Aionda Mail Security Whitepaper

Zero-Knowledge · Post-Quantum · Made in Germany

Version 1.3 — May 2026

Aionda GmbH
Stuttgart, Germany

contact-46epp9ba@contact.aionda.com
https://mail.aionda.com

PUBLIC DOCUMENT

Contents

1. Zusammenfassung

Aionda Mail ist ein Zero-Knowledge-, Post-Quantum-verschlüsselter E-Mail-Dienst, betrieben von der Aionda GmbH in Stuttgart, Deutschland. Der Dienst kombiniert Wegwerf-E-Mail-Adressen (DEAs) mit einem vollständig verschlüsselten Postfach — eine Kombination, die kein anderer Anbieter bietet.

Zentrale Sicherheitseigenschaften:

- **Zero-Knowledge-Architektur:** Alle Ver- und Entschlüsselungen finden ausschließlich im Browser des Nutzers statt. Der Server hat zu keinem Zeitpunkt Zugriff auf E-Mail-Inhalte im sicheren Postfach, Passwörter oder Verschlüsselungsschlüssel.
- **Post-Quantum-Sicherheit:** Ein hybrider Key Encapsulation Mechanism (X25519 + ML-KEM-1024) schützt alle Daten sowohl gegen klassische als auch gegen Quantencomputer-Angriffe.
- **Zero-Knowledge-Authentifizierung:** Das OPAQUE-Protokoll (RFC 9807) stellt sicher, dass Passwörter niemals an den Server übertragen oder dort gespeichert werden — nicht einmal als Hashes.
- **Shamir Secret Sharing (2-of-3):** Der Vault Master Key wird in drei Anteile aufgeteilt, geschützt durch Passwort, Passkey und Wiederherstellungsschlüssel. Beliebige zwei Anteile rekonstruieren den Master Key.
- **Perfect Forward Secrecy:** Jede API-Anfrage verwendet ein einmaliges, einzigartiges kryptografisches Schlüsselpaar. Die Kompromittierung einer Anfrage betrifft keine andere.
- **MITM-Schutz (Guardian):** Die Browser-Erweiterung verifiziert alle Serverantworten unabhängig über Ed25519-Signaturen und erkennt Man-in-the-Middle-Angriffe durch TLS-Zertifikatsverifizierung — auch gegen Firmen-Proxys und kompromittierte CDNs.
- **GoBD-konformes E-Mail-Archiv:** Enterprise-Konten profitieren von einer manipulationssicheren Hash-Kette (SHA3-256 Blockchain) mit Ende-zu-Ende-verschlüsseltem Inhalt (Hybrid KEM), vollständigem Audit Trail, Legal Hold und konfigurierbarer Aufbewahrung — konform mit den deutschen GoBD-Vorschriften.
- **Kein Passwort-Recovery:** Bei Verlust des Passworts und aller Wiederherstellungsmethoden sind die Daten unwiederbringlich verloren. Das ist beabsichtigt — es beweist, dass der Server nicht auf die Nutzerdaten zugreifen kann.

Rechtsraum: Deutsches Recht (DSGVO/GDPR), keine Datenweitergabe an ausländische Geheimdienste.

---

2. Bedrohungsmodell

2.1 Wovor Aionda Mail schützt

Bedrohung	Schutz
Serverkompromittierung (Datenbankleck, Insider-Zugriff)	Alle E-Mail-Inhalte mit Schlüsseln verschlüsselt, die der Server nie besitzt
Netzwerküberwachung (ISP, WLAN, CDN)	Ende-zu-Ende-verschlüsselter API-Transport via Hybrid KEM

Bedrohung	Schutz
CloudFlare-Inspektion	API-Anfragen werden verschlüsselt, bevor sie den Browser verlassen; CloudFlare sieht nur Chiffretext. Die Guardian-Erweiterung erkennt Antwortmanipulation über Ed25519-Signaturen
Firmen-MITM-Proxys (ZScaler, Fortinet, etc.)	Guardian-Erweiterung erkennt Proxy-Zertifikate über Aussteller-Blocklist (Firefox)
Quantencomputer-Angriffe (“harvest now, decrypt later”)	ML-KEM-1024 (NIST FIPS 203) bietet Post-Quantum-Resistenz
Passwort-Datenbankdiebstahl	OPAQUE speichert nur kryptografische Records, keine Passwort-Hashes
Offline-Brute-Force-Angriffe auf Passwörter	OPAQUE verhindert Offline-Angriffe; serverseitige Ratenlimitierung verhindert Online-Angriffe
Analyse der E-Mail-Größe	Bucket Padding verschleiert die tatsächlichen E-Mail-Größen
Kompressions-Seitenkanäle (CRIME/BREACH)	Bucket Padding wird nach der Kompression angewendet
Nutzerenumeration	Deterministische Fake-Antworten für nicht existierende Konten

2.2 Wovor Aionda Mail NICHT schützt

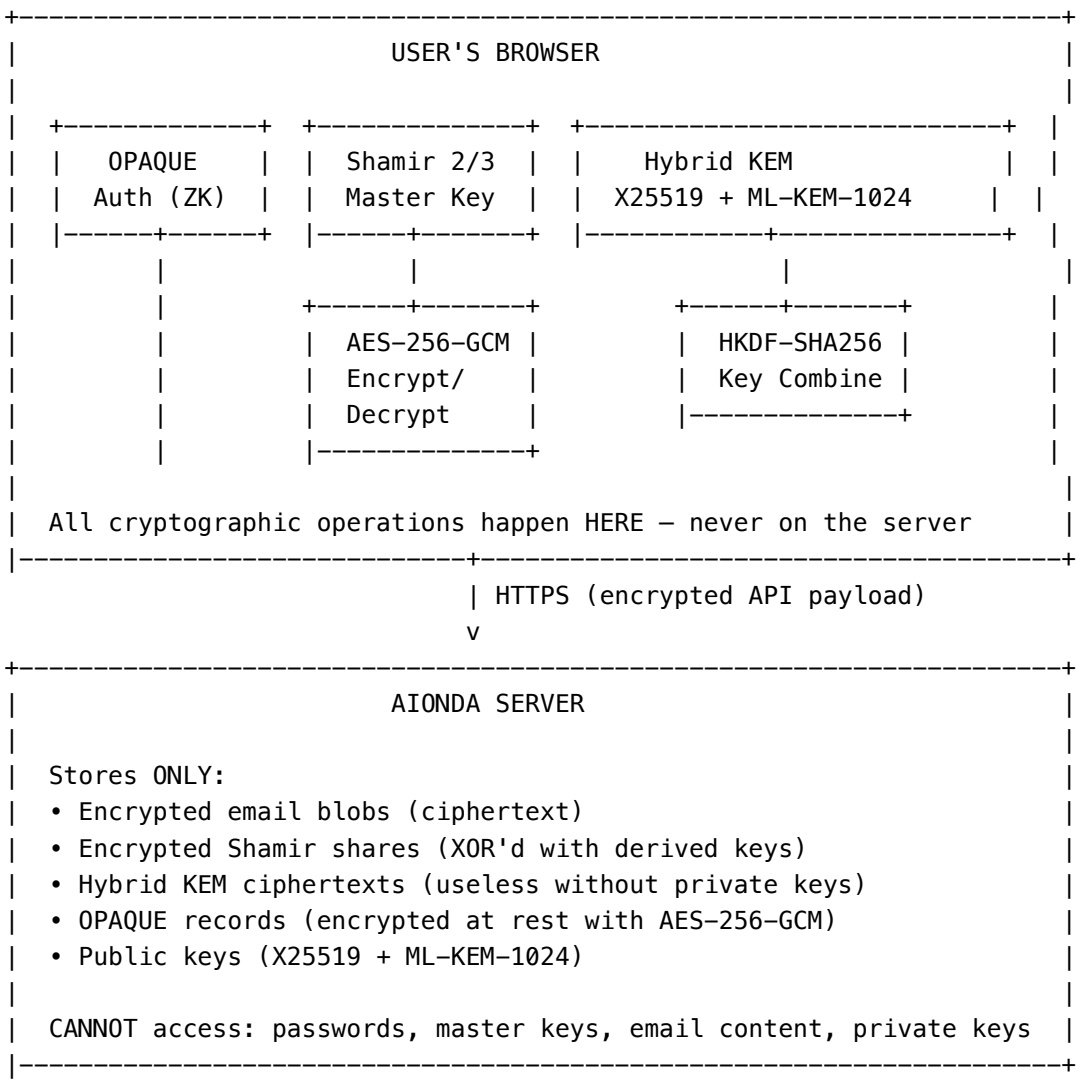
Einschränkung	Erklärung
Kompromittiertes Gerät	Wenn Malware den Browser kontrolliert, kann sie entschlüsselte Inhalte lesen
Metadaten an externe Empfänger	E-Mails an Gmail/Outlook reisen nach Verlassen unserer Server unverschlüsselt (sofern nicht PGP verwendet wird)
E-Mail-Metadaten auf unseren Servern	Zeitstempel, IP-Adressen und verschlüsselte E-Mail-Größen sind für den Server sichtbar
Vertrauen bei Web-Zustellung	Der Browser lädt bei jedem Besuch JavaScript von unseren Servern herunter (siehe Abschnitt 18 für Gegenmaßnahmen)
Rubber-Hose-Kryptoanalyse	Kein kryptografisches System schützt gegen physischen Zwang

2.3 Designprinzip

Aionda Mail folgt dem **“Honest Server”-Modell**: Das System ist so konzipiert, dass selbst ein vollständig kompromittierter Server — oder ein böswilliger Betreiber — die Nutzerdaten nicht entschlüsseln kann. Sicherheit basiert nicht auf Vertrauen in uns. Sie basiert auf Mathematik.

---

3. Architekturübersicht



3.1 Komponentenübersicht

Komponente	Zweck	Ort
OPAQUE (RFC 9807)	Zero-Knowledge-Passwort-Authentifizierung	Client + Server
Shamir Secret Sharing	Vault Master Key Schutz (2-of-3 Threshold)	Nur Client
Hybrid KEM (X25519 + ML-KEM-1024)	Post-Quantum Key Encapsulation für E-Mails	Client + Server

Komponente	Zweck	Ort
AES-256-GCM	Authentifizierte symmetrische Verschlüsselung	Client + Server
HKDF-SHA256	Schlüsselableitung aus hybriden Shared Secrets	Client + Server
BIP39	Wiederherstellungsschlüssel-Kodierung (24-Wort-Mnemonik)	Nur Client
WebAuthn PRF	Passkey-basiertes Vault-Unlock	Nur Client
Bucket Padding	Seitenkanalschutz	Client + Server

---

4. Zero-Knowledge-Authentifizierung (OPAQUE)

4.1 Warum kein Passwort-Hashing?

Traditionelle Dienste speichern Passwort-Hashes (bcrypt, Argon2). Obwohl das besser als Klartext ist, hat dieser Ansatz grundlegende Schwächen:

- Der Server sieht das Passwort während des Logins (auch wenn nur kurz im RAM)
- Passwort-Hashes können offline per Brute-Force geknackt werden, wenn die Datenbank gestohlen wird
- Der Server könnte so modifiziert werden, dass er Passwörter mitloggt

OPAQUE eliminiert alle drei Probleme. Das Passwort verlässt niemals den Browser — nicht als Klartext, nicht als Hash, in keiner Form.

4.2 Wie OPAQUE funktioniert

OPAQUE (RFC 9807) ist ein asymmetrisches Password-Authenticated Key Exchange (aPAKE) Protokoll. Es verwendet einen kryptografischen Challenge-Response-Mechanismus, bei dem der Server verifizieren kann, dass der Nutzer das richtige Passwort kennt, ohne jemals zu erfahren, wie dieses Passwort lautet.

Registrierung (einmalig):

```
Browser                                  Server
--------                                 ------
1. Generate OPAQUE registration     →
   request from password

                                         2. Create OPAQUE registration
                                            response (blind evaluation)
                                    ←
3. Finalize registration            →    4. Store encrypted OPAQUE
   (export_key available)                   record (AES-256-GCM at rest)
```

Login (bei jeder Sitzung):

```
Browser                                  Server
--------                                 ------
```

```
1. Generate login request (KE1)     →     2. Look up encrypted OPAQUE record
   from password                              Decrypt with server key
                                              Generate response (KE2)
                                    ←
3. Verify server response
   Compute session key + KE3        →     4. Verify KE3 (cryptographic proof)
   Password verified locally!                 If valid: session authenticated
                                              If invalid: reject (max 3 attempts)
```

Zentrale Eigenschaften:

- Das Passwort wird **clientseitig** in Schritt 3 verifiziert — der Server sieht es nie
- Der Server speichert einen **OPAQUE Record**, der kein Passwort-Hash ist und nicht offline per Brute-Force geknackt werden kann
- OPAQUE Records werden zusätzlich **at rest mit AES-256-GCM** unter Verwendung eines serverseitigen Schlüssels verschlüsselt
- **Schutz vor Nutzerenumeration**: Nicht existierende Konten erhalten deterministische Fake-Antworten mit identischem Timing
- **Ratenlimitierung**: Maximal 3 Authentifizierungsversuche pro Sitzung, 120 Sekunden Sitzungs-Timeout

4.3 Implementierung

- **Bibliothek:** `@serenity-kit/opaque` (WASM-basiert, produktionsreif)
- **Serverkomponente:** Dedizierter Microservice für kryptografische OPAQUE-Operationen
- **Base64-Format:** base64url (URL-sicher, ohne Padding) für Protokollkompatibilität
- **Audit-Logging:** Alle Authentifizierungsereignisse mit Zeitstempeln und IP-Adressen protokolliert

4.4 SRP-Migration

Legacy-Konten, die SRP-6a verwenden, werden beim nächsten Login automatisch zu OPAQUE migriert. Nach der Migration wird der SRP-Verifier dauerhaft gelöscht. Die Migration ist einmalig — Konten können nicht zu SRP zurückkehren.

---

5. Vault Master Key & Shamir Secret Sharing

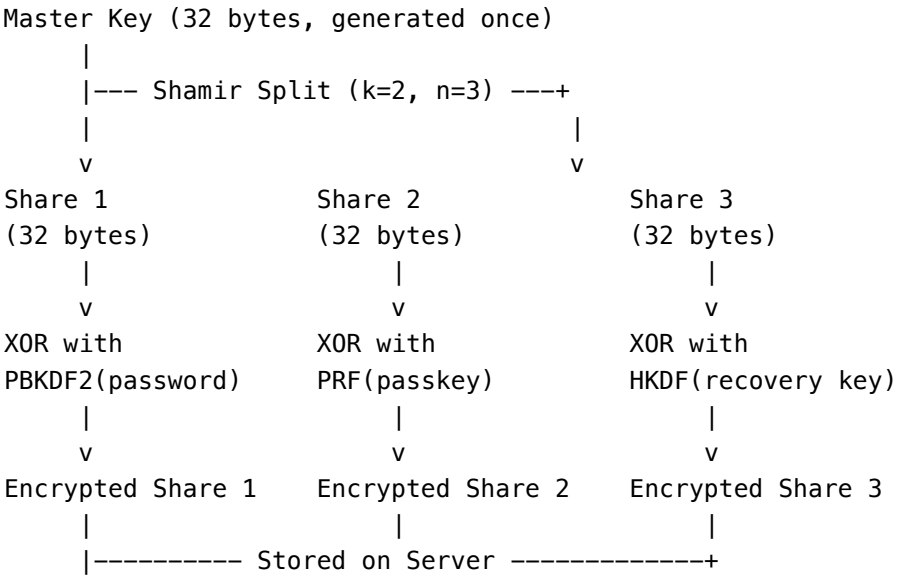
5.1 Master Key Generierung

Wenn ein Nutzer das verschlüsselte Postfach aktiviert, wird ein **256-Bit (32-Byte) Master Key** mit dem kryptografisch sicheren Zufallszahlengenerator des Browsers (`crypto.getRandomValues`) generiert.

Dieser Master Key ist die Wurzel aller Verschlüsselung. Er verlässt niemals den Browser im Klartext. Er wird nirgendwo gespeichert — nicht im Browser, nicht auf dem Server, in keiner Form.

5.2 Shamir Secret Sharing (2-of-3)

Der Master Key wird mittels **Shamirs Secret Sharing**-Verfahren über dem Galois-Feld GF(2^8) mit dem AES-irreduziblen Polynom (x^8 + x^4 + x^3 + x + 1) in drei Anteile aufgeteilt.



Threshold-Eigenschaft: Beliebige 2 der 3 Anteile reichen aus, um den Master Key via Lagrange-Interpolation zu rekonstruieren. Der Server speichert nur die verschlüsselten Anteile — und kann keinen davon entschlüsseln.

5.3 Anteilsschutz

Jeder Anteil wird mit einem Schlüssel per XOR verknüpft, der aus einem anderen Authentifizierungsfaktor abgeleitet wird:

Anteil	Geschützt durch	Schlüsselableitung
Anteil 1	Passwort	PBKDF2-SHA256, 600.000 Iterationen, 32-Byte-Zufallssalt
Anteil 2	Passkey (FIDO2)	WebAuthn PRF Extension, hardwaregebunden
Anteil 3	Wiederherstellungsschlüssel	HKDF-SHA3-256 mit kontogebundenem Salt

Rekonstruktionsszenarien:

- **Normaler Login:** Passwort (Anteil 1) + Passkey (Anteil 2) → Master Key
- **Passkey verloren:** Passwort (Anteil 1) + Wiederherstellungsschlüssel (Anteil 3) → Master Key
- **Passwortwechsel:** Passkey (Anteil 2) + Wiederherstellungsschlüssel (Anteil 3) → Master Key

5.4 Session-Storage-Schutz

Selbst innerhalb einer Browser-Sitzung wird der Master Key niemals im Klartext gespeichert:

1. Ein ephemerer AES-256-Schlüssel wird generiert
2. Der Master Key wird mit diesem ephemeren Schlüssel verschlüsselt
3. Nur der verschlüsselte Blob wird in `sessionStorage` abgelegt
4. Der ephemere Schlüssel existiert nur im JavaScript-Speicher (wird beim Schließen des Tabs garbage-collected)

---

6. Post-Quantum Hybrid KEM

6.1 Warum Post-Quantum?

Quantencomputer, die Shors Algorithmus ausführen, könnten klassische Public-Key-Kryptografie (RSA, ECDH, X25519) in polynomialer Zeit brechen. Obwohl großskalige Quantencomputer noch nicht existieren, ist die Bedrohung durch **"harvest now, decrypt later"**-Angriffe real: Angreifer könnten verschlüsselte Daten heute speichern und entschlüsseln, sobald Quantencomputer verfügbar werden.

6.2 Hybrider Ansatz

Aionda Mail verwendet einen **hybriden Key Encapsulation Mechanism**, der kombiniert:

- **X25519** (Curve25519 ECDH) — bewährte klassische Sicherheit, 128-Bit-Sicherheitsniveau
- **ML-KEM-1024** (NIST FIPS 203, ehemals Kyber-1024) — Post-Quantum-Sicherheit, NIST Security Level 5

Der hybride Ansatz bietet **Defense-in-Depth**: Der kombinierte Schlüssel ist sicher, solange **mindestens einer** der beiden Algorithmen ungebrochen bleibt.

6.3 Encapsulation-Prozess

```
Sender (encrypting an email):

1. Generate ephemeral X25519 keypair
2. X25519 key agreement with recipient's public key
   → x25519SharedSecret (32 bytes)

3. ML-KEM-1024 encapsulation with recipient's public key
   → mlKemSharedSecret (32 bytes) + mlKemCiphertext (1568 bytes)

4. Combine secrets:
   combinedSecret = x25519SharedSecret || mlKemSharedSecret  (64 bytes)

5. Derive final key:
   sharedSecret = HKDF-SHA256(
       ikm = combinedSecret,
       salt = nil,
       info = "trashmail-hybrid-kem-v1",
       length = 32
   )

6. Use sharedSecret to wrap the email's ephemeral AES-256 key
```

6.4 Decapsulation-Prozess

```
Recipient (decrypting an email):

1. X25519 key agreement:
   x25519Shared = X25519(recipientPrivateKey, ephemeralPublicKey)
```

```
2. ML-KEM-1024 decapsulation:
   mlKemShared = ML-KEM-1024.Decapsulate(mlKemCiphertext, recipientPrivateKey)

3. Combine and derive (identical to sender):
   sharedSecret = HKDF-SHA256(x25519Shared || mlKemShared, "trashmail-hybrid-kem-v1")

4. Unwrap email's ephemeral AES-256 key using sharedSecret
5. Decrypt email content with ephemeral key
```

6.5 Schlüsselgrößen

Parameter	Größe	Standard
X25519 public key	32 bytes	RFC 7748
X25519 private key	32 bytes	RFC 7748
ML-KEM-1024 public key	1.568 bytes	NIST FIPS 203
ML-KEM-1024 private key	3.168 bytes	NIST FIPS 203
ML-KEM-1024 ciphertext	1.568 bytes	NIST FIPS 203
Combined shared secret	32 bytes	HKDF-SHA256 output

6.6 Bibliothek

- **ML-KEM-1024:** `@noble/post-quantum` (auditiert, reine JavaScript-Implementierung)
- **X25519:** WebCrypto API (`crypto.subtle.deriveBits`)
- **HKDF:** `@noble/hashes` (RFC 5869 konform)

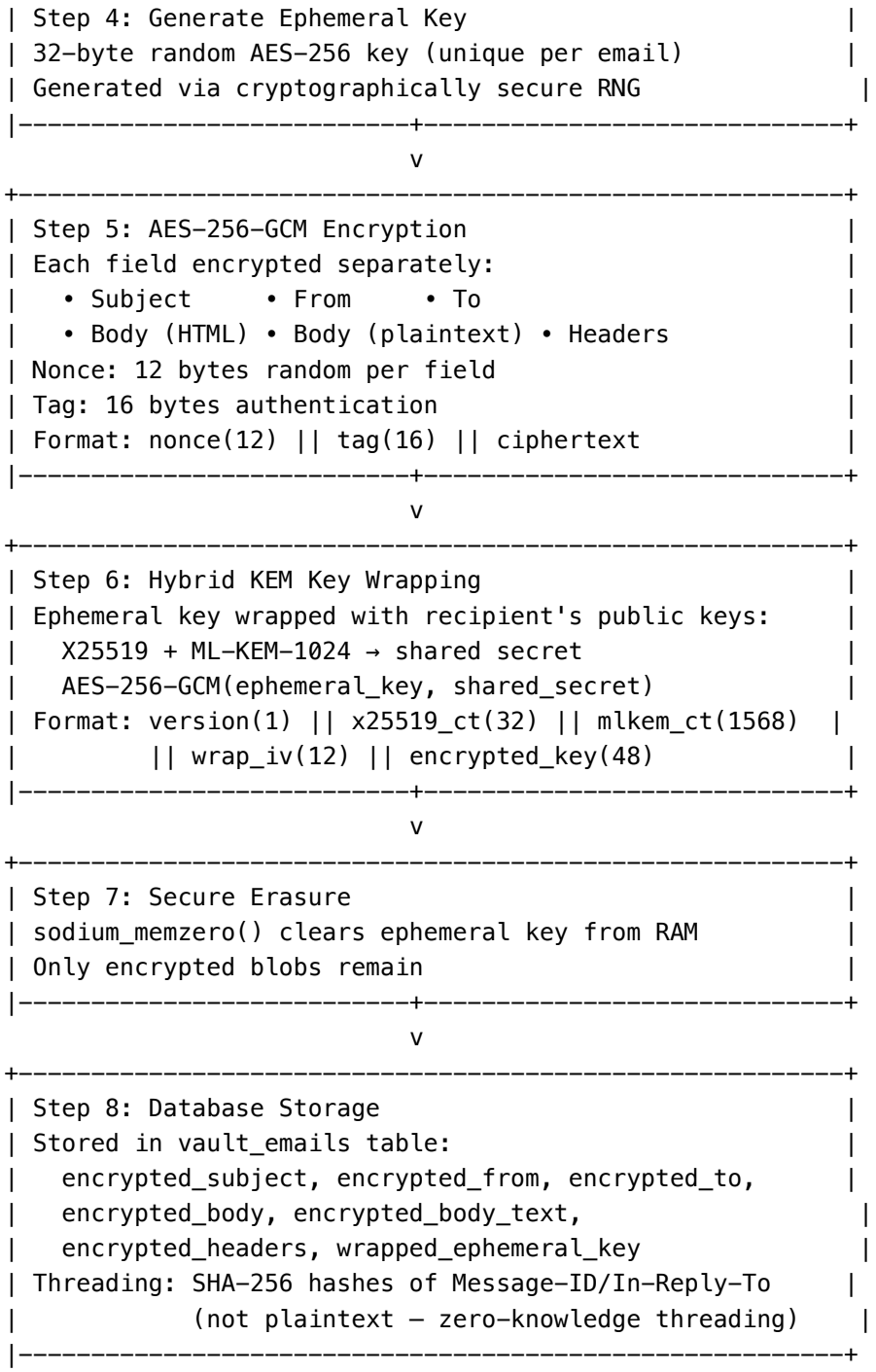
---

7. E-Mail-Verschlüsselungspipeline

7.1 Eingehende E-Mail (SMTP Verschlüsselte Speicherung)

Wenn eine E-Mail bei Aionda Mails SMTP-Server eintrifft:

```
+-----------------------------------------------------------+
| Step 1: SMTP Reception                                    |
| Mail server receives email → passes to SMTP handler       |
|---------------------------+-------------------------------+
                            v
+-----------------------------------------------------------+
| Step 2: Compression (optional)                            |
| gzip level 6 for text content                             |
| Skipped for: JPEG, PNG, MP4, ZIP, PDF, DOCX, etc.         |
|---------------------------+-------------------------------+
                            v
+-----------------------------------------------------------+
| Step 3: Bucket Padding                                    |
| Pad to fixed-size bucket (256B, 512B, 1KB, ..., 16MB)     |
| Format: 0xDEAD || length(4B) || data || random padding    |
|---------------------------+-------------------------------+
                            v
+-----------------------------------------------------------+
```



7.2 E-Mail lesen (Browser-Entschlüsselung)

Der umgekehrte Prozess findet vollständig im Browser statt:

1. Verschlüsselte E-Mail vom Server über die verschlüsselte API abrufen
2. Wrapped Ephemeral Key parsen (X25519-Chiffretext + ML-KEM-Chiffretext extrahieren)
3. **Hybrid KEM Decapsulation** mit den Vault Private Keys Shared Secret
4. Ephemeren AES-256-Schlüssel entpacken
5. **AES-256-GCM-Entschlüsselung** jedes Feldes (Betreff, Von, An, Body, Headers)
6. Byte-Reihenfolge anpassen: Server-Format (nonce || tag || ct) WebCrypto-Format

(nonce || ct || tag)
7. Bucket Padding entfernen (0xDEAD Magic Bytes erkennen)
8. Dekomprimieren falls gzip (0x1F8B Magic Bytes erkennen)
9. UTF-8 zu Klartext dekodieren

7.3 E-Mail senden

Beim Verfassen und Senden einer E-Mail:

1. Der Client verschlüsselt den E-Mail-Inhalt mit einem Challenge-Response-Protokoll
2. Der Server empfängt den verschlüsselten Payload, entschlüsselt ephemer (nur im Speicher) und sendet via SMTP
3. Der Server gibt die generierten MIME-Header an den Client zurück (verschlüsselt)
4. Der Client verschlüsselt eine Kopie mit dem Vault Master Key und speichert sie im Gesendet-Ordner
5. Der ephemere serverseitige Klartext wird sofort verworfen — nie auf die Festplatte geschrieben

7.4 Anhänge

Jeder Anhang wird unabhängig verschlüsselt:

- Separater ephemerer AES-256-Schlüssel pro Anhang
- Separates Hybrid KEM Key Wrapping pro Anhang
- Dateiname und MIME-Typ separat verschlüsselt
- Keine Kompression für bereits komprimierte Formate (JPEG, ZIP, PDF, etc.)

7.5 E-Mail-Threading (Zero-Knowledge)

E-Mail-Threading (Gruppierung zusammengehöriger E-Mails) verwendet ausschließlich **SHA-256-Hashes** der Message-ID- und In-Reply-To-Header. Der Server sieht nie die tatsächlichen Message-ID-Strings — er kann E-Mails anhand der Hash-Gleichheit gruppieren, ohne den Inhalt zu kennen.

---

8. Verschlüsselte API-Transportschicht

8.1 Problem

Selbst mit HTTPS können bestimmte Zwischeninstanzen den Datenverkehr inspizieren:

- **CloudFlare** (CDN/DDoS-Schutz) terminiert TLS und kann Klartext-Anfragen sehen
- **Firmen-Proxys** können TLS-Inspektion durchführen
- **API-Parameter** (wie `?cmd=read_email&id=123`) verraten Metadaten

8.2 Lösung: Ende-zu-Ende-verschlüsselte API

Die gesamte API-Kommunikation wird zusätzlich Ende-zu-Ende zwischen Browser und Anwendungsserver verschlüsselt, innerhalb des HTTPS-Tunnels:

```
Browser                                    Server
--------                                   ------

Phase 1: Key Exchange (once per session)
```

```
------------------------------------
GET /get_encryption_keys          →         Return 20 pre-generated
                                            Hybrid KEM keypairs
                                  ←         {uuid, x25519_pub, mlkem_pub}

Phase 2: Encrypted Request (every API call)
------------------------------------
1. Pick random keypair from cache
2. Hybrid KEM encapsulate → shared secret
3. gzip compress request payload
4. Bucket-pad compressed data
5. AES-256-GCM encrypt with shared secret
6. Generate ephemeral response keypair
7. POST /e {                      →         8.  Validate key ownership
     encrypted_payload,                     9.  Hybrid KEM decapsulate
     key_uuid,                              10. AES-256-GCM decrypt
     x25519_ciphertext,                     11. Decompress
     mlkem_ciphertext,                      12. Route to API controller
     response_x25519_pub,                   13. Execute business logic
     response_mlkem_pub                     14. Encrypt response with
   }                                            client's response keys
                                  ←         15. Return encrypted response
16. Hybrid KEM decapsulate response
17. AES-256-GCM decrypt
18. Decompress → plaintext response
```

8.3 Zentrale Eigenschaften

- **Einmalverwendung:** Jedes API-Schlüsselpaar wird genau einmal verwendet und dann dauerhaft invalidiert
- **Perfect Forward Secrecy:** Die Kompromittierung eines Request-Schlüssels betrifft keinen anderen Request
- **Sitzungsgebunden:** Schlüssel werden von einer bestimmten Sitzung beansprucht und können nicht von einer anderen wiederverwendet werden
- **Schlüsselpool:** Der Server hält ca. 100.000 vorgegenerierte Schlüsselpaare bereit
- **Auto-Refetch:** Der Client fordert automatisch neue Schlüssel an, wenn der Cache unter 10 fällt
- **Schlüssel-TTL:** Beanspruchte Schlüssel verfallen nach 24 Stunden
- **Bidirektional:** Sowohl Request ALS AUCH Response sind verschlüsselt — der Server gibt niemals Klartext zurück

8.4 Was CloudFlare sieht

Mit dieser Architektur sieht CloudFlare (oder jeder TLS-terminierende Proxy) nur:

- `POST /e` — einen einzelnen, opaken Endpunkt
- Einen binären Blob verschlüsselter Daten
- Keine API-Befehlsnamen, keine Parameter, keine E-Mail-IDs, keine Nutzerdaten

---

9. Ordnerfreigabe-Kryptografie

9.1 Freigabemodell

Nutzer können verschlüsselte Ordner mit anderen Aionda-Mail-Nutzern teilen. Der Freigabemechanismus verwendet den Hybrid KEM, um einen ordnerspezifischen Schlüssel für jeden Empfänger zu verschlüsseln.

9.2 Freigabe-Ablauf

```
Folder Owner                                          Recipient
------------                                          ---------

1. Derive folder key from master key:
   folderKey = HKDF-SHA256(masterKey, folderUuid)

2. Fetch recipient's public keys:
   recipient.x25519_pub (32 bytes)
   recipient.mlkem_pub (1568 bytes)

3. Hybrid KEM encapsulate:
   hybridEncapsulate(recipient.x25519_pub, recipient.mlkem_pub)
   → {x25519Ciphertext, mlKemCiphertext, sharedSecret}

4. Encrypt folder key:
   wrappedKey = AES-256-GCM(folderKey, sharedSecret, nonce)

5. Store on server:
   {x25519_ct, mlkem_ct, nonce, wrappedKey, permissions}

                                                      6. Fetch sharing record from server

                                                      7. Hybrid KEM decapsulate:
                                                         hybridDecapsulate(x25519_ct, mlkem_ct,
                                                           own_x25519_priv, own_mlkem_priv)
                                                         → sharedSecret

                                                      8. Decrypt folder key:
                                                         folderKey = AES-GCM-decrypt(
                                                           wrappedKey, sharedSecret, nonce)

                                                      9. Decrypt emails in folder using folderKe
```

9.3 Berechtigungsmodell

Berechtigung	Fähigkeit
`readonly`	Ordner-E-Mails lesen (nur Entschlüsselung)
`einliefern`	Neue E-Mails in den Ordner einfügen
`bearbeiten`	Ordnerinhalte bearbeiten
`antworten`	Auf E-Mails innerhalb des Ordners antworten
`vollzugriff`	Voller Zugriff einschließlich Eigentumsübertragung

9.4 Cross-Vault Copy (Re-Wrapping)

Wenn ein Empfänger eine E-Mail aus einem geteilten Ordner in seinen eigenen Vault kopiert, muss der E-Mail-Schlüssel für sein eigenes Hybrid-KEM-Schlüsselpaar **re-wrapped** werden. Dies geschieht vollständig clientseitig:

1. Shared Folder Key mit den privaten Schlüsseln des Empfängers entschlüsseln
2. Ephemeren Schlüssel der E-Mail mit dem Folder Key entschlüsseln
3. Ephemeren Schlüssel mit den eigenen öffentlichen Schlüsseln des Empfängers erneut encapsulieren
4. Re-wrapped Kopie im Vault des Empfängers speichern

Der Server erleichtert den Transfer, sieht aber nie irgendein Schlüsselmaterial im Klartext.

---

10. Vault Drive — Verschlüsselter Dokumentenspeicher

Vault Drive ist der Zero-Knowledge-Dokumentenspeicher von Aionda Mail. Im Gegensatz zu E-Mails, die ephemere Schlüssel pro Nachricht verwenden, nutzt Drive eine **Per-File-Key-Architektur**: Jedes Dokument bekommt einen eigenen 32-Byte AES-256-GCM-Schlüssel, der clientseitig generiert und mit dem Master Key gewrapped wird.

10.1 Warum Per-File-Key?

Die Per-File-Key-Architektur bietet drei zentrale Vorteile:

1. **Granulares Teilen:** Einzelne Dokumente können geteilt werden, ohne den Master Key preiszugeben. Der Server re-wrappt lediglich den File Key für den Empfänger — der Inhalt bleibt unverändert.
2. **Compromise Isolation:** Wird ein einzelner File Key kompromittiert (z.B. über einen geteilten Link), sind alle anderen Dokumente weiterhin geschützt.
3. **Effizientes Sharing ohne Re-Encryption:** Beim Teilen muss der Inhalt nicht neu verschlüsselt werden — alle Empfänger lesen denselben Ciphertext mit einem re-wrapped Key.

10.2 Upload-Ablauf

```
Client                                                  Server
------                                                  ------

1. Generiere zufälligen File Key:
   fileKey = randomBytes(32)

2. Verschlüssele Content, Name, MIME-Typ:
   encContent = AES-256-GCM(content, fileKey, nonce1)
   encName    = AES-256-GCM(name,    fileKey, nonce2)
   encMime    = AES-256-GCM(mime,    fileKey, nonce3)

3. Wrappe File Key mit Master Key:
   wrappedKey = AES-256-GCM(fileKey, masterKey, nonce4)

4. Sende verschlüsseltes Paket:
```

```
   POST /e {
     encContent, encName, encMime,
     wrappedKey, wrappedKeyNonce
   }
                                                    5. Speichere in vault_files + vault_file_c
                                                       (reine Ciphertexte, kein Schlüsselmater
```

10.3 Download-Ablauf

```
1. Lade Chunk + wrapped_key vom Server
2. Unwrap File Key:
   fileKey = AES-256-GCM-decrypt(wrappedKey, masterKey, nonce)
3. Entschlüssele Content, Name, MIME:
   content = AES-256-GCM-decrypt(encContent, fileKey, nonce1)
```

Die Entschlüsselung findet in einem **Web Worker** statt, der den Master Key nur temporär im Speicher hält. Nach der Operation wird der Speicher überschrieben.

10.4 Sharing — Nur Schlüssel-Rewrap

Der zentrale Vorteil von Per-File-Keys zeigt sich beim Teilen: Der Content wird **nicht** neu verschlüsselt. Stattdessen wird nur der 32-Byte File Key mit dem Hybrid KEM des Empfängers neu verpackt.

```
Eigentümer                                          Empfänger
----------                                          ---------

1. Unwrap File Key:
   fileKey = AES-GCM-decrypt(wrappedKey, masterKey)

2. Lade Public Keys des Empfängers:
   recipient.x25519_pub, recipient.mlkem_pub

3. Hybrid KEM Encapsulation:
   hybridEncapsulate(recipient.x25519_pub,
                     recipient.mlkem_pub)
   → {x25519_ct, mlkem_ct, sharedSecret}

4. Wrappe File Key mit sharedSecret:
   shareWrappedKey = AES-256-GCM(fileKey,
                                 sharedSecret, nonce)

5. Speichere Share-Record:
   INSERT INTO vault_file_shares {
     file_uuid, recipient_account_id,
     x25519_ephemeral, mlkem_ciphertext,
     share_wrapped_key, permissions
   }
                                                    6. Lade Share-Record + Chunk
                                                    7. Hybrid KEM Decapsulation:
                                                       hybridDecapsulate(x25519_ct, mlkem_ct,
                                                         own_x25519_priv, own_mlkem_priv)
```

```
   → sharedSecret
8. Unwrap File Key:
   fileKey = AES-GCM-decrypt(
     shareWrappedKey, sharedSecret)
9. Entschlüssele GLEICHEN Ciphertext:
   content = AES-GCM-decrypt(
     encContent, fileKey)
```

Der Eigentümer benötigt den Master Key des Empfängers nicht — nur die öffentlichen Hybrid-KEM-Schlüssel, die der Server im Klartext speichert.

10.5 Ordner-Sharing (rekursiv)

Wird ein Ordner geteilt, verarbeitet der Client rekursiv alle enthaltenen Dokumente und Unterordner. Jede Datei erhält einen eigenen Share-Record mit dem File Key des jeweiligen Dokuments, re-wrapped für den Empfänger. Der Ordner selbst hat keinen Ordner-Key — die Struktur wird über Eltern-UUIDs verknüpft.

Wichtig: Der KEM-Encapsulation-Schritt wird **pro Operation** durchgeführt, nicht pro Datei. Alle Dateien eines gebatchten Sharings verwenden dasselbe `sharedSecret` — was den Vorgang effizient macht, ohne die Sicherheit zu reduzieren (jede Datei hat dennoch ihren eigenen File Key).

10.6 Berechtigungsmodell

Berechtigung	Kann ausführen
Lesen	Herunterladen, Vorschau, Metadaten lesen
Vollzugriff	+ Umbenennen, neue Version hochladen, innerhalb des geteilten Ordners verschieben, neue Dokumente hochladen
Nicht möglich	Löschen (nur Eigentümer), aus geteiltem Ordner rausverschieben (nur Eigentümer)

Die Berechtigungen werden im `vault_file_shares`-Record gespeichert und serverseitig durchgesetzt. Die Kryptografie schützt den Inhalt — die Zugriffskontrolle schützt die Operationen.

10.7 Rename, Overwrite und Metadaten-Updates

Bei geteilten Dokumenten werden Rename- und Overwrite-Operationen direkt auf dem `vault_files`-Record ausgeführt — nicht auf den individuellen Share-Records. Alle Empfänger sehen sofort den neuen Namen bzw. den neuen Inhalt, da sie denselben Ciphertext referenzieren.

Beim **Overwrite** (neue Version) wird ein **neuer File Key** generiert, der alte Ciphertext wird ersetzt, und alle bestehenden Share-Records werden clientseitig mit dem neuen Key re-wrapped. Der Eigentümer muss für diese Operation die Public Keys aller Empfänger laden.

10.8 Vorschau und In-Memory-Entschlüsselung

Bilder, PDFs und andere Dokumente werden für die Vorschau **ausschließlich im Arbeitsspeicher** entschlüsselt. Es gibt keinen Disk-Cache mit Plaintext-Daten. Der Client nutzt den **VaultDataLayer**, einen verschlüsselten IndexedDB-Cache, der Ciphertexte persistent zwischenspeichert und nur bei Bedarf entschlüsselt.

Thumbnails werden serverseitig **niemals** generiert — der Server sieht nie den Inhalt. Thumbnails werden clientseitig aus dem entschlüsselten Original erzeugt und ebenfalls verschlüsselt zwischengespeichert.

10.9 Was der Server sieht

Sichtbar für den Server	Nicht sichtbar
Verschlüsselter Content (Zufallsbytes)	Plaintext-Inhalt
Verschlüsselter Dateiname (Zufallsbytes)	Plaintext-Dateiname
Verschlüsselter MIME-Typ (Zufallsbytes)	Dateityp (Bild, PDF, Textdatei…)
Dateigröße (gepaddet auf Bucket-Grenzen)	Tatsächliche Originalgröße
Upload-Zeitpunkt	File Key, Master Key
Eigentümer-Account-ID	Inhalte von Unterordnern
Elternordner-UUID (für Struktur)	Ordnernamen (ebenfalls verschlüsselt)
Share-Records mit KEM-Ciphertexten	Empfänger-Master-Key, entwrappter File Key

10.10 Quota-Durchsetzung

Die Quota-Prüfung erfolgt serverseitig anhand der **verschlüsselten Dateigröße** (inklusive Bucket-Padding). Der Server kennt die tatsächliche Plaintext-Größe nicht — der Padding-Overhead wird bewusst vom Nutzer bezahlt, um Größen-Leakage zu verhindern.

Limits: - **Kostenlos:** 100 MB Gesamtspeicher, max. 10 MB pro Dokument - **Plus:** 1 GB Gesamtspeicher, max. 100 MB pro Dokument

10.11 Externes Teilen — öffentliche Share-Links

Vault-Drive-Dokumente können mit Empfängern geteilt werden, die **kein Aionda-Mail-Konto haben**, über öffentliche Share-Links auf der isolierten Domain `mail.aionda.com`. Die Funktion bleibt Zero-Knowledge, weil jeder Share als **eigenständige Krypto-Hülle** behandelt wird, entkoppelt vom Vault-Master-Key des Eigentümers.

Schutzmodi:

Modus	Vertrauensfaktor	Einsatz
`link_only`	URL-Fragment (wird nie an den Server übertragen)	Komfort — jeder mit dem Link kann zugreifen
`password`	Argon2id-abgeleiteter Schlüssel	Passwort-Übergabe außerhalb des Kanals (SMS, Telefon)
`recipient_pubkey`	Hybrid KEM (X25519 + ML-KEM-1024)	Post-Quantum-sicher, wenn der Empfänger vorab Public Keys hinterlegt hat

10.11.1 Share-Erstellung (Eigentümer-Client)

```
1. fileKey := AES-GCM-decrypt(vault_files.wrapped_key, masterKey)
2. shareKey := randomBytes(32)                          // ephemer, pro Share
```

```
3. wrappedFileKey := AES-GCM(fileKey, shareKey)        // neue Hülle
4. unlockVerifier := HMAC-SHA256(shareKey,
                     "unlock:" || shareUuid)           // Proof-of-Knowledge
5. Bei Passwort-Schutz:
     salt := randomBytes(16)
     pwKey := Argon2id(password, salt, t=3, m=64MB, p=1)
     wrappedShareKey := AES-GCM(shareKey, pwKey)
     → Link: https://mail.aionda.com/s/<shareUuid>
   Sonst (link_only):
     → Link: https://mail.aionda.com/s/<shareUuid>#<base64(shareKey)>
       (URL-Fragment — Browser übertragen Fragmente nie an den Server)

6. Verschlüsselte Metadaten (pro Share, mit shareKey):
     encFilename, encMime, encMessage  // alle AES-GCM
7. POST /e  (verschlüsselter API-Transport, siehe §8)
   → Server speichert Share-Record — sieht nie Klartext
```

Die Übermittlung wählt der Eigentümer selbst — nicht Aionda Mail. Nach dem Erstellen entscheidet der Eigentümer, über welchen Kanal der Link geht: Link kopieren, QR-Code, `mailto:`-Entwurf im lokalen Mail-Programm, Signal, SMS, AirDrop oder jeder andere Out-of-Band-Kanal. Aionda Mail sieht, sendet oder loggt die ausgehende Zustellung nicht — der Server weiß nur, welche Share-UUIDs existieren. Das ist aus zwei Gründen wichtig: (a) Der Eigentümer wählt den für ihn vertrauenswürdigsten Kanal (Corporate-Compliance, bevorzugter Messenger, QR-Code face-to-face), und (b) bei passwortgeschützten Shares ermöglicht es **Kanal-Trennung** — Link über Kanal A, Passwort über Kanal B — sodass ein kompromittierter Kanal allein niemals Zugriff gewährt.

10.11.2 Share-Zugriff (Empfänger, kein Konto nötig) Der Empfänger öffnet `https://mail.aionda.com/s/<` Die Share-Page ist ein **eigenständiges Bundle** getrennt vom Manager, mit reproduzierbarem Build, Subresource-Integrity-Manifest und einem `/.well-known/integrity.json`-Endpunkt zur Offline-Verifikation.

```
1. Share-Page-Bootstrap (Client erzeugt ephemeres Hybrid-KEM-Keypair)
2. share_fetch_meta → { wrapped_file_key, salt?, encrypted_message, ... }
3. Unlock-Phase — liefert ein einmaliges unlock_token:
     password-Modus:   Server verifiziert Argon2id-Ableitung → unlock_token
     link_only-Modus:  Client berechnet HMAC-SHA256(shareKey, "unlock:"||uuid)
                       Server prüft gegen gespeicherten unlockVerifier
                       → unlock_token
4. fileKey := AES-GCM-decrypt(wrappedFileKey, shareKey)
5. share_download_chunk (pro Chunk, unlock_token erforderlich)
6. Client hasht Klartext, ruft share_confirm_download
```

Das `unlock_token` vereinheitlicht den Ablauf für alle drei Schutzmodi und ermöglicht zentrales Rate-Limiting und Audit-Logging — link_only-Zugriffe erfordern Kenntnis des Fragments, sodass Bots und Crawler ohne Fragment keine Downloads auslösen können.

10.11.3 Erzwungene Richtlinien Jeder Share muss bei Erstellung folgendes deklarieren (alles serverseitig durchgesetzt):

- **`expires_at`** — Pflicht, Default 7 Tage, Maximum 90 Tage

- **max_downloads** — Pflicht-Zähler, Default 10
- **Rate-Limiting** — Argon2-Versuche bei Passwort-Shares werden pro IP-Hash und pro Share gedrosselt
- **revoked_at** — Der Eigentümer kann jeden Share per Klick widerrufen; künftige Unlock-Versuche und Downloads liefern eine einheitliche „Share nicht verfügbar"-Antwort (gleicher Fehler wie abgelaufen/ausgeschöpft — kein Enumerations-Orakel)

10.11.4 Manipulationssichere Audit-Kette Alle relevanten Zugriffsevents werden an die bestehende `enterprise_audit_log`-Hash-Chain angehängt (SHA3-256, siehe §17.2). Folgende Action-Types sind für externes Teilen reserviert:

`EXT_SHARE_CREATED`, `EXT_SHARE_EMAIL_SENT`, `EXT_SHARE_VIEWED`, `EXT_SHARE_UNLOCKED`, `EXT_SHARE_PREVIEWED`, `EXT_SHARE_DOWNLOAD_STARTED`, `EXT_SHARE_DOWNLOAD_CONFIRMED`, `EXT_SHARE_INTEGRITY_BROKEN`, `EXT_SHARE_PASSWORD_FAIL`, `EXT_SHARE_REVOKED`, `EXT_SHARE_ROTATED`, `EXT_SHARE_EXPIRED`.

IP- und User-Agent-Hashes verwenden einen **täglich rotierenden Salt** (`vault_drive_external_share_daily_` nach 30 Tagen gelöscht) — historische Hashes sind nach Salt-Rotation nicht mehr rückführbar (DSGVO-Konformität), die kurzfristige Korrelation für den Eigentümer bleibt möglich.

10.11.5 Schlüssel-Rotation (Share-Rewrap) Der Eigentümer kann einen Share jederzeit rotieren, ohne den Inhalt neu hochzuladen:

```
1. new_shareKey := randomBytes(32)
2. new_wrappedFileKey := AES-GCM(fileKey, new_shareKey)
3. INSERT neue Share-Row; old.linked_to_uuid := new.share_uuid
4. old.revoked_at := NOW()
```

Empfänger mit dem alten Link erhalten „Share nicht verfügbar". Der Eigentümer verteilt den neuen Link. Zugriffsevents beider Shares bleiben über `linked_to_uuid` in der Audit-Kette verknüpft.

10.11.6 Was Widerruf leistet — und was nicht Widerruf **stoppt die künftige serverseitige Auslieferung** des Shares. Er widerruft **nicht** rückwirkend bereits ausgelieferte Share-Keys, File-Keys oder Chunks. Wer den Klartext bereits heruntergeladen oder das Link-Fragment abgegriffen hat, kann das Material lokal weiterverwenden. Für höhere Schutzbedürfnisse empfehlen wir die Kombination aus: kurzem `expires_at`, niedrigem `max_downloads`, Passwort-Schutz und Guardian-Browser-Erweiterung für den Empfänger.

10.11.7 Was der Server sieht

Server sieht	Server sieht NICHT
`share_uuid`, `file_uuid`, `account_id` (Eigentümer)	Klartext-Dateiname, MIME-Typ, Inhalt, Nachricht
`wrapped_file_key`, `wrapped_share_key` (Ciphertexte)	`share_key` (bei link_only: lebt nur im URL-Fragment, clientseitig)
`unlock_verifier` (HMAC-Ausgabe, nicht umkehrbar)	Passwort, Argon2-abgeleiteter Schlüssel
`protection_mode`, `expires_at`, `max_downloads`, `allow_preview`	Empfänger-Identität (nur gesalzener IP/UA-Hash, nach 30 Tagen gelöscht)

Server sieht	Server sieht NICHT
`encrypted_filename`, `encrypted_mime`, `encrypted_message` (Ciphertexte) Klartext `sender_display_name` (Empfänger sieht ihn vor dem Unlock) Audit-Chain-Einträge für jedes Zugriffsevent	Deren Klartexte

---

11. Aionda Chat — Post-Quantum-E2EE-Messaging

Aionda Chat ist die integrierte Echtzeit-Messaging-Oberfläche von Aionda Mail. Im Gegensatz zu E-Mails — die einmalige ephemere Schlüssel pro Nachricht verwenden — sind Chat-Konversationen langlebig und benötigen für jede einzelne Nachricht **Forward Secrecy** und **Post-Compromise Security**. Dafür haben wir ein eigenes Protokoll entwickelt: **AAR (Aionda Async Ratchet)** — eine Post-Quantum-Variante von Signals X3DH + Double Ratchet, in der jeder Diffie-Hellman-Schritt durch eine hybride KEM (X25519 + ML-KEM-1024) ersetzt wird.

11.1 Warum ein eigenes Protokoll?

E-Mail und Chat haben grundlegend unterschiedliche Sicherheitsprofile:

Eigenschaft	E-Mail	Chat
Frequenz	Sporadisch (Minuten/Stunden)	Echtzeit (Sekunden)
Sitzungsdauer	Einzelne Nachricht	Kontinuierlich, Tage bis Jahre
Forward-Secrecy-Einheit	Pro Nachricht	Pro Nachricht **innerhalb** einer langen Sitzung
Post-Compromise Recovery	Nicht erforderlich (One-Shot-Key)	Erforderlich — jede neue Nachricht heilt einen früheren Compromise
Asynchronität	Hoch (Empfänger oft offline)	Hoch (Empfänger oft offline)
Gruppendynamik	Statische Empfängerliste	Dynamisches Hinzufügen/Entfernen

Eine Chat-Konversation, die einfach die E-Mail-Pipeline wiederverwendet, würde entweder (a) bei jedem Tastendruck ein frisches ephemeres Schlüsselpaar verbrennen (inakzeptabel langsam) oder (b) einen einzigen statischen Konversationsschlüssel teilen (keine Forward Secrecy). Beides ist nicht akzeptabel. AAR löst das, indem ein kontinuierlich rachetnder Schlüsselzustand pro Peer gepflegt wird — jede Nachricht treibt den Zustand unwiderruflich vorwärts.

11.2 Bausteine

`AAR verwendet exakt vier Primitive:`

```
   Hybride KEM        X25519 + ML-KEM-1024  (Schlüssel-Kapselung)
   AEAD               AES-256-GCM           (Nachrichten-Verschlüsselung)
   KDF                HKDF-SHA256           (Schlüsselableitung)
   Signaturen         Ed25519               (Identitätsbindung, SPK-Signatur)

Es werden keine neuen kryptografischen Annahmen eingeführt — jedes Primitiv
wird auch anderswo im System eingesetzt und wurde unabhängig auditiert.
```

11.3 KeyBundle — das asynchrone Handshake-Material

Jeder Nutzer veröffentlicht beim ersten Aktivieren des Chats ein **KeyBundle** auf dem Server. Das Bundle ermöglicht es Peers, Nachrichten zu beginnen, auch wenn der Nutzer offline ist.

```
KeyBundle (pro Account, durchgehend hybrid):

   Identitätsschlüssel (IK)   — langlebig
      |-- IK.x25519_pub
      |-- IK.mlkem_pub
      |-- IK.ed25519_pub      — wird zum Signieren des SPK genutzt

   Signed Pre-Key (SPK)       — wöchentliche Rotation
      |-- SPK.x25519_pub
      |-- SPK.mlkem_pub
      |-- Ed25519-Signatur    — signiert die Konkatenation, bindet SPK an IK

   One-Time Pre-Keys (OPK)    — Pool von ~100, atomar konsumiert
      |-- OPK.x25519_pub
      |-- OPK.mlkem_pub
```

Server-Speicherung: Es werden nur die öffentlichen Hälften aller Schlüssel gespeichert, plus Signaturen und Metadaten. Die privaten Hälften verlassen den ursprünglichen Browser nie. Der Server erzwingt ein atomares `UPDATE … LIMIT 1 SET consumed_ts = NOW()`, wenn ein OPK abgerufen wird, und garantiert damit Single-Use-Semantik unter konkurrierenden Anfragen.

Wenn der OPK-Pool unter 20 fällt, füllt der Client den Pool mit einem frischen Batch wieder auf — das verhindert, dass der asynchrone Handshake in einen degenerierten Modus ohne One-Time-Entropie zurückfällt.

11.4 PQXDH-artiger Handshake (X3DH-PQ)

Um eine neue Konversation mit Bob zu starten, ruft Alice Bobs Bundle (`IK_B`, `SPK_B`, einen `OPK_B`) und Bobs Ed25519-Signatur auf `SPK_B` ab. Alice verifiziert die Signatur und führt dann vier hybride KEM-Encapsulations durch:

```
1. Verifiziere Ed25519-Signatur auf SPK_B  — bindet SPK an Langzeitidentität

2. Erzeuge ephemeren Alice-Schlüssel (EK_A):
   EK_A.x25519, EK_A.mlkem  (einmalig, sofort nach dem Handshake verworfen)

3. Vier hybride KEM-Encapsulations:
   ss1 = HKEM(IK_A_priv  ⊗ SPK_B_pub)    — Alice-Identität → Bob-SPK
   ss2 = HKEM(EK_A_priv  ⊗ IK_B_pub)     — Alice-Ephemer → Bob-Identität
```

```
   ss3 = HKEM(EK_A_priv  ⊗ SPK_B_pub)    — Alice-Ephemer → Bob-SPK
   ss4 = HKEM(EK_A_priv  ⊗ OPK_B_pub)    — Alice-Ephemer → Bob-OPK

   (jedes ss_i ist selbst die HKDF-Kombination aus einem X25519-Geheimnis
    UND einem ML-KEM-Geheimnis — siehe Abschnitt 6.4)

4. Root-Key-Ableitung:
   SK = HKDF-SHA256(
          IKM  = ss1 || ss2 || ss3 || ss4,
          info = "AAR-X3DH-v1" || consumed_OPK_id
        )

5. Vergiss jedes private ephemere Material; SK seedet das Ratchet.
```

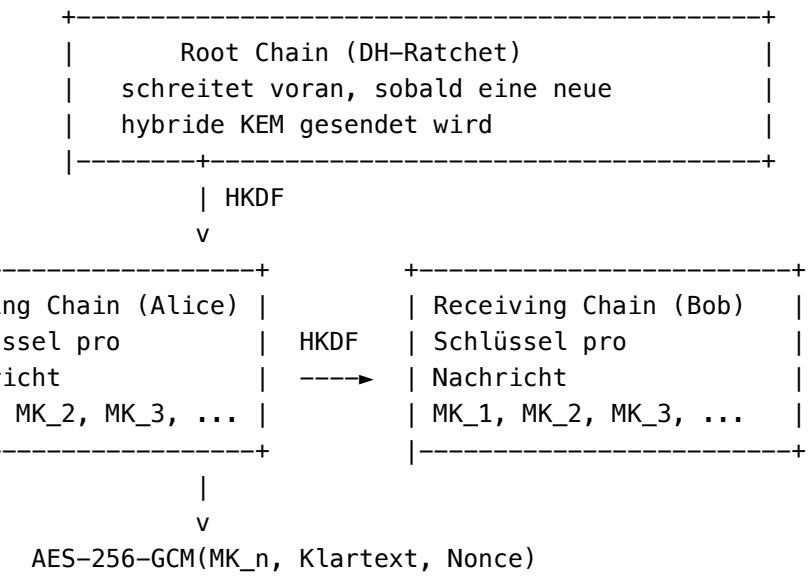
Die Konstruktion garantiert:

- **Wechselseitige Authentifizierung** über das Ed25519-signierte `SPK_B` und die `IK_A`-Bindung
- **Forward Secrecy** auch wenn `IK_B` später kompromittiert wird — `ss3` und `ss4` nutzen ephemere Schlüssel auf beiden Seiten
- **Post-Quantum-Sicherheit**, weil jedes `ss_i` einen ML-KEM-Term enthält — ein Angreifer, der heutigen Traffic für einen zukünftigen Quantencomputer sammelt, kann keines der vier Geheimnisse rekonstruieren
- **Replay-Resistenz** durch atomare OPK-Konsumption — Bobs serverseitiger Trigger weigert sich, denselben OPK zweimal herauszugeben

Die von Alice konsumierte OPK-ID wird in den `info`-Parameter von HKDF eingebunden — Bobs Seite kann denselben Root-Key daher nur mit derselben OPK reproduzieren, und nur einmal.

11.5 Double Ratchet — Schlüssel pro Nachricht

Nach dem Handshake schreitet auf beiden Seiten für jede Nachricht ein **Double Ratchet**-Zustand voran:



Jedes Chat-Event trägt den aktuellen **Ratchet-Public-Key** des Senders (hybrides Paar, ~1,6 KB). Wenn der Empfänger eine Nachricht erhält, deren Ratchet-Schlüssel sich vom zuletzt

gesehenen unterscheidet, führen beide Parteien eine frische hybride KEM aus, leiten einen neuen Root-Key ab und resetten ihre Chains. Das ist der **DH-Ratchet** in Signal-Terminologie — nur dass jeder Schritt eine vollständige hybride KEM ist, nicht ein einzelner Diffie-Hellman.

Garantien pro Nachricht:

- **Forward Secrecy:** Das Löschen von `MK_n` macht Nachricht `n` undechiffrierbar, selbst bei Übergabe des vollständigen Langzeitzustands zum Zeitpunkt der Aufzeichnung
- **Post-Compromise Security:** Sobald nach einem Compromise ein frischer DH-Ratchet-Schritt stattgefunden hat, sind alle nachfolgenden Nachrichten vor dem Angreifer geschützt
- **Out-of-Order-Zustellung:** Nachrichten-Schlüssel werden für spät eintreffende Nachrichten gecached (gedeckelt auf 1000 Schlüssel pro Sitzung, um Speicher zu begrenzen)

11.6 Nachrichten-Container

Jedes auf den Server hochgeladene Chat-Event ist ein in sich geschlossenes Ciphertext-Paket:

```
MessageContainer (base64-kodiert, gespeichert in chat_events.payload):

   +-------------------------------------------------------------+
   | ratchet_pub      :  Hybride KEM-Public-Key (aktueller Step)  |
   | prev_chain_len   :  Anzahl Nachrichten im vorherigen Chain   |
   | msg_number       :  Zähler innerhalb des aktuellen Chains    |
   | ciphertext       :  AES-256-GCM(MK_n, Klartext || Header)    |
   | tag              :  AES-256-GCM-Authentifizierungs-Tag       |
   |-------------------------------------------------------------+

Der Header innerhalb des AEAD-Klartexts enthält: Sender-Login,
content_type (text/quote/file-reference), Timestamp, optionales
reply_to_event_uuid.
```

Der Container ist für den Server opak — einschließlich des Nachrichtentyps, des Sender-Anzeige-Namens-Formats und jeglichen zitierten Antwort-Kontextes. Aiondas Datenbank speichert den Container as-is in `chat_events.payload`.

11.7 Gruppen-Konversationen — Sender-Keys pro Empfänger

Für Raum-Konversationen (3+ Teilnehmer) verwendet AAR ein **Per-Recipient-Fan-out**-Modell. Der Sender leitet eine Sender-Key-Chain pro Peer-Paar ab und verschlüsselt eine Nachricht einmal pro Empfänger. Jeder Empfänger erhält daher einen persönlich adressierten Ciphertext, entschlüsselbar nur mit den Schlüsseln aus seiner eigenen AAR-Sitzung mit dem Sender.

Trade-off: Die Fan-out-Kosten sind `O(N)` in Empfängern — akzeptabel für typische Teamgrößen (≤25 Teilnehmer). Für größere Gruppen ist ein zukünftiger MLS-basierter Modus geplant (siehe Roadmap). Das aktuelle Modell ist einem einzelnen geteilten Gruppenschlüssel vorzuziehen, weil: (a) es Forward Secrecy auf Per-Pair-Basis bewahrt, (b) es bei Mitglieder-Entfernung keine Schlüsselrotation jenseits der bilateralen Ebene erfordert, und (c) es die Post-Quantum-Garantien des paarweisen AAR ohne Modifikation erbt.

11.8 Initialer Konversations-Container

Wenn Alice einen neuen Raum mit Bob, Carol und Dan startet, wird die erste Nachricht an jeden Teilnehmer als **Initial-Handshake-Container** gewrappt, der (a) das X3DH-Handshake-Material gegen das Bundle dieses Teilnehmers und (b) die erste Nachricht selbst trägt. Der

Empfänger dispatcht auf das Discriminator-Feld:

```
{
  "type": "initial",
  "initialMessage": { /* Handshake-Metadaten, konsumierte OPK-ID */ },
  "encryptedMessage": "<base64 MessageContainer>"
}
```

Folgenachrichten im selben Raum nutzen die etablierte AAR-Sitzung und enthalten nur noch den `encryptedMessage`-Teil.

11.9 Transport — Verschlüsselte API + Mercure SSE + WebSocket

Die Chat-Ebene nutzt drei orthogonale Kanäle:

Kanal	Richtung	Zweck	Vom Server gesehener Klartext
`/e` Verschlüsselte API	Client Server	Nachricht senden, History abrufen, KeyBundle-Operationen (11 Endpoints)	Keiner — alle 11 Chat-Endpoints nutzen denselben Hybrid-KEM-Transport aus Abschnitt 8
Mercure SSE	Server Client	Push-Zustellung neuer Events (`chat.event_received`, `chat.read_receipt`)	Keiner — der Server pusht denselben opaken MessageContainer, den er gespeichert hat
WebSocket `/chat/ws`	Bidirektional	Reconnect-Backfill (`sync_request`), Heartbeat, Presence	Nur Presence-Boolean (online/offline) und Login-String — niemals Nachrichten-Inhalte

Presence wird in einer In-Memory-Map auf `aionda_chat_realtime` gehalten; ein einziger intranet-only HTTP-Endpoint stellt eine `login → online`-Lookup für den Team-Picker bereit, damit Nutzer sehen können, ob ein Peer erreichbar ist. Keine History, kein Read-State, kein Inhalt durchquert je den Presence-Kanal.

11.10 Lesebestätigungen

Lesebestätigungen sind eine Opt-in-Einstellung pro Account (`chat_participants.send_read_receipts`). Wenn aktiviert, publiziert das Markieren einer Nachricht als gelesen ein `chat.read_receipt`-Event mit:

```
{ conversation_uuid, last_read_event_uuid, account_login }
```

Beachte: `last_read_event_uuid` ist **nicht** der Nachrichteninhalt — es ist ein servergenerierter Identifier, der dem Server bereits bekannt ist. Es leakt nichts über “Alice hat jetzt Nachrichten

bis Event X gesehen" hinaus. Empfänger, die Lesebestätigungen deaktiviert haben (`send_read_receipts = false`), emittieren niemals solche Events, und der Server erzwingt das Toggle.

11.11 Audit-Chain-Integration

Für Enterprise-Accounts wird jede Chat-Operation an die existierende manipulationssichere Audit-Log (`enterprise_audit_log`, SHA3-256-Hash-Chain — siehe §17) angehängt. Reservierte Aktionstypen sind:

`CHAT_CONVERSATION_CREATED`, `CHAT_PARTICIPANT_ADDED`, `CHAT_PARTICIPANT_REMOVED`, `CHAT_MESSAGE_SENT`, `CHAT_MESSAGE_READ`, `CHAT_KEYBUNDLE_PUBLISHED`, `CHAT_KEYBUNDLE_ROTATED`, `CHAT_OPK_TOPPED_UP`, `CHAT_CONVERSATION_LEFT`.

Der Audit-Eintrag enthält nur die Konversations-UUID, das Login des Akteurs und einen Timestamp — **niemals** den verschlüsselten Payload, Ratchet-Schlüssel oder Nachrichteninhalte.

11.12 Was der Server sieht

Vom Server sichtbar	Nicht sichtbar
`conversation_uuid`, Liste der Teilnehmer (per `mail_account.name`)	Nachrichteninhalte im Klartext
Verschlüsselte `MessageContainer`-Payloads (opake Ciphertexte)	Ratchet-Schlüssel, Chain-Keys, Message-Keys
Öffentliche Hälften von IK, SPK, OPK; Ed25519-Signaturen auf SPK	Private Hälften jeglicher Schlüsselpaare
OPK-Konsumptions-Counter und Timestamp	Welcher OPK für welche Konversation konsumiert wurde (Korrelation nur clientseitig via HKDF-info-Bindung verhindert)
Konversations-Kadenz (Timestamps der `chat_events`-Zeilen)	Zitierte Antwort-Ketten, Datei-Anhänge im Container
Presence-Boolean (online/offline)	Tipp-Indikatoren (peer-to-peer, erreichen den Server nie)
Audit-Chain-Einträge für Enterprise-Accounts	Klartextinhalte der Audit-Einträge

11.13 Kryptografische Audits

Das AAR-Protokoll wurde von Grund auf in TypeScript implementiert und durchlief drei unabhängige KI-gestützte Audits, dokumentiert in `typescript/manager/chat/crypto/AUDIT.md`, `AUDIT_SECOND_OPINION.md` und `AUDIT_THIRD_OPINION.md`. Erkenntnisse jeder Runde wurden vor dem öffentlichen Deployment integriert. Hauptauditflächen waren: Handshake-Symmetrie, OPK-Reservierung unter Concurrency, Deep-Cloning unveränderlicher Ratchet-State und das AEAD-Framing des `MessageContainer`.

11.14 Implementierungsgrenzen

Die Chat-Codebasis lebt in `typescript/manager/chat/` (~9.000 Zeilen TypeScript) und `includes/classes/Api` (PHP-Service-Schicht). Wesentliche Audit-Artefakte:

```
crypto/aar-types.ts            — nur Typen, keine Logik
crypto/aar-keybundle.ts        — KeyBundle-Erstellung, Rotation, Serialisierung
crypto/aar-x3dh.ts             — Handshake (Initiator- und Responder-Pfad)
crypto/aar-double-ratchet.ts   — Root-Chain, Sending-Chain, Receiving-Chain
```

Die saubere Trennung zwischen Protokoll-Logik (`crypto/`) und Transport/UI (`chat-store.ts`, `chat-panel.ts`, …) stellt sicher, dass der kryptografische Kern ohne UI-Scope-Creep re-auditiert werden kann.

---

12. Seitenkanalschutz

12.1 Bucket Padding

Problem: Verschlüsselte E-Mail-Größen können Informationen preisgeben. Ein Angreifer, der Chiffretext-Längen beobachtet, könnte auf den Inhalt schließen (z.B. eine 50-Byte-E-Mail ist wahrscheinlich "OK, danke", während eine 500-KB-E-Mail Anhänge enthält).

Lösung: Alle Daten werden vor der Verschlüsselung auf Festgrößen-"Buckets" aufgefüllt:

```
Bucket sizes: 256B, 512B, 1KB, 2KB, 4KB, 8KB, 16KB, 32KB,
              64KB, 128KB, 256KB, 512KB, 1MB, 2MB, 4MB, 8MB, 16MB

Format: [0xDEAD magic][4-byte length][actual data][random padding to bucket boundary]
```

Beispiel: Eine 523-Byte-E-Mail wird auf 1.024 Bytes aufgefüllt. Ein Beobachter sieht nur "1-KB-E-Mail" — nicht die tatsächliche 523-Byte-Größe.

12.2 Kompression vor Verschlüsselung

Daten werden mit gzip (Level 6) **vor** der Verschlüsselung komprimiert. Das ist die einzig korrekte Reihenfolge:

- Kompression nach der Verschlüsselung würde fehlschlagen (verschlüsselte Daten haben maximale Entropie)
- Das Bucket Padding nach der Kompression verhindert CRIME/BREACH-artige Angriffe, die Kompressionsraten ausnutzen

12.3 Threading-Privatsphäre

E-Mail-Threads verwenden SHA-256-Hashes der Message-ID-Header anstelle von Klartext-Identifikatoren. Der Server kann zusammengehörige E-Mails anhand der Hash-Gleichheit gruppieren, ohne die tatsächlichen Nachrichten-Identifikatoren zu kennen.

---

13. Schlüsselverwaltung & Lebenszyklus

13.1 Schlüsselhierarchie

```
Vault Master Key (32 bytes, generated once per account)
   |
   |--- Vault Keypair (Hybrid KEM)
   |    |-- X25519 public key (32 bytes) — stored plaintext on server
   |    |-- X25519 private key (32 bytes) — encrypted with master key
   |    |-- ML-KEM-1024 public key (1568 bytes) — stored plaintext on server
   |    |-- ML-KEM-1024 private key (3168 bytes) — encrypted with master key
   |
   |--- Per-Email Ephemeral Keys (32 bytes each)
   |    |-- Wrapped with recipient's Hybrid KEM public keys
```

```
|
|--- Per-Attachment Ephemeral Keys (32 bytes each)
|    |-- Wrapped independently per attachment
|
|--- Folder Keys (derived via HKDF per folder)
|    |-- Shared via Hybrid KEM encapsulation per recipient
|
|--- Signature Encryption Key (derived from master key)
     |-- Encrypts email signature templates
```

13.2 Schlüsselspeicherung

Schlüssel	Speicherort	Schutz
Master Key	Nirgendwo (wird on-demand aus Shamir-Anteilen rekonstruiert)	Shamir 2-of-3
Vault Private Keys	Server (verschlüsselt)	AES-256-GCM mit Master Key
Vault Public Keys	Server (Klartext)	Nicht sensitiv — per Definition öffentlich
E-Mail Ephemeral Keys	Server (wrapped)	Hybrid KEM Encapsulation
OPAQUE Records	Server (at rest verschlüsselt)	AES-256-GCM mit Server-Schlüssel
Verschlüsselte Shamir-Anteile	Server	XOR mit passwort-/passkey-/recovery-abgeleiteten Schlüsseln
API-Transportschlüssel	Server (vorgegenerierter Pool)	Einmalverwendung, 24h TTL

13.3 Schlüssel-Fingerprints

Jedes Vault-Schlüsselpaar hat einen SHA-256-Fingerprint, der auf dem Server gespeichert wird. Dies ermöglicht:

- Audit Trail von Schlüsselrotationen
- Erkennung unautorisierter Schlüsseländerungen
- Clientseitige Verifizierung der Schlüsselintegrität

---

14. Wiederherstellungsmechanismus

14.1 Wiederherstellungsschlüssel (BIP39-Mnemonik)

Während der Vault-Einrichtung wird dem Nutzer eine **24-Wort-Wiederherstellungsphrase** präsentiert, die aus 256 Bit Entropie generiert und mit dem BIP39-Standard kodiert wird:

```
Example: apple river mountain sunset golden bridge falcon ocean
         crystal thunder meadow silver dolphin forest marble castle
         velvet compass harbor window ancient pepper rocket shield
```

14.2 Ableitung des Wiederherstellungsschlüssels

```
1. Generate: 256 bits random entropy
2. Encode:   BIP39 mnemonic (24 words, 11 bits per word)
3. Derive:   verificationKey = HKDF-SHA3-256(
                 entropy,
                 salt = accountId,
                 info = "trashmail-recovery-verify"
             )
4. Hash:     verificationHash = SHA3-256(verificationKey)
5. Store:    Server stores ONLY verificationHash (32 bytes)
```

14.3 Was der Server speichert

Der Server speichert **nur den SHA3-256-Hash** eines abgeleiteten Verifizierungsschlüssels. Er speichert nicht:

- Die Wiederherstellungswörter
- Die Entropie
- Den Verifizierungsschlüssel selbst

14.4 Wiederherstellungsablauf

1. Der Nutzer gibt die 24-Wort-Wiederherstellungsphrase ein
2. Der Client leitet ab: Entropie HKDF-SHA3-256 SHA3-256 Verifizierungs-Hash
3. Der Client sendet den Verifizierungs-Hash an den Server (niemals den Klartext-Schlüssel)
4. Der Server vergleicht mit dem gespeicherten Hash
5. Bei Übereinstimmung: Alle 2FA-Methoden werden deaktiviert, der Nutzer richtet eine neue Authentifizierung ein
6. Der Wiederherstellungsschlüssel wird nach einmaliger Verwendung widerrufen

14.5 Ratenlimitierung

- Maximal 3 Verifizierungsversuche pro Stunde
- 60-Minuten-Sperrung nach Überschreitung des Limits
- Einmalverwendung: Der Wiederherstellungsschlüssel wird nach erfolgreicher Nutzung dauerhaft widerrufen

14.6 Kein Passwort-Recovery

Es gibt kein Passwort-Reset per E-Mail. Wenn ein Nutzer sein Passwort UND alle anderen Authentifizierungsfaktoren (Passkey + Wiederherstellungsschlüssel) verliert, sind seine Daten dauerhaft unzugänglich. Das ist der fundamentale Beweis dafür, dass Zero-Knowledge funktioniert — wenn wir die Daten wiederherstellen könnten, könnten wir sie auch lesen.

---

15. Passwortlose Authentifizierung (Passkeys)

15.1 WebAuthn PRF Extension

Aionda Mail unterstützt FIDO2-Passkeys (Hardware-Sicherheitsschlüssel, biometrische Authentifikatoren) für passwortloses Login und Vault-Unlock.

Die **WebAuthn PRF (Pseudo-Random Function) Extension** liefert einen deterministischen 32-Byte-Output, der an den spezifischen Passkey und die Credential gebunden ist. Dieser Output wird zum Schutz von Shamir-Anteil 2 verwendet.

15.2 Funktionsweise

```
1. Registration:
   - User creates passkey via navigator.credentials.create()
   - PRF extension generates hardware-bound output
   - Output XOR'd with Shamir Share 2 → encrypted share stored on server

2. Authentication:
   - User authenticates with passkey (biometric/PIN)
   - PRF extension reproduces same 32-byte output
   - Output XOR'd with encrypted share → Shamir Share 2 recovered
   - Combined with Share 1 (password) → Master Key reconstructed

3. Vault Unlock (passwordless):
   - If both passkey (Share 2) and password (Share 1) available → immediate unlock
   - Password verified via OPAQUE (separate from passkey auth)
```

15.3 Mehrere Passkeys

Nutzer können mehrere Passkeys registrieren (z.B. MacBook Touch ID, iPhone Face ID, YubiKey). Jeder Passkey schützt unabhängig seine eigene Kopie von Anteil 2. Ein einzelner Passkey in Kombination mit dem Passwort reicht aus, um den Vault zu entsperren.

---

16. Guardian: MITM-Schutz & Response-Signierung

16.1 Das Problem mit Webanwendungen

Jede Webanwendung hat ein inhärentes Vertrauensproblem: Der Browser lädt bei jedem Besuch JavaScript vom Server herunter. Ein Man-in-the-Middle (MITM)-Angreifer — sei es ein kompromittiertes CDN, ein Firmen-Proxy oder ein bösartiger ISP — könnte theoretisch modifizierten Code einschleusen, der Verschlüsselungsschlüssel exfiltriert.

Aionda Mail begegnet diesem Problem mit dem **Guardian-Modul**, einer Browser-Erweiterungskomponente (verfügbar für Chrome und Firefox), die die Serverintegrität unabhängig verifiziert.

16.2 Architekturübersicht

Das Guardian-Modul arbeitet im Service Worker der Browser-Erweiterung — vollständig unabhängig vom JavaScript der Webanwendung. Es führt drei Arten von Verifizierung durch:

```
+-------------------------------------------------------------------+
|                    BROWSER EXTENSION (Guardian)                    |
|                                                                   |
|  +--------------------+  +------------------+  +-------------+ |
|  | Response Signature  |  | Certificate      |  | MITM Issuer | |
|  | Verification        |  | Fingerprint      |  | Detection   | |
|  | (Ed25519)           |  | Check (Firefox)  |  | (Blocklist) | |
|  |---------+----------+  |--------+---------+  |-----+------+ |
```

```
|            |                      |                      |        |
|            |--------------+-------+--------------------+        |
|                           v                                      |
|                  Security Status Badge                            |
|                  ✓ Green = Verified                               |
|                  × Red = MITM Detected                            |
|                  ! Red = Missing Signatures                       |
|-------------------------------------------------------------------+
```

16.3 Response-Signaturverifizierung (Ed25519)

Jede API-Antwort von Aionda Mails Server wird kryptografisch mit **Ed25519** (Edwards-Kurve Digital Signature Algorithm) signiert.

Signierungsprozess (serverseitig):

```
1. Server generates API response body (JSON)
2. Construct signing input: responseBody + "|" + unixTimestamp
3. Sign with Ed25519 private key → 64-byte signature
4. Attach HTTP headers:
   X-Aionda-Signature: <base64(signature)>
   X-Aionda-Timestamp: <unix_timestamp>
   X-Aionda-Key-Id: <key_identifier>
```

Verifizierungsprozess (Browser-Erweiterung):

```
1. Extract signature, timestamp, and key ID from HTTP headers
2. Look up Ed25519 public key by key ID (bundled in extension)
3. Verify key has not expired (valid_from / valid_until)
4. Check timestamp freshness: |now − timestamp| ≤ 300 seconds
5. Reconstruct signing input: responseBody + "|" + timestamp
6. crypto.subtle.verify("Ed25519", publicKey, signature, data)
7. If invalid → MITM alert, red badge
```

Zentrale Eigenschaften:

- **Replay-Schutz:** 5-Minuten-Zeitfenster verhindert das Wiedereinspielen alter Antworten
- **Manipulationserkennung:** Jede Änderung am Response Body invalidiert die Signatur
- **Schlüsselisolation:** Öffentliche Schlüssel sind in der Erweiterung gebündelt (nicht vom Server heruntergeladen)
- **Umgebungstrennung:** Dev-Schlüssel (`dev-2026-01`) können nicht auf Produktions-URLs verwendet werden und umgekehrt

16.4 Ed25519 Public Key Management

Öffentliche Schlüssel werden mit der Browser-Erweiterung in `public_key.json` ausgeliefert:

```json
{
    "keys": {
        "prod-2026-01": {
            "algorithm": "Ed25519",
            "public_key": "<base64 SPKI DER>",
            "valid_from": "2026-01-13T00:00:00Z",
            "valid_until": "2027-01-13T00:00:00Z"
        }
```

```
    }
}
```

- **Schlüsselformat:** SPKI DER (Subject Public Key Info, Distinguished Encoding Rules)
- **Schlüsselgröße:** 32 Bytes (256-Bit Ed25519 Public Key)
- **Signaturgröße:** 64 Bytes (fest)
- **Rotation:** Neue Schlüssel werden hinzugefügt, bevor alte ablaufen; Erweiterungs-Updates liefern neue Schlüssel
- **Kein Serververtrauen:** Schlüssel sind in der Erweiterungs-Binary eingebettet, nicht vom Server abgerufen

16.5 TLS-Zertifikatsverifizierung (Firefox)

Unter Firefox führt das Guardian-Modul eine zusätzliche TLS-Zertifikatsverifizierung mittels der `browser.webRequest.getSecurityInfo()`-API durch (unter Chrome aufgrund von Manifest-V3-Einschränkungen nicht verfügbar).

Verifizierungsablauf:

```
1. Browser extension intercepts HTTPS response
2. Extract TLS certificate chain from browser's security info:
   - Leaf certificate fingerprint (SHA-256)
   - Issuer Distinguished Name (O=, CN=)
   - Subject (CN=)

3. Check against known MITM issuers (hardcoded blocklist):
   ZScaler, Netskope, Fortinet, Palo Alto, Blue Coat,
   Check Point, Barracuda, Sophos, WatchGuard, Cisco Umbrella
   → If match: MITM detected, show warning

4. Check against trusted issuers:
   Google Trust Services, Cloudflare, Let's Encrypt,
   DigiCert, Sectigo
   → If match AND subject matches expected domain: OK

5. If unknown issuer: Fetch server's own certificate fingerprint
   - Server connects to itself via external routing (prevents spoofing)
   - Response is Ed25519 signed (prevents MITM from lying about cert)
   - Compare issuer organization with browser's certificate issuer
   → If mismatch: MITM suspected, show warning
```

Warum Aussteller-basierte Validierung statt Pinning? CloudFlare (als CDN genutzt) rotiert Leaf-Zertifikate über Edge-Server hinweg. Traditionelles Certificate Pinning (Abgleich exakter Fingerprints) würde Fehlalarme verursachen. Aussteller-basierte Validierung ist robuster: Die ausstellende CA bleibt stabil, auch wenn sich Leaf-Zertifikate ändern.

16.6 Self-Certificate-Fetching (Anti-Spoofing)

Der Zertifikats-Endpunkt des Servers nutzt eine clevere Anti-Spoofing-Technik:

```
Server connects to cert.trashmail.com (or cert-subdomain.domain)
with SNI = mail.aionda.com
```

```
→ Forces external routing through CloudFlare
→ Receives the actual certificate that users see
→ Prevents localhost spoofing
→ Response signed with Ed25519 to prevent tampering
```

Der Server fragt im Grunde: “Welches Zertifikat sieht die Außenwelt für meine Domain?” — und signiert die Antwort, damit die Erweiterung ihr vertrauen kann.

16.7 Sicherheitsstatus-Indikatoren

Die Erweiterung zeigt ein Badge in der Browser-Toolbar an:

Badge	Farbe	Bedeutung
✓	Grün	Alle Antworten verifiziert — Signaturen gültig
!	Orange	Veralteter Signaturschlüssel in Verwendung (Rotation steht an)
×	Rot	MITM erkannt — Signaturverifizierung fehlgeschlagen
!	Rot	Fehlende Signaturen — Antworten nicht signiert
[Shield]	Blau	Geschützter Modus — noch keine Verifizierung durchgeführt

16.8 Bedrohungsabdeckung

Angriff	Erkennungsmethode	Browser
Firmen-MITM-Proxy (ZScaler, Fortinet)	Zertifikats-Aussteller-Blocklist	Firefox
Modifizierte API-Antworten	Ed25519-Signaturverifizierung	Chrome + Firefox
Replay-Angriffe	5-Minuten-Zeitfenster	Chrome + Firefox
CDN-Kompromittierung (CloudFlare)	Response-Signatur-Abweichung	Chrome + Firefox
Zertifikatsersetzung	Aussteller-Vergleich + Server-Selbstcheck	Firefox
Dev/Prod-Schlüsselverwechslung	Umgebungsgebundene Key IDs	Chrome + Firefox

16.9 Einschränkungen

- **Chrome Manifest V3:** Kann TLS-Zertifikate nicht inspizieren — nur Response-Signaturverifizierung ist verfügbar
- **Erweiterung erforderlich:** Nutzer ohne die Erweiterung profitieren nicht vom Guardian-Schutz
- **Ed25519 ist nicht Post-Quantum:** Signaturverifizierung verwendet klassische Kryptografie. Ein ausreichend leistungsfähiger Quantencomputer könnte theoretisch Ed25519-Signaturen fälschen.

---

17. Enterprise-E-Mail-Archiv (Blockchain)

17.1 Überblick

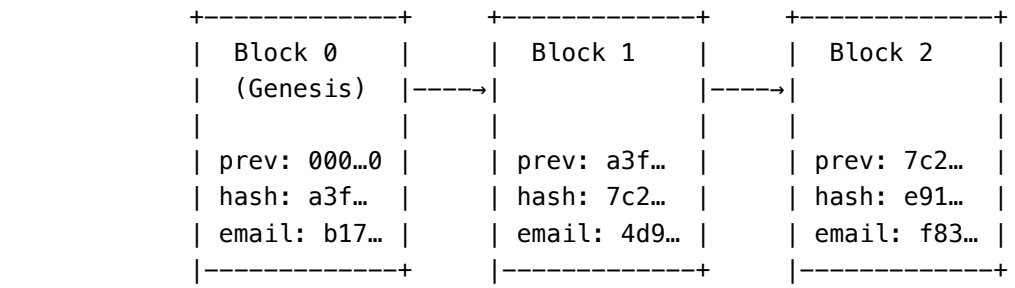
Der Enterprise-Plan von Aionda Mail umfasst ein **GoBD-konformes E-Mail-Archiv**, das durch eine kryptografische Hash-Kette (Blockchain) gesichert ist. Jede archivierte E-Mail wird zu einem unveränderlichen Block in einer unternehmensspezifischen Kette. Jede Manipulation — Änderung, Löschung oder Einfügung von Blöcken — ist kryptografisch erkennbar.

Das Archiv kombiniert zwei unabhängige Sicherheitsschichten:

1. **Hash-Kette (SHA3-256):** Garantiert Integrität und Unveränderlichkeit — beweist, dass keine E-Mail nach der Archivierung geändert oder entfernt wurde
2. **Hybrid-KEM-Verschlüsselung (CAK):** Garantiert Vertraulichkeit — der Server kann archivierte E-Mail-Inhalte nicht lesen

17.2 Hash-Ketten-Architektur

Jede archivierte E-Mail wird zu einem Block in einer sequenziellen, manipulationssicheren Kette:



Block-Hash-Berechnung:

```
block_hash = SHA3-256(
    prev_block_hash  || "|" ||
    timestamp        || "|" ||
    email_hash       || "|" ||
    direction        || "|" ||
    sender_domain    || "|" ||
    recipient_domain
)
```

Eigenschaften:

- **Hash-Algorithmus:** SHA3-256 (NIST FIPS 202)
- **Genesis-Block:** `prev_block_hash` = 64 Nullen, `block_number` = 0
- **Sequenzielle Nummerierung:** Erzwungen durch Datenbank `UNIQUE KEY (company_uuid, block_number)`
- **Eine Kette pro Unternehmen:** Vollständige Isolation zwischen Unternehmen
- **E-Mail-Hash:** `SHA3-256(sender || recipient || timestamp || size)` — Integritätsnachweis der ursprünglichen E-Mail-Daten

17.3 Manipulationserkennung

Der Ketten-Verifizierungsalgorithmus erkennt jede Form der Manipulation:

```
For each block (ordered by block_number ASC):

  1. Verify link:    block.prev_block_hash == expected_prev_hash
  2. Recalculate:    expected = SHA3-256(prev_hash | timestamp | email_hash | ...)
  3. Verify content: block.block_hash == expected
  4. Advance:        expected_prev_hash = block.block_hash

If ANY check fails → chain is broken at block N
```

Manipulationsversuch	Erkennung
E-Mail-Inhalt ändern	`email_hash` ändert sich `block_hash`-Neuberechnung schlägt fehl
Metadaten ändern (Absender, Domain, Zeitstempel)	Im Hash-Input enthalten `block_hash`-Abweichung
Einen Block löschen	`prev_block_hash` des nächsten Blocks wird verwaist
Einen Block einfügen	Bricht sequenzielle `block_number` + `prev_block_hash`-Kette
Blöcke umordnen	`UNIQUE KEY`-Constraint + sequenzielle Verifizierung verhindert dies
Gesamte Kette ersetzen	Genesis-Block-Hash würde sich von jedem externen Backup unterscheiden

Verifizierungsergebnis meldet die exakte Blocknummer, an der die Manipulation erkannt wurde, mit erwartetem vs. tatsächlichem Hash für forensische Analyse.

17.4 Company Archive Key (CAK) — Zero-Knowledge-Verschlüsselung

Archivinhalte werden Ende-zu-Ende mit einem **Company Archive Key** verschlüsselt — einem Hybrid-KEM-Schlüsselpaar (X25519 + ML-KEM-1024), das clientseitig vom Unternehmenseigner generiert wird.

```
Company Owner's Browser                          Server
──────────────────────                           ──────

1. Generate Hybrid KEM keypair (client-side):
   X25519 keypair (32 + 32 bytes)
   ML-KEM-1024 keypair (1568 + 3168 bytes)

2. Derive wrapping key from password:
   wrappingKey = HKDF-SHA256(
     password,
     salt = "trashmail-archive-{account_id}",
```

```
    info = "trashmail-archive-key-wrap",
    length = 32
  )

3. Wrap private keys:
   AES-256-GCM(x25519_priv || mlkem_priv, wrappingKey)

4. Send to server:                          →   Store:
   • Public keys (plaintext)                      archive_x25519_pub
   • Wrapped private keys (encrypted)             archive_mlkem_pub
                                                  wrapped_archive_key
```

Schlüsselverteilung an andere Mitarbeiter (Admin, Compliance Officer):

1. Der Eigentümer entschlüsselt die CAK Private Keys mit seinem Passwort
2. Der Eigentümer re-wrapped die Private Keys mit dem passwortabgeleiteten Schlüssel des Zielmitarbeiters
3. Der Server speichert die re-wrapped Kopie im Record des Mitarbeiters
4. Jeder autorisierte Mitarbeiter hat seine eigene unabhängig gewrappte Kopie

Der Server sieht die CAK Private Keys niemals im Klartext.

17.5 Was verschlüsselt wird

Wenn eine E-Mail archiviert wird, werden zwei Verschlüsselungsschichten angewendet:

Verschlüsselte Metadaten (AES-256-GCM mit Hybrid KEM):

```json
{
  "d": "INBOUND",
  "s": "user@example.com",
  "r": "admin@company.de",
  "sd": "example.com",
  "rd": "company.de",
  "sz": 45000,
  "ts": "2026-02-27T10:30:00Z",
  "ha": true,
  "ac": 3,
  "en": "John Doe"
}
```

Verschlüsselter E-Mail-Inhalt (separates Hybrid KEM Key Wrapping):

```json
{
  "subject": "Meeting notes",
  "body": "<html>...</html>",
  "from": "sender@domain.com",
  "to": "recipient@company.de"
}
```

Zero-Knowledge-Durchsetzung: Nach der Verschlüsselung werden die Klartext-Metadatenfelder in der Datenbank (sender_address, recipient_address, domains) durch ihre SHA3-256-Hashes ersetzt. Der Server speichert nur Hashes — die Originalwerte existieren nur innerhalb der verschlüsselten Blobs.

17.6 Audit Trail

Jede Aktion am Archiv wird in einer **unabhängigen Audit-Kette** protokolliert (ebenfalls hash-verkettet mit SHA3-256):

Aktion	Wann protokolliert
`EMAIL_RECEIVED` / `EMAIL_SENT` / `DRAFT_ARCHIVED`	E-Mail archiviert
`VIEW_EMAIL` / `VIEW_ATTACHMENT`	Mitarbeiter liest archivierte E-Mail
`SEARCH_ARCHIVE`	Suche durchgeführt
`EXPORT_EMAIL` / `EXPORT_REPORT`	Daten exportiert
`VERIFY_CHAIN` / `CHAIN_VERIFIED_OK` / `CHAIN_VERIFIED_BROKEN`	Integritätsprüfung
`LEGAL_HOLD_SET` / `LEGAL_HOLD_RELEASED`	Legal Hold ein-/ausgeschaltet
`ARCHIVE_DECRYPT`	CAK zum Entschlüsseln verwendet
`ADMIN_ACCESS`	Administrative Aktion

Jeder Audit-Eintrag enthält: Akteur (UUID + Rolle), IP-Adresse, Session-ID, Ziel-E-Mail-Hash und ob die Kette zum Zeitpunkt des Zugriffs gültig war.

17.7 Legal Hold & Aufbewahrung

- **Aufbewahrungsfrist:** Konfigurierbar pro Unternehmen (Standard: 10 Jahre), berechnet pro E-Mail als `archived_at + retention_years`
- **Legal Hold:** Einzelne E-Mails können unter Legal Hold gestellt werden, was die Löschung bis zur Aufhebung verhindert. Enthält Begründung, Akteur und Zeitstempel.
- **GoBD-Konformität:** Die Kombination aus unveränderlicher Hash-Kette, vollständigem Audit Trail, konfigurierbarer Aufbewahrung und Legal Hold erfüllt die Anforderungen der deutschen GoBD (Grundsätze zur ordnungsmäßigen Führung und Aufbewahrung von Büchern, Aufzeichnungen und Unterlagen in elektronischer Form sowie zum Datenzugriff).

17.8 Forensischer Export

Autorisierte Nutzer (Eigentümer, Admin) können den vollständigen Kettenstatus für unabhängige Verifizierung exportieren:

- Vollständige Kettendaten mit allen Block-Hashes
- Verifizierungsergebnis (gültig/gebrochen, Blocknummer des Bruchs falls zutreffend)
- Erwarteter vs. tatsächlicher Hash für forensische Analyse
- Letzte 50 Audit-Log-Einträge
- JSON-Format zur externen Nachverifizierung mit jeder SHA3-256-Implementierung

---

18. Was der Server sieht — und was nicht

Dieser Abschnitt dokumentiert explizit die Zero-Knowledge-Grenze.

18.1 Der Server KANN sehen

Daten	Warum sichtbar	Gegenmaßnahme
IP-Adresse	TCP/IP-Anforderung	Bei Bedarf VPN/Tor verwenden
Zeitstempel	Zeitpunkt des E-Mail-Empfangs	Inhärent zum E-Mail-Protokoll
Verschlüsselte E-Mail-Blobs	Gespeichert für den Abruf	AES-256-GCM verschlüsselt, Schlüssel dem Server unbekannt
Aufgefüllte Chiffretext-Größen	Speicheranforderung	Bucket Padding verbirgt tatsächliche Größen
Empfänger-DEA-Adresse	Routing-Anforderung	DEA ist einmalig, nicht die echte Adresse
Kontoexistenz	Authentifizierungsablauf	Schutz vor Nutzerenumeration implementiert
Öffentliche Schlüssel	Für serverseitige Verschlüsselung erforderlich	Per Definition öffentlich, nicht sensitiv
Verschlüsselte Shamir-Anteile	Speicherung für den Nutzer	XOR-verknüpft mit Schlüsseln, die der Server nicht kennt
OPAQUE Records	Authentifizierungsprotokoll	Keine Passwort-Hashes, at rest verschlüsselt

18.2 Der Server KANN NICHT sehen

Daten	Warum unsichtbar
E-Mail-Inhalt (Betreff, Body, Header)	Verschlüsselt mit ephemeren Schlüsseln, gewrappt via Hybrid KEM
Nutzerpasswort	OPAQUE — Passwort wird nie übertragen
Master Key	Wird nur im Browser aus Shamir-Anteilen rekonstruiert
Vault Private Keys	Mit Master Key vor der Speicherung verschlüsselt
E-Mail Ephemeral Keys	Mit Hybrid KEM gewrappt, Server hat keine Private Keys
Wiederherstellungsschlüssel / Mnemonik	Nur SHA3-256-Hash des abgeleiteten Schlüssels gespeichert
Passkey PRF Outputs	Hardwaregebunden, verlassen nie den Authentifikator
Ordnernamen	Verschlüsselt mit ordnerspezifischen Schlüsseln
E-Mail-Signaturen	Verschlüsselt mit Master Key
API-Anfrageinhalte	Verschlüsselt über /e Transportschicht
API-Antwortinhalte	Vor der Übertragung verschlüsselt

18.3 Kryptografische Garantie

Selbst mit vollem Zugriff auf:

- Die vollständige Datenbank
- Den gesamten Netzwerkverkehr
- Den Quellcode und die Konfiguration des Servers

- Alle OPAQUE Records und Server-Schlüssel

…kann ein Angreifer **keine einzige E-Mail** entschlüsseln, ohne das Passwort des Nutzers (oder Passkey + Wiederherstellungsschlüssel). Das ist keine Richtlinie — es ist eine mathematische Unmöglichkeit, die durch das kryptografische Design erzwungen wird.

---

19. Algorithmenreferenz

19.1 Vollständige Algorithmentabelle

Komponente	Algorithmus	Parameter	Standard
Passwort-Authentifizierung	OPAQUE	RFC 9807, aPAKE	RFC 9807
Passwort-Schlüsselableitung	PBKDF2-SHA256	600.000 Iterationen, 32B Salt, 32B Output	NIST SP 800-132
Vault-Verschlüsselung	AES-256-GCM	256-Bit Schlüssel, 96-Bit Nonce, 128-Bit Tag	NIST SP 800-38D
Klassischer Schlüsselaustausch	X25519	Curve25519, 256-Bit	RFC 7748
Post-Quantum KEM	ML-KEM-1024	Kyber-1024, NIST Level 5	NIST FIPS 203
Hybride Schlüsselableitung	HKDF-SHA256	64B IKM, info=“trashmail-hybrid-kem-v1”	RFC 5869
Secret Sharing	Shamir SSS	k=2, n=3, GF(2^8)	Shamir (1979)
Wiederherstellungsschlüssel-Kodierung	BIP39	256-Bit Entropie, 24 Wörter	BIP-0039
Wiederherstellungsschlüssel-Ableitung	HKDF-SHA3-256	Kontogebundener Salt	NIST FIPS 202
Wiederherstellungsschlüssel-Verifizierung	SHA3-256	32-Byte Output	NIST FIPS 202
OPAQUE Record-Verschlüsselung	AES-256-GCM	Serverseitige At-Rest-Verschlüsselung	NIST SP 800-38D
Passkey Vault-Unlock	WebAuthn PRF	HMAC-basiert, hardwaregebunden	WebAuthn Level 2
Kompression	gzip	Level 6	RFC 1952
Bucket Padding	Custom	17 Größen (256B–16MB), 0xDEAD Magic	—
Response-Signierung	Ed25519	256-Bit Schlüssel, 512-Bit Signatur	RFC 8032
Archiv-Hash-Kette	SHA3-256	Per-Block-Hash, sequenzielle Verkettung	NIST FIPS 202

Komponente	Algorithmus	Parameter	Standard
Archiv Key Wrapping (CAK)	HKDF-SHA256 + AES-256-GCM	Passwortabgeleiteter Wrapping Key	RFC 5869 / NIST SP 800-38D
Zertifikatsverifizierung	SHA-256	TLS-Zertifikats-Fingerprint-Vergleich	—
E-Mail-Threading	SHA-256	Hash der Message-ID	NIST FIPS 180-4

19.2 Sicherheitsniveaus

Algorithmus	Klassische Sicherheit	Post-Quantum-Sicherheit
X25519	128-Bit	Gebrochen durch Shors Algorithmus
ML-KEM-1024	256-Bit-Äquivalent	NIST Level 5 (≈AES-256)
AES-256-GCM	256-Bit	128-Bit (Grovers Algorithmus)
SHA-256	256-Bit	128-Bit (Grovers Algorithmus)
SHA3-256	256-Bit	128-Bit (Grovers Algorithmus)
Hybrid KEM (kombiniert)	128-Bit (X25519-gebunden)	Level 5 (ML-KEM-gebunden)

---

20. Vergleich mit anderen Anbietern

Merkmal	Aionda Mail	Tuta Mail	Proton Mail
Land	Deutschland (Stuttgart)	Deutschland (Hannover)	Schweiz
Zero-Knowledge	Ja (OPAQUE + clientseitige Krypto)	Ja	Ja
Post-Quantum	Ja (ML-KEM-1024 + X25519 Hybrid)	Ja (Kyber-basiert)	In Entwicklung
Passwort-Protokoll	OPAQUE (RFC 9807) — Passwort verlässt nie den Browser	bcrypt (Passwort wird per TLS an Server gesendet)	SRP-basiert
Betreff verschlüsselt	Ja	Ja	Nein
Header verschlüsselt	Ja	Teilweise	Nein
Kontaktnamen verschlüsselt	Ja (im Vault)	Ja	Nein
Wegwerf-E-Mail-Adressen (DEAs)	Ja (Kernfunktion, unbegrenzt für Plus)	Nein	Ja (via SimpleLogin)
Browser-Erweiterung	Ja (Chrome + Firefox)	Nein	Via SimpleLogin

Merkmal	Aionda Mail	Tuta Mail	Proton Mail
Ordnerfreigabe	Ja (Hybrid KEM pro Empfänger)	Eingeschränkt	Ja
Open-Source Client	Nein	Ja	Ja
Sicherheitsaudit	Geplant	Ja	Ja
Passwort-Recovery	Nein (beabsichtigt)	Nein (beabsichtigt)	Nein (beabsichtigt)
Passkey-Unterstützung	Ja (FIDO2 + PRF)	Ja	Ja
PGP-Unterstützung	Ja (eingehend + ausgehend)	Nein (eigenes Protokoll)	Ja (OpenPGP)
GoBD-konformes E-Mail-Archiv	Ja (SHA3-256 Hash-Kette + Hybrid KEM)	Nein	Nein
MITM-Erkennung (Browser-Erw.)	Ja (Ed25519-Signaturen + TLS-Check)	Nein	Nein
Perfect Forward Secrecy (API)	Ja (Einmal-Schlüssel pro Request)	Unbekannt	Unbekannt
E-Mail-Größenverschleierung	Ja (Bucket Padding)	Unbekannt	Nein

---

21. Einschränkungen & ehrliche Grenzen

21.1 Vertrauensmodell für Webanwendungen

Aionda Mail ist eine Webanwendung. Bei jedem Seitenaufruf lädt der Browser JavaScript von unseren Servern herunter. Ein raffinierter Angreifer, der unsere Server kompromittiert, könnte theoretisch modifiziertes JavaScript ausliefern, das Schlüssel exfiltriert.

Aktuelle Gegenmaßnahmen:

- Subresource Integrity (SRI) Hashes auf allen Script-Tags
- Content Security Policy (CSP) Header beschränken Script-Quellen
- Aller kritischer kryptografischer Code ist im Haupt-Application-Bundle enthalten
- **Guardian Browser-Erweiterung** (Abschnitt 16): Ed25519-Signaturverifizierung auf allen API-Antworten erkennt serverseitige Manipulation; TLS-Zertifikatsverifizierung (Firefox) erkennt MITM-Proxys

Geplante Gegenmaßnahmen:

- Service Worker Caching für Offline-Betrieb (reduziert Vertrauensabhängigkeit beim Laden)

21.2 Metadaten-Sichtbarkeit

Während E-Mail-Inhalte vollständig verschlüsselt sind, sind bestimmte Metadaten für den Server sichtbar:

- Wann E-Mails empfangen wurden (Zeitstempel)
- Welche DEA-Adresse die E-Mail empfangen hat
- Ungefähre E-Mail-Größe (innerhalb der Bucket-Grenzen)
- Kontoaktivitätsmuster

21.3 E-Mail-Verarbeitungsprotokoll

Zu Diagnosezwecken enthält Aionda Mail ein optionales **E-Mail-Verarbeitungsprotokoll**, das den Rohinhalt eingehender E-Mails vorübergehend speichern kann. Diese Funktion ist pro Wegwerf-E-Mail-Adresse (DEA) konfigurierbar und kann in den DEA-Einstellungen aktiviert oder deaktiviert werden ("E-Mail-Inhalt protokollieren").

Bei Aktivierung (pro DEA einstellbar):

- Die vollständige SMTP-Rohnachricht (Header + Body) wird im Klartext auf dem Server gespeichert
- Automatische Löschung nach einer kurzen Aufbewahrungsfrist (unter 7 Tagen)
- Nur für den Kontoinhaber über die authentifizierte API zugänglich
- Zweck: Fehlerbehebung bei Zustellproblemen, Überprüfung der Weiterleitung, Bewertung von Spam-Filterentscheidungen

Bei Deaktivierung:

- Es werden keine E-Mail-Inhalte im Verarbeitungsprotokoll gespeichert
- Nur Metadaten werden protokolliert (Absenderadresse, Zeitstempel, Zustellstatus)
- Die Vault-Verschlüsselung bleibt der einzige Speichermechanismus

Wichtig: Dieses Verarbeitungsprotokoll ist unabhängig vom verschlüsselten Vault. E-Mails im Vault sind immer mit Hybrid KEM verschlüsselt, unabhängig von der Protokolleinstellung. Das Verarbeitungsprotokoll existiert als Legacy-Funktion aus dem E-Mail-Weiterleitungssystem und bietet betriebliche Transparenz. Nutzer, die eine strikte Zero-Knowledge-Speicherung für alle E-Mails benötigen, sollten diese Option deaktivieren.

21.4 Sicherheit externer E-Mails

E-Mails, die an oder von Nicht-Aionda-Adressen gesendet/empfangen werden, durchlaufen die Standard-E-Mail-Infrastruktur (SMTP). Obwohl sie verschlüsselt im Vault gespeichert sind, war der E-Mail-Inhalt während des Transits sichtbar, sofern nicht PGP-Verschlüsselung verwendet wurde.

21.5 Kein Key Escrow

Es gibt keinen Master Key, keine Hintertür und keinen Wiederherstellungsmechanismus, der der Aionda GmbH zur Verfügung steht. Wenn ein Nutzer sein Passwort und alle Wiederherstellungsmethoden verliert, sind seine Daten dauerhaft verloren. Dies ist eine bewusste Designentscheidung, die die Integrität des Zero-Knowledge-Modells beweist.

---

22. Roadmap

Meilenstein	Status	Ziel
Zero-Knowledge-Architektur	Abgeschlossen	—
Post-Quantum Hybrid KEM (ML-KEM-1024)	Abgeschlossen	—
OPAQUE-Authentifizierung (RFC 9807)	Abgeschlossen	—
Shamir Secret Sharing (2-of-3)	Abgeschlossen	—
Verschlüsselte API-Transportschicht	Abgeschlossen	—
Passkey/WebAuthn PRF Unterstützung	Abgeschlossen	—
Ende-zu-Ende-verschlüsselter Kalender	Abgeschlossen	—
GoBD-konformes E-Mail-Archiv (Blockchain)	Abgeschlossen	—
Guardian MITM-Schutz (Ed25519)	Abgeschlossen	—
TLS-Zertifikatsverifizierung (Firefox)	Abgeschlossen	—

Dokumentenhistorie

Version	Datum	Änderungen
1.0	März 2026	Erstveröffentlichung
1.1	April 2026	Neues Kapitel 10: Vault Drive (Per-File-Key-Architektur, Sharing mit Key-Rewrap)
1.2	April 2026	Abschnitt 10.11: Externes Teilen — öffentliche Share-Links mit Hybrid-KEM-Hüllen, unlock_token-Flow, Argon2id-Passwort-Modus, URL-Fragment für link_only, manipulationssichere Audit-Chain (EXT_SHARE_*) und Kanal-Wahl durch Eigentümer

Version	Datum	Änderungen
1.3	Mai 2026	Neues Kapitel 11: Aionda Chat — Post-Quantum-E2EE-Echtzeit-Messaging via AAR (Aionda Async Ratchet), eine hybride X25519 + ML-KEM-1024-Variante von Signal X3DH + Double Ratchet. Forward Secrecy pro Nachricht, Post-Compromise Security und Integration in die Enterprise-Audit-Chain. Folgekapitel auf 12-22 umnummeriert. PT-BR- und PT-PT-Übersetzungen ergänzt. Doppel-Numbering-Bug im PDF-Rendering behoben (LaTeX-Auto-Nummerierung deaktiviert; Kapitelnummern stammen jetzt nur noch aus den Headings).

Kontakt

Aionda GmbH Stephan Ferraro Stuttgart, Germany

Email: contact-46epp9ba@contact.aionda.com Web: https://mail.aionda.com

---

Dieses Dokument beschreibt die Sicherheitsarchitektur von Aionda Mail, Stand Mai 2026. Kryptografische Systeme entwickeln sich weiter — dieses Dokument wird aktualisiert, wenn sich die Architektur ändert.