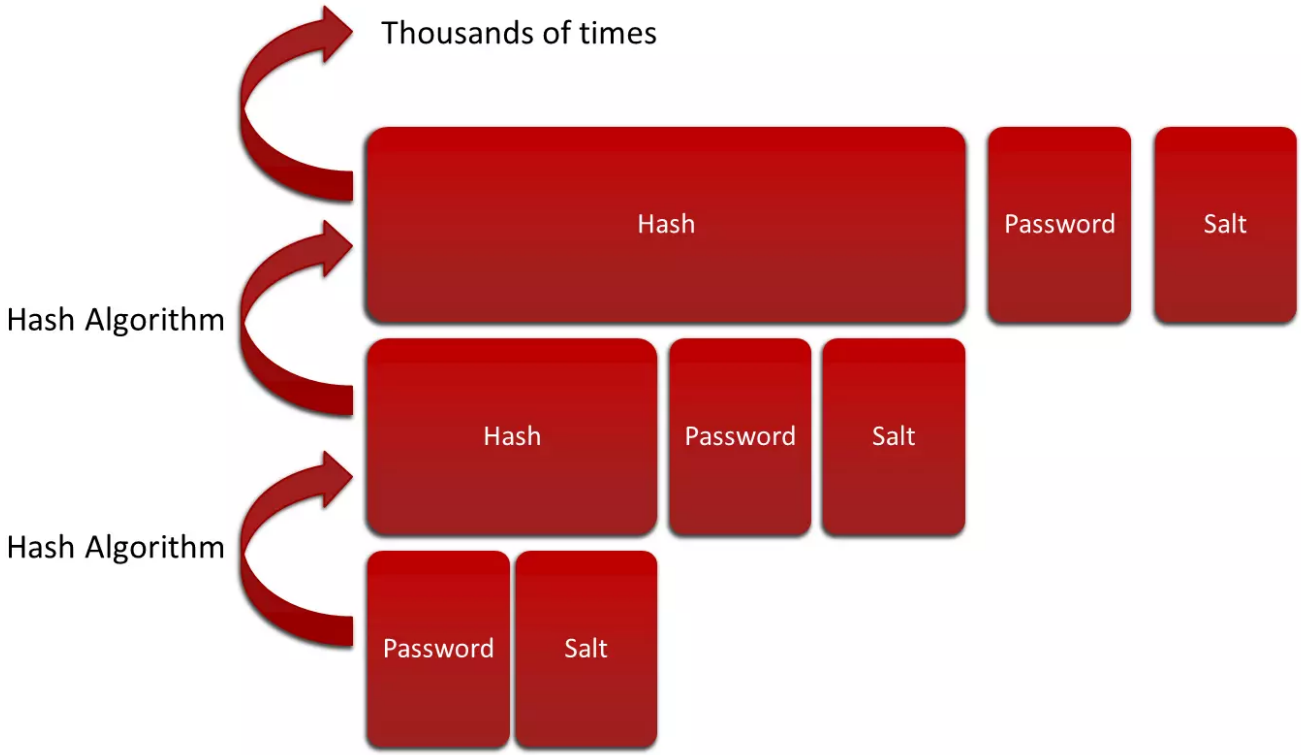


Quelle: Taylor, C.: Password Salting. `https://cyberhoot.com/cybrary/password-salting/` (Zugriff am 8.10.2022), 2020.

[3] Arias, D.: Adding Salt to Hashing: A Better Way to Store Passwords. `https://auth0.com/blog/adding-salt-to-hashing-a-better-way-to-store-passwords/` (Zugriff am 8.10.2022), 2021.

Strecken

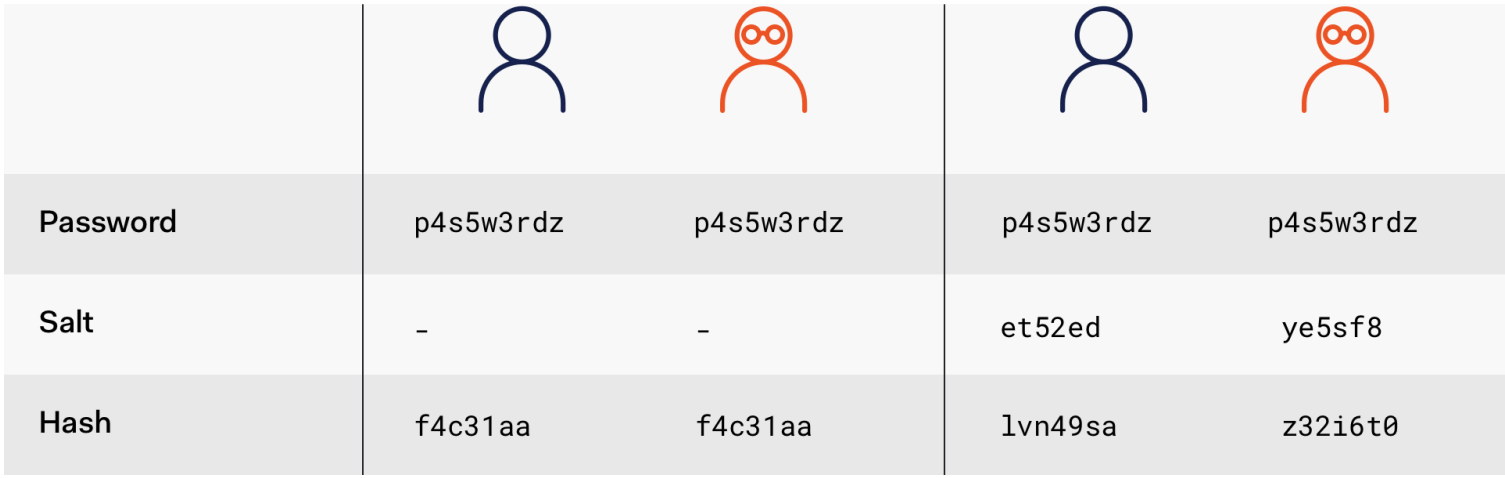
- Strecken: Berechnung durch wiederholtes Hashen verlängern
- Iterationen: $P_1 = \hat{H}(p, s), P_{n>1} = \hat{H}(P_{n-1}||p, s)$
- Gespeicherter Passworthash: P_N für große N, z.B. 10.000



Quelle: Romero, M. I.: Risks and Challenges of Password Hashing. `https://www.sitepoint.com/risks-challenges-password-hashing/` (Zugriff am 8.10.2022), 2014.

Angriffe auf sicher gespeicherte Passwörter I

- Rainbow Tables (vorberechnete Hashes, wenn kein Salz verwendet wird)
- Wörterbuchangriff (versuche eine Liste von üblichen Passwörtern)
- Brute Force (versuche alle Passwörter aus einer definierten Menge)



Password	`p4s5w3rdz`	`p4s5w3rdz`	`p4s5w3rdz`	`p4s5w3rdz`
Salt	`-`	`-`	`et52ed`	`ye5sf8`
Hash	`f4c31aa`	`f4c31aa`	`lvn49sa`	`z32i6t0`

Adaptiert aus Arias, D.: Adding Salt to Hashing: A Better Way to Store Passwords. `https://auth0.com/blog/adding-salt-to-hashing-a-better-way-to-store-passwords/` (Zugriff am 8.10.2022), 2021.

[3] Arias, D.: Adding Salt to Hashing: A Better Way to Store Passwords. `https://auth0.com/blog/adding-salt-to-hashing-a-better-way-to-store-passwords/` (Zugriff am 8.10.2022), 2021.

Angriffe auf sicher gespeicherte Passwörter II

- Brute-Force-Angriffe hängen vom angen. Passwortalphabet ab
- Beispiel: 8-Zeichen-Passwörter mit englischem Alphabet (nur Groß- und Kleinbuchstaben): Schlüsselraum ist
  $52^8 > 50^8 = \left(\frac{100}{2}\right)^8 = \frac{(10^2)^8}{2^8} = \frac{10^{16}}{2^8} = 2^2 \cdot \frac{10^{16}}{2^{10}} \approx 4 \cdot \frac{10^{16}}{10^3} = 4 \cdot 10^{13}$

- Wörterbuchangriffe sind nur erfolgreich, wenn das Passwort im Wörterbuch enthalten ist (andernfalls Brute-Force-Angriff erforderlich)
- Strecken kann Wörterbuch- **und** Brute-Force-Angriffe verlangsamen
- Salzen macht Rainbow Tables zwecklos

$\rightarrow$ Salzen und Strecken verwenden (besser: standardisierte Algorithmen)

$\rightarrow$ Benutzerempfehlung: Verwende einen Passwortmanager

[3] Arias, D.: Adding Salt to Hashing: A Better Way to Store Passwords. `https://auth0.com/blog/adding-salt-to-hashing-a-better-way-to-store-passwords/` (Zugriff am 8.10.2022), 2021.

Überblick über Transport Layer Security (TLS)

- Basiert auf inzwischen veraltetem Secure Sockets Layer (SSL)
- Protokoll, um sicheren Kanal zwischen Alice und Bob bereitzustellen
- Garantien
  - Authentifizierung (Bob ist immer authentifiziert, Alice optional)
  - Vertraulichkeit (nur Alice und Bob können Daten lesen, ein Angreifer aber nicht)
  - Integrität (Daten können nicht unerkannt von einem Angreifer verändert werden)
- Verwendet eine Vielfalt an kryptografischen Primitiven, z.B.
  - Asymmetrische Chiffren
  - Symmetrische Chiffren
  - Kryptografische Hashes
  - Digitale Signaturen
  - Digitale Zertifikate

[4] Rescorla, E.: The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3 (RFC 8446). `https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8446.html` (Zugriff am 26.10.2022), 2018.

Kurzwiederholung: Digitale Signaturen

- Vom Unterzeichner/Sender generiert und an die Nachricht angehängt
- Kann vom Empfänger (oder jedem anderen) überprüft werden
- Bewahrt die Nachrichtenintegrität anstatt der -privatsphäre
- Garantien
  - Die signierte Nachricht wurde nicht verändert
  - Die signierte Nachricht stammt vom Unterzeichner

  $\rightarrow$ Nichtabstreitbarkeit: Der Unterzeichner kann nicht behaupten, die Nachricht **nicht** unterzeichnet zu haben
- Basieren auf Kryptografie mit öffentlichen Schlüsseln und Hashes
  - Signatur: Hash der Nachricht, verschlüsselt mit dem geheimen Schlüssel
  - Signaturüberprüfung: Vergleiche Hash und entschlüsselte Signatur
  - Wenn die Signaturüberprüfung fehlschlägt, ist entweder die Nachricht verfälscht worden oder jemand anderer (ein anderer Schlüssel) hat die Nachricht signiert

Kurzwiederholung: Digitale Zertifikate

- Digitale Zertifikate
  - assoziieren einen öffentlichen Schlüssel mit einer Person/Entität
  - enthalten Daten zum Unterzeichner, der Person und zum Schlüssel
  - ist von einer vertrauenswürdigen Partei signiert
  - erlaubt die Überprüfung der Signatur und dadurch Identität-zu-Schlüssel-Übereinstimmung
  - Annahme: Vertrauenswürdige Partei, deren öffentlicher Schlüssel allen Parteien bekannt ist
- Zertifizierungsstellen (CAs)
  - wird vertraut, Zertifikate auszustellen
  - überprüfen die Identität des Besitzers oder der Entität
  - haben angenommenerweise einen bekannten öffentlichen Schlüssel
- Zertifizierungsstellenhierarchien (CA-Hierarchien)
  - Ausstellen von Zertifikaten ist an Sub-CA(s) delegiert
  - Mehrstufige Zertifikate von der CA zu(r) Sub-CA(s) zur Entität

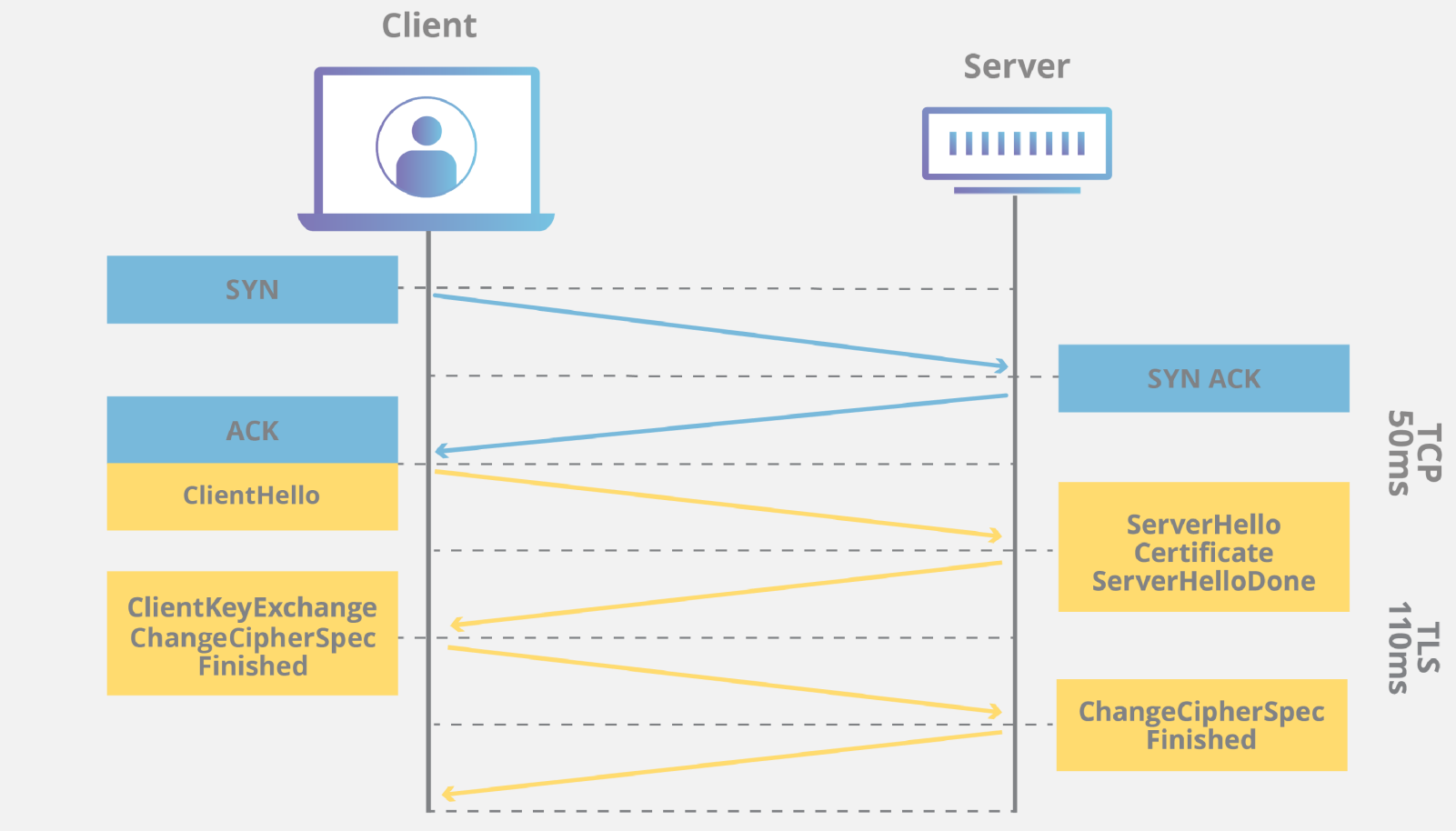
  $\rightarrow$ Hierarchisches Vertrauensmodell
  - Stammzertifizierungsstelle(n) signieren ihr(e) eigenes/n Zertifikat(e) selbst

Schlüssel- und Chiffre-Vereinbarung I

- TLS baut auf Transportprotokolle wie TCP auf
- Initialer Handshake
  - Authentifiziert kommunizierende Parteien durch Zertifikate
  - Verhandelt verwendete Chiffren (nicht jede Partei unterstützt jede Chiffre)
  - Führt Schlüsseltausch für Forward Secrecy durch
  - Manipulationssicher sogar gegen aktive Angreifer (die Nachrichten verändern)
- Verwendete kryptografische Primitive
  - Digitale Zertifikate zur Authentifizierung (vereinfacht)
  - Digitale Signaturen für unterstützte Chiffren und Zertifikate
  - (EC)DHE and ähnliche Protokolle zum Schlüsseltausch
  - Hashes der Abschrift (Abfolge von Handshake-Nachrichten)

[4] Rescorla, E.: The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3 (RFC 8446). `https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8446.html` (Zugriff am 26.10.2022), 2018.

Schlüssel- und Chiffre-Vereinbarung II



Quelle: Cloudflare: What is Transport Layer Security (TLS)?
`https://www.cloudflare.com/learning/ssl/transport-layer-security-tls/` (Zugriff am 26.10.2022), 2022.

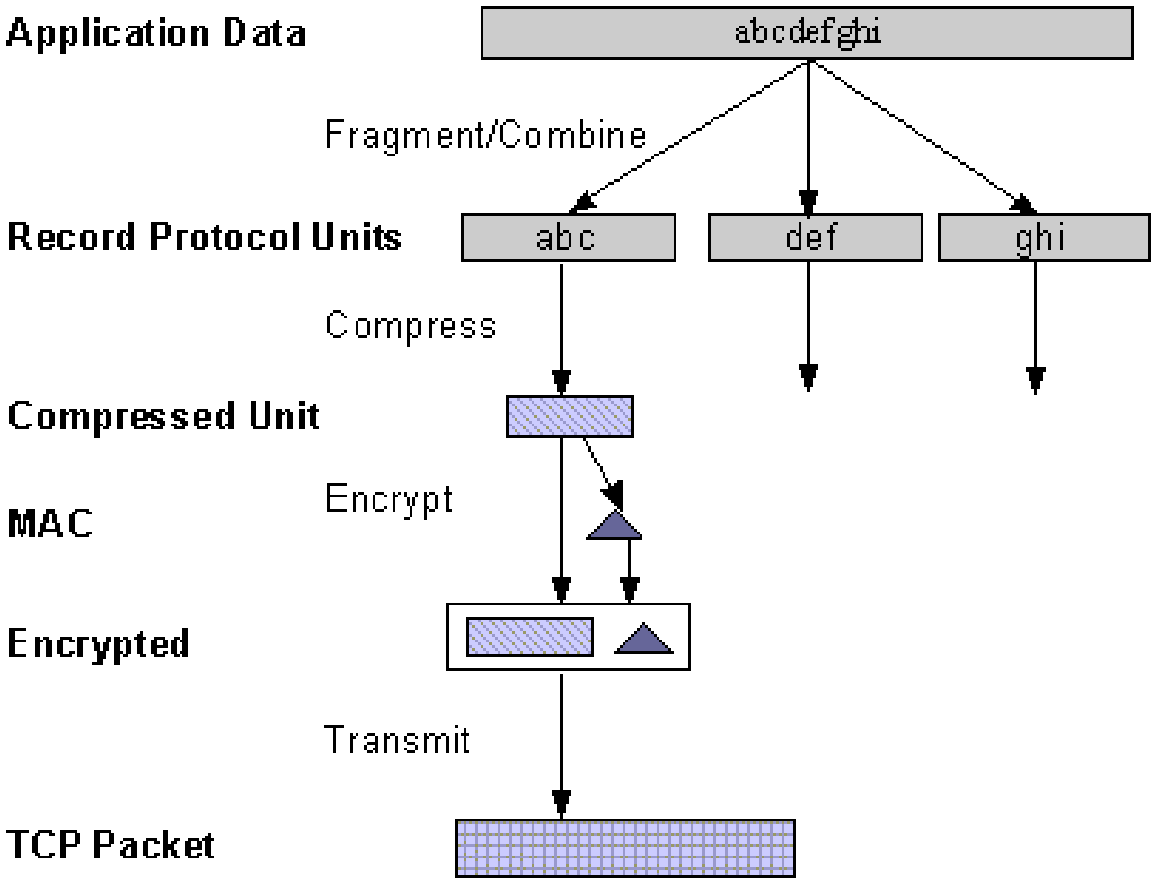
[4] Rescorla, E.: The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3 (RFC 8446).
`https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8446.html` (Zugriff am 26.10.2022), 2018.

Sicherer Nachrichtenaustausch I

- TLS kann Nachrichten nach beendetem Handshake austauschen
- Record-Protokoll
  1. (Alice) Nachricht wird in Blöcke aufgespalten
  2. (Alice) Blöcke (Records) werden geschützt
  3. (Alice) Geschützte Records werden übertragen
  4. (Bob) Geschützte Records werden empfangen
  5. (Bob) Geschützte Records werden überprüft und der Schutz entfernt
  6. (Bob) Blöcke (Records) werden wieder zu einer Nachricht zusammengesetzt
- Verwendete kryptografische Primitive
  - Symmetrische Block-Chiffren in ausgewählten Modi (ohne Details)
  - Message-Authentication-Codes (MACs, ähnlich wie Hashes, ohne Details)
- Optionaler Kompressionsschritt (ohne Details)

[4] Rescorla, E.: The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3 (RFC 8446). `https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8446.html` (Zugriff am 26.10.2022), 2018.

Sicherer Nachrichtenaustausch II



Quelle: The Apache Software Foundation: SSL/TLS Strong Encryption: An Introduction. `https://httpd.apache.org/docs/2.4/ssl/ssl_intro.html` (Zugriff am 26.10.2022), 2022.

[4] Rescorla, E.: The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3 (RFC 8446). `https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8446.html` (Zugriff am 26.10.2022), 2018.

Praktische Belange I

- Neuere Versionen von TLS implementieren neue Chiffren und Features
- SSL und ältere TLS-Versionen sind
  - verwundbar gegenüber bestimmten Angriffen (ohne Details)
  - unterstützen gebrochene Chiffren/Hashalgorithmen etc.
  - unterstützen schwache Algorithmen und Schlüssellängen

→ Abkündigung (engl. *deprecation*) oder Entfernung von mangelhaften/schwachen Algorithmen und Protokollteilen

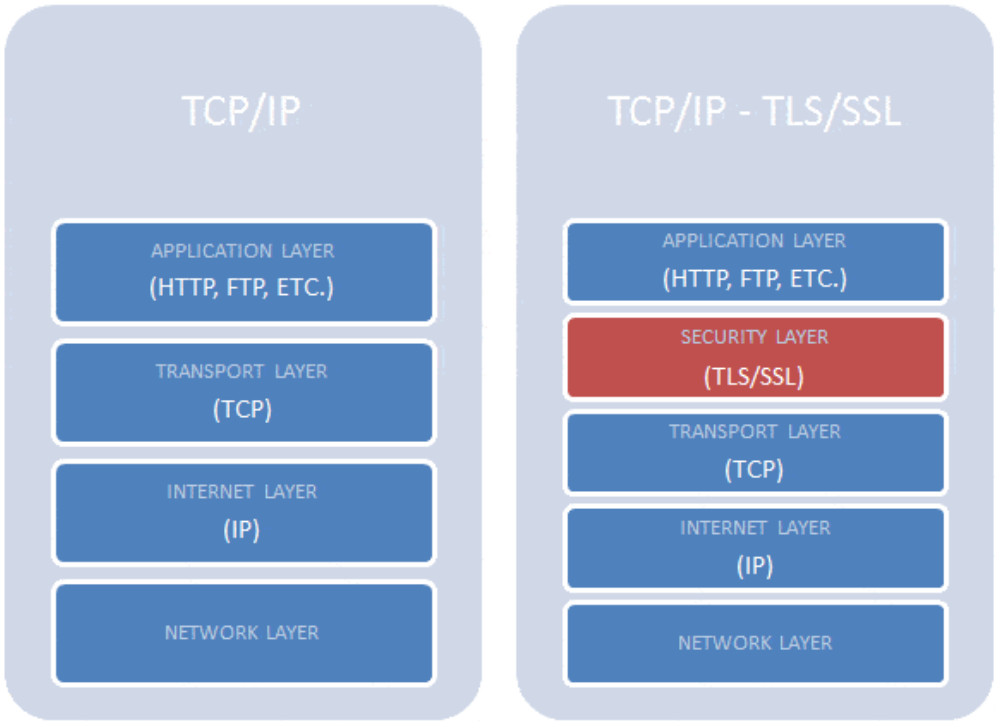
→ Versionierung (aktuell: TLS 1.3)

- Byte-für-Byte-Illustration einer TLS-1.3-Verbindung (inklusive Handshake): `https://tls13.xargs.org/`

[4] Rescorla, E.: The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3 (RFC 8446). `https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8446.html` (Zugriff am 26.10.2022), 2018.

Praktische Belange II

- TLS ist ausgelegt, um eine zusätzliche Schicht für Anwendungs(-niveau-)protokolle bereitzustellen

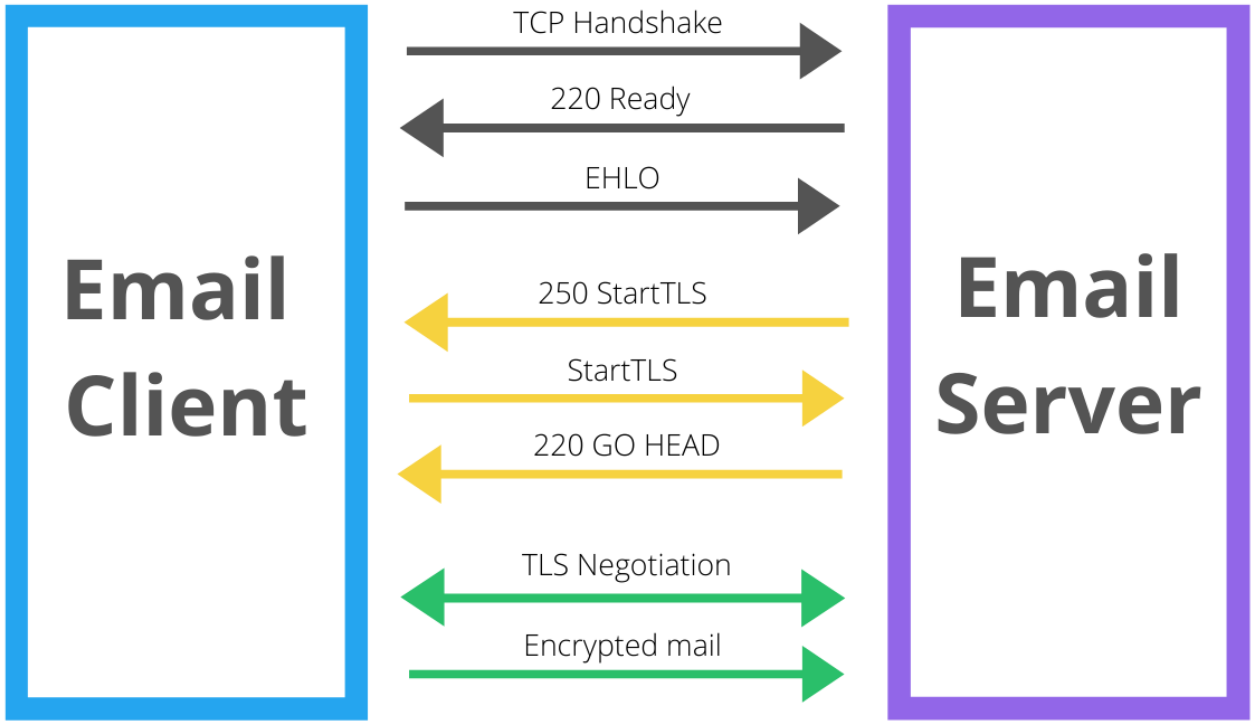


Quelle: Slaviero, M.: TLS/SSL and .NET Framework 4.0. `https://www.red-gate.com/simple-talk/development/dotnet-development/tlsssl-and-net-framework-4-0/` (Zugriff am 26.10.2022), 2011.

[4] Rescorla, E.: The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3 (RFC 8446). `https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8446.html` (Zugriff am 26.10.2022), 2018.

Praktische Belange III

- Nachrüstung ungeschützter Protokolle durch STARTTLS-Kommando



Quelle: Griffin, J.: What is StartTLS? `https://sendgrid.com/blog/what-is-starttls/` (Zugriff am 26.10.2022), 2020.

[5] Griffin, J.: What is StartTLS? `https://sendgrid.com/blog/what-is-starttls/` (Zugriff am 26.10.2022), 2020.

Praktische Protokolle (Auswahl)

- Praktische kryptografische Protokolle zur Illustration der kombinierten Verwendung von Kryptografie (wähle eines):
  - Masking (Smart-Meter-Datenaggregation) [6]
  - Proof-of-Work-Blockchains (elektronisches Geld) [7]
  - Wi-Fi Protected Access 3 (WPA3, drahtlose Kommunikation) [8, 9]
  - Inhaltsschutz (Videostreaming) [10, 11]
  - Weitere Themen (Vorschläge)

[6] Kursawe, K., Danezis, G. and Kohlweiss, M.: Privacy-friendly Aggregation for the Smart Grid. In PETS 2011: Privacy Enhanced Technology Symposium, pp. 175–191, 2011.
[7] Nakamoto, S.: Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. `https://bitcoin.org/bitcoin.pdf` (Zugriff am 26.10.2022), 2008.
[8] WiFi Alliance: WPA3™ Specification Version 3.0.
`https://www.wi-fi.org/downloads-public/WPA3_Specification_v3.0.pdf/35332` (Zugriff am 26.10.2022), 2020.
[9] WiFi Alliance: Wi-Fi Protected Access® Security Considerations.
`https://www.wi-fi.org/downloads-public/Security_Considerations_20210511.pdf/36067` (Zugriff am 26.10.2022), 2021.
[10] European Telecommunications Standards Institute and European Broadcasting Union: Digital Video Broadcasting (DVB); Content Protection and Copy Management (DVB-CPCM); Part 2: CPCM Reference Model (ETSI TS 102 825-2 V1.2.1), 2011.
[11] European Telecommunications Standards Institute and European Broadcasting Union: Digital Video Broadcasting (DVB); Content Protection and Copy Management (DVB-CPCM); Part 5: CPCM Security Toolbox (ETSI TS 102 825-5 V1.2.1), 2011.

Danke für die Aufmerksamkeit!

Fragen?