Die Kryptokalypse

Post-Quanten-Kryptographie und Open Source Software

Stefan Schumacher

Chemnitzer Linux-Tage 2026

$ Id: Kryptokalypse-Input.tex,v 1.47 2026/03/24 18:17:27 stefan Exp $

cryptomancer.de

1 Einführung

Über mich

- Geek, Nerd, Hacker
- Robotron KC85/3 Mitte der 80er Jahre
- Kryptographie seit 30 Jahren
- einige Jahre NetBSD-Entwickler
- ehem. Sicherheitsforscher u.a. Fach-Didaktik der Kryptographie
- jetzt Sicherheitsarchitekt bei einem öffentlichen IT-Dienstleister

Über mich

einige Vorträge zum Thema

- CCC2004: Einführung in die Kryptographie
- CLT2004: Anwendung kryptographischer Programme am Beispiel von NetBSD
- CLT2008: Sichere Passwörter
- CLT2011: Kryptographische Dateisysteme im Detail
- CLT2015: Abhörsichere Internet-Telefonie mit OSTN und OSTEL
- CLT2016: Zwei-Faktor-Authentifizierung mit Yubikeys
- CLT2019: Kryptographische Dateisysteme im professionellen Umfeld
- CLT2023: Die Matrix-Verschlüsselung näher betrachtet
- CLT2024: Sichere Datenhaltung und Backup in der Cloud
- CLT2025: Passwortlose Logins mit PassKeys
- Kielux25: Sichere Verschlüsselung in Gruppen mit dem MLS-Protokoll

Über mich

- [1] S. Schumacher, *Einführung in kryptographische Methoden*, 2004. besucht am 19. Apr. 2004. Adresse: http://www.cryptomancer.de/21c3/21c3-kryptographie-paper.pdf
- [2] S. Schumacher, „Kryptographische Dateisysteme im Detail," in *Chemnitzer Linux-Tage 2011, Tagungsband*, (Technische Universität Chemnitz), Team der Chemnitzer Linux-Tage, Hrsg., Chemnitz: Universitätsverlag, 2011, S. 39–46. Adresse: https://monarch.qucosa.de/api/qucosa%3A19466/attachment/ATT-0/
- [3] S. Schumacher, „Zwei-Faktor-Authentifizierung mit Yubikey-Token, Ein kostengünstiges Verfahren," *UpTimes*, S. 16–27, 2 2018, ISSN: 1860-7683. besucht am 1. Feb. 2019. Adresse: https://www.guug.de/uptimes/2018-2/uptimes_2018-02.pdf

2 Grundlagen

Glossar

symmetrisches Kryptosystem ein geteilter geheimer Schlüssel für Verschlüsselung/Entschlüsselung nötig

asymmetrisches Kryptosystem kein geteilter geheimer Schlüssel für Verschlüsselung/Entschlüsselung nötig

Diffie-Hellmann Key Exchange (DH KEX): Protokoll zur Schlüsselvereinbarung, Alice und Bob können über einen öffentlichen (abhörbaren) Kanal einen geheimen Schlüssel für symmetrische Kryptographie vereinbaren

Key Derivation Function Schlüsselableitungsfunktion, leitet $1..n$ neue Schlüssel aus einem geheimen Schlüssel ab

(Perfect) Forward Secrecy (PFS) Sitzungsschlüssel werden so vereinbart, dass nach einem Einbruch *vergangene* Sitzungsschlüssel nicht gebrochen werden können (break-backward protection)

PSK Pre Shared Key, symmetrisches Verfahren mit vorher geteiltem geheimen Schlüssel

HPKE Hybrid Public Key Encryption: Symmetrischer Session-Key wird mit einem asymmetrischen Key-Encryption-Key verschlüsselt

Break-in recovery Sitzungsschlüssel werden so vereinbart, dass nach einem Einbruch auch *zukünftige* Sitzungsschlüssel nicht gebrochen werden können (break-forward protection)

persistent nicht-flüchtig, Langzeitschlüssel/ID-Schlüssel

ephemeral flüchtig, Sizungsschlüssel, wird aus dem Langzeitschlüssel abgeleitet

E2EE / Ende-zu-Ende Verschlüsselung Kommunikation wird zwischen Alice und Bob so verschlüsselt, das niemand dazwischen mitlauschen kann, egal ob ISP oder Server-Betreiber

Merkle-Tree Binärbaum, in dem jeder Knoten den Hash über alle seine Unterbäume bildet

Authentizität Echtheit des Absenders (Web of Trust/Zertifikate)

Integrität Daten wurden nicht verändert (Signatur)

Zurechenbarkeit Nachrichten sind dem zuzuordnen, der sie abgeschickt hat

Verbindlichkeit Sender kann Urheberschaft gesendeter Nachrichten nicht abstreiten

plausible Deniability Gegenteil zu Zurechenbarkeit && Verbindlichkeit, Alice und Bob können sich sicher sein, dass sie mit Bob bzw. Alice kommunizieren, aber Mallory kann nicht beweisen, dass Alice und Bob kommuniziert haben, im Englischen auch Off-the-Record genannt

Malleability Formbarkeit kryptographischer Nachrichten, d.h. Zurechenbarkeit && Verbindlichkeit können ausgehebelt werden

Mitgliedschaftsauthentifizierung jeder Teilnehmer kann alle Mitgliedschaften in der Gruppe überprüfen

Device (Matrix) *alle* End-Geräte eines Nutzers

Client (MLS) Mitglieder einer Gruppe

Epoche (MLS) Zustand einer Gruppe zu einem Zeitpunkt

LeafNode (MLS) Eigenschaft eines jeden Mitglieds mit Identität, Credentials und Fähigkeiten

Attestation Beglaubigung der Integrität und Authentizität von Daten

Formelzeichen M: Message/Nachricht; K: Key S: Secret/Geheimnis pub: public $priv$: private sig: signature enc: decryption

Asymmetrische Kryptographie

- Schlüsselpaar aus privatem und öffentlichem Schlüssel
- Prinzip:
  - Zufallszahl würfeln $\rightsquigarrow$
  - Schlüsselgenerierungsoperation durchführen $\rightsquigarrow k_s$+ k_p
  - k_p veröffentlichen
- Anforderungen: Zufallszahl ist möglichst zufällig und groß, Schlüsselgenerierungsoperation ist nicht umkehrbar
- Vorteile: Schlüsselaustausch muss nicht geheimgehalten werden, digitale Signaturen möglich
- Schlüsselgenerierungsoperation: Primfaktoren, diskreter Logarithmus in endlichen Körpern, diskreter Logarithmus in elliptischen Kurven

Asymmetrische Kryptographie

RSA-Challenge

2009: RSA-768 (768 Bit) in 2000 CPU-Jahren auf 2.2GHz-Opteron-CPU

```
123018668453011775513049495838496272077285356959533479219732245215172640050726365751874520219978646938995647494277406384592519255732630345373154826850791702612214291346167042921431160222124047927473779408066535141959745985690214341332478071698956898786044169848212690817704794983713768568912431388982883793878002287614711652531743087737814467999489367460436667995904282446337996279526322791581643430876426760322838157396665112792333734171433968102700927987363089177
```

Asymmetrische Kryptographie
Schlüsselkapselungsverfahren
Signifikant langsamer als symmetrische Kryptographie (>Faktor 1000)

- 256 Bit Sitzungsschlüssel x zufallsgenerieren
- m mit Sitzungsschlüssel symmetrisch verschlüsseln $c_1 = Enc_x(m)$
- Sitzungsschlüssel ggf. auffüllen
- Sitzungsschlüssel mit öffentlichem RSA/ECC/ElGamal-Schlüssel k verschlüsseln $c_2 = Enc_k(x)$
- Chiffrat und verschlüsselten Sitzungsschlüssel verschicken $c = c_1 \oplus c_2$

Keine Perfect-Forward-Secrecy! $\rightsquigarrow$ ECDHE

3 Quantencomputer

Quantencomputer

- Paul Benioff & Richard Feynman ab 1980 [4], [5], [6]
- arbeiten mit geeigneten quantenmechanischen Systemen
- Superpositionszustände und Quantenverschränkung
- Quantenverschränkung: zusammengesetztes System nimmt einen wohldefinierten Zustand ein, ohne dass man jedem Teilsystem einen wohldefinierten Zustand zuordnen kann [7]
- Quantenparallelismus: mehrere Operationen gleichzeitig ausführen
- Qubit: Quanten-Bit $\rightsquigarrow 2^n$ sicher unterscheidbare (messbare) Zustände
- In der Theorie: 50 Qubits zum Brechen von RSA nötig
- In der Realität: 2022: 433 Qubits (2^{433} Zustände) gebaut [8]

Literatur:

- [4] P. Benioff, „The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines," *Journal of statistical physics*, Jg. 22, Nr. 5, S. 563–591, 1980
- [5] P. A. Benioff, „Quantum mechanical Hamiltonian models of discrete processes that erase their own histories: Application to Turing machines," *International Journal of Theoretical Physics*, Jg. 21, Nr. 3, S. 177–201, 1982
- [6] R. P. Feynman, „Quantum mechanical computers.," *Found. Phys.*, Jg. 16, Nr. 6, S. 507–532, 1986
- [7] A. Einstein, B. Podolsky und N. Rosen, „Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?" *Physical review*, Jg. 47, Nr. 10, S. 777, 1935
- [8] J. Preskill, *Quantum computing and the entanglement frontier*, 2012. arXiv: 1203.5813 [quant-ph]. Adresse: https://arxiv.org/abs/1203.5813

Quantencomputer

- Quantenrauschen: systematische Messfehler
- Laser-Interferometer-Gravitationswellen-Observatorium: 40Kg schwere Spiegel des Gravitationswellen-Detektors um $10^{-20}m$ verschoben $\widehat{=}$ 100 Milliardstel Wasserstoff-Atomdurchmesser [9]
- Quantencomputer kann klassischen Computer simulieren und umgekehrt
- Quanten-Turing-Maschine und Quanten-Komplexität analog zur klassischen Komplexität [10], [11]
- Quantenüberlegenheit: Zeitpunkt, ab dem ein Quantencomputer Probleme lösen kann, die ein klassischer Computer nicht in realisierbarer Zeit lösen kann

Literatur:

- [9] H. Yu u. a., „Quantum correlations between light and the kilogram-mass mirrors of LIGO," *Nature*, Jg. 583, Nr. 7814, S. 43–47, 2020
- [10] D. Deutsch, „Quantum theory, the Church–Turing principle and the universal quantum computer," *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, Jg. 400, Nr. 1818, S. 97–117, 1985
- [11] E. Bernstein und U. Vazirani, „Quantum complexity theory," in *Proceedings of the twenty-fifth annual ACM symposium on Theory of computing*, 1993, S. 11–20

Shor-Algorithmus

- Faktorisierungsverfahren, probabilistisch, Monte-Carlo-Algorithmus [12]
- berechnet einen nichttrivialen Teiler einer zusammengesetzten Zahl
- polynomielle Laufzeit für Primfaktorzerlegung und zur Berechnung des diskreten Logarithmus
- Schätzung: Brechung von RSA2048 ca. 10 bis 100 Millionen Qubits benötigt [13]
- Shors Algorithmus versagt für hinreichend große Primfaktoren durch Quantenrauschen fast sicher [14]

Literatur:

- [12] P. W. Shor, „Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer," *SIAM Journal on Computing*, Jg. 26, Nr. 5, S. 1484–1509, Okt. 1997, ISSN: 1095-7111. DOI: 10.1137/s0097539795293172 Adresse: http://dx.doi.org/10.1137/S0097539795293172
- [13] C. Gidney und M. Ekerå, „How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits," *Quantum*, Jg. 5, S. 433, Apr. 2021, ISSN: 2521-327X. DOI: 10.22331/q-2021-04-15-433 Adresse: http://dx.doi.org/10.22331/q-2021-04-15-433
- [14] J.-Y. Cai, „Shor's algorithm does not factor large integers in the presence of noise," *Science China Information Sciences*, Jg. 67, Nr. 7, Juni 2024, ISSN: 1869-1919. DOI: 10.1007/s11432-023-3961-3 Adresse: http://dx.doi.org/10.1007/s11432-023-3961-3

Grovers Algorithmus

- Suche in unsortierter Datenbank in $\mathcal{O}\left(\sqrt{N}\right)$
- z.B. erschöpfende Suche des Schlüsselraumes, Kollisionsangriff, Urbild-Angriffe
- quadratische Beschleunigung gegenüber $\mathcal{O}(N)$
- signifikante Beschleunigung für sehr große $\mathcal{N}$ [15]
- Sicherheitsniveau symmetrischer Verfahren wird ca. halbiert: AES-128 $\rightsquigarrow$ AES-64
- c.f. Pollard-Rho-Methode

Literatur:

- [15] L. K. Grover, „A fast quantum mechanical algorithm for database search," in *Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing*, 1996, S. 212–219

4 Quantensichere Algorithmen

Symmetrische Verfahren

- Sicherheitsniveau durch Grover halbiert
- Verdoppelung der Schlüsselgrößen
- derzeit empfohlenes Sicherheitsniveau: 120 Bit
- Schlüsselgrößen größer 240
- AES-256, ChaCha20-256, SHA-3-512, HMAC-AES/SHA ≥ 256

Literatur:

- [16] „Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard, FIPS 203," 2024. besucht am 17. Aug. 2025. Adresse: https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.203
- [17] „Module-Lattice-Based Digital Signature Standard, FIPS 204," 2024. besucht am 17. Aug. 2025. Adresse: https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.204
- [18] „Stateless Hash-Based Digital Signature Standard, FIPS 205," 2024. besucht am 17. Aug. 2025. Adresse: https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.205
- [19] „Recommendation for Stateful Hash-Based Signature Schemes, NIST Special Publication 800-208," 2020. besucht am 19. Aug. 2025. Adresse: https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-208

Standardisierungsprozess

- US NIST startet Standardisierungsprozess auf der PQCrypto 2016
- offener Standardisierungsprozess von AES 1997-2000 als Vorbild
- nach der Kritik am DES/3DES-Standardisierungsprozess durch die NSA
- CfP zum Ende 2017
- 23 Signaturverfahren und 59 KEM-Verfahren eingereicht
- Analyse der Verfahren in 3 Runden
- 2022: Bekanntgabe der ersten 4 Gewinner [16], [17], [18], [19]
- 2025: Bekanntgabe des Ersatz-Algorithmus für KEM (Hamming Quasi-Cyclic)
- Dritte Runde des Standardisierungsprozesses für Digitale Signaturverfahren läuft
- Oktober 2024: 14 Kandidaten für Runde 3 ausgewählt

Literatur:

- [16] „Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard, FIPS 203," 2024. besucht am 17. Aug. 2025. Adresse: https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.203
- [17] „Module-Lattice-Based Digital Signature Standard, FIPS 204," 2024. besucht am 17. Aug. 2025. Adresse: https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.204
- [18] „Stateless Hash-Based Digital Signature Standard, FIPS 205," 2024. besucht am 17. Aug. 2025. Adresse: https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.205
- [19] „Recommendation for Stateful Hash-Based Signature Schemes, NIST Special Publication 800-208," 2020. besucht am 19. Aug. 2025. Adresse: https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-208

FIPS203 - ML-KEM (Kyber)

- Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism (ML-KEM)
- Learning with errors: Schwierigkeit, aus einer Reihe von Gleichungen mit fehlerbehafteten Variablen die ursprünglichen Variablen zu bestimmen
- z.B. Fehlerrate in der Vektor-/Matrix-Multiplikation
- Module/Gitter: diskrete Untergruppe des euklidischen Raumes
- Key Encapsulation zum Austausch eines geteilten Geheimnisses
- Zufälligkeit wird von beiden Parteien beigesteuert, geteiltes Geheimnis kann genutzt werden, ohne weitere Schlüsselableitung
- keine Authentifizierung der Kommunikationspartner!
- Aber: ohne PFS, da keine ephemeralen Schlüssel!

FIPS203 - ML-KEM - Kyber
Schlüsselgrößen

ML-KEM:	512	768	1024	RSA:	3072	7680	X25519
security level	128	192	256		128	192	128
C	768	1088	1568				
K_p	1632	1184	1568		625	1405	119
K_s	800	2400	3168		2484	6002	113

Vergleich mit ECDH/Curve25519: [20]

- Laufzeit Faktor 2,5
- Energieverbrauch Faktor 2,5
- Metadaten x70

https://www.cryptomancer.de/pqcbenchmark

Literatur:

- [20] I. Duits, „The post-quantum Signal protocol: Secure chat in a quantum world,“ Magisterarb., University of Twente, 2019

FIPS204/FIPS205
Signaturverfahren

- FIPS204: Module-Lattice-Based Digital Signature Standard
  ML-DSA-44 ML-DSA-65 ML-DSA-87
- FIPS205: Stateless Hash-Based Digital Signature Standard
  SLH-DSA-SHA2-128 SLH-DSA-SHA2-192 SLH-DSA-SHA2-256 SLH-DSA-SHAKE-128 SLH-DSA-SHAKE-192 SLH-DSA-SHAKE-256
- f == fast; s == small
- stateless: keine Zustandsübergänge zwischen den Operationen
- Einmal-Signatur für jedes Blatt eines Merkle-Baumes
- konservativer »Ersatz« für ML-DSA
- Wenn möglich, beides verwenden

5 Stand der Dinge im FLOSSiversum (3/2026)

X.509-Zertifikate, JWT

- X.509-Zertifikate: RFC9935 - 6.2.2026
- OIDs für Algorithmen enthalten diverse hybride Verfahren
- https://pkic.org/pqccm/ PKI PQC Capabilities Matrix
- JWT: Ebenfalls noch kein neuer Standard vorhanden [21]
- FIDO2 (Passkeys): IANA CBOR Object Signing and Encryption (COSE) und JSON Object Signing and Encryption (JOSE): ML-DSA aufgenommen

Literatur:

- [21] A. Alkhulaifi und E.-S. M. El-Alfy, „Exploring Lattice-based Post-Quantum Signature for JWT Authentication: Review and Case Study," in *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, 2020, S. 1–5. DOI: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129505
- [22] A. C. Chen, „A Comparative Study of Hybrid Post-Quantum Cryptographic X. 509 Certificate Schemes," *arXiv preprint arXiv:2511.00111*, 2025
- [23] W. Li, Y. Li und T. Chung, *pqRPKI: A Practical RPKI Architecture for the Post-Quantum Era*, 2026. arXiv: 2603.06968 [cs.NI]. Adresse: https://arxiv.org/abs/2603.06968

TLS1.3

- TLS1.3 führt 3 neue Hybridverfahren ein
  X25519MLKEM768, SecP256r1MLKEM768, SecP384r1MLKEM1024
- X25519MLKEM768: wird wahrscheinlich nicht durch BSI empfohlen werden
- alle Web-Browser unterstützen X25519MLKEM768
- https://pq.cloudflareresearch.com/
- https://tls.support/
- https://browserleaks.com/tls

Beispiel-Verbindung mit X25519MLKEM768

```
openssl s_client -connect apache.org:443 -groups X25519MLKEM768
...
Peer signing digest: SHA256
Peer signature type: rsa_pss_rsae_sha256
Negotiated TLS1.3 group: X25519MLKEM768
...
```

Beispiel-Verbindung ohne X25519MLKEM768

```
openssl s_client -connect openssl.org:443
...
Peer signing digest: SHA256
Peer signature type: rsa_pss_rsae_sha256
Peer Temp Key: X25519, 253 bits
...
```

Benchmarking Post Quantum Cryptography with OpenSSL 3.5

NetBSD 10, Intel Atom 230, SATA-HDD, OpenSSL 3.5.2

- https://www.cryptomancer.de/pqcbenchmark
- md5: sign 16G in 392.39s
- SLH-DSA-SHAKE-256f: sign 16G in 01.87s
- SLH-DSA-SHAKE-256s: sign 16G in 10.51s
- ML-DSA-87: sign 16G in 00.62s
- x25519: 5031 connections in 601 real seconds
- 25519MLKEM768: 4976 connections in 601 real seconds

Literatur:

- [24] C. Turino u. a., „PQC-LEO: An Evaluation Framework for Post-Quantum Cryptographic Algorithms," in *2025 IEEE 7th International Conference on Trust, Privacy and Security in Intelligent Systems, and Applications (TPS-ISA)*, IEEE, Nov. 2025, S. 237–247. DOI: 10.1109/tps-isa67132.2025.00033 Adresse: http://dx.doi.org/10.1109/TPS-ISA67132.2025.00033
- [25] D. Gómez-Cambronero, D. Munteanu und A. I. González-Tablas, *Layered Performance Analysis of TLS 1.3 Handshakes: Classical, Hybrid, and Pure Post-Quantum Key Exchange*, 2026. arXiv: 2603.11006 [cs.CR]. Adresse: https://arxiv.org/abs/2603.11006
- [26] R. Chhetri, *Benchmarking Post-Quantum Cryptography on Resource-Constrained IoT Devices: ML-KEM and ML-DSA on ARM Cortex-M0+*, 2026. arXiv: 2603.19340 [cs.CR]. Adresse: https://arxiv.org/abs/2603.19340

OpenSSH/GnuPG

- OpenSSH 10: `mlkem768x25519-sha256` als Standard-KEX
- GnuPG ab 2.5:
  - LibrePGP: Alternativer *Standard* zu OpenPGP (RFC 4880)
  - ML-KEM-768+BrainpoolP256r1, ML-KEM-1024+BrainpoolP384r1, ML-KEM-768+X25519, ML-KEM-1024+X448
- Yubico Yubikeys / Token2 / Nitrokey3 als GnuPG-Smartcard: neue Firmware nötig

Software

- Open Quantum Safe Project `oqsprovider`
- OpenSSL ab 3.5, GnuTLS, BoringSSL, rustls
- Bouncy Castle Java 1.79 / C# .NET 2.6.1
- Nginx, Rpxy, Traefik, Caddy
- C: liboqs, C++ Botan, Zig, Go, Node
- OpenVPN und Wireguard arbeiten an PQC
- `crypto-policies(7) FUTURE`

6 Was ist zu tun?

Was ist zu tun?

- Krypto-Kataster: Wo findet Verschlüsselung statt?
  Datenflussdiagramme, Schnittstellendefinitionen
  TLS, Backups, Datenbanken, Firmware ...
- Jetzt: Hybrid – später Ersetzen: Prä- und Post-QC kombinieren (z.b. tunneln oder überschlüsseln)
- Kryptoagilität: Algorithmen und Cipher-Suiten austauschbar einbinden
- Data at Rest und Data in Motion: Datenbanken, Dateisysteme, Storage, Backups, VPNs, SSH, QUIC, WebRTC, Zertifikate, HSM
- Hardwaretoken: FIDO2 Passkeys, Yubikey, Nitrokey, Token2 ...
- Entwicklung: Frameworks und Bibliotheken beobachten, Interoperabilität überwachen, Schlüssel rotierbar halten
- Maßnahmenplan: Compliance erfordert Migrationspläne mit Umsetzungsplan *jetzt*!

Literatur:

- [27] E. Hirsch u. a., „Detecting Cryptographically Relevant Software Packages with Collaborative LLMs," in *Proceedings of the 12th International Conference on Information Systems Security and Privacy*, SCITEPRESS - Science und Technology Publications, 2026, S. 354–365. DOI: 10.5220/0014441400004061 Adresse: http://dx.doi.org/10.5220/0014441400004061

Kontakt

Fragen?

- https://www.cryptomancer.de/posts/20250817kielkryptokalypse/
- https://mastodon.social/@0xKaishakunin
- 7B2B 45B1 330E 579E 3C3E 9B34 089D 8068 8050 ECCF
- public [at] cryptomancer [dot] de

BSI TR

- https://github.com/gematik/ecc-brainpool-how-to
- [28] *Migration zu Post-Quanten-Kryptografie. Handlungsempfehlungen des BSI*
- [29] *Kryptographische Verfahren: Empfehlungen und Schlüssellängen*
- [30] *Kryptographische Verfahren: Verwendung von Transport Layer Security (TLS)*
- [31] *Kryptographische Verfahren: Verwendung von Secure Shell (SSH)*
- [32] *Kryptographische Verfahren: X.509 Zertifikate und Zertifizierungspfadvalidierung*
- [33] *TR-03107-1 Elektronische Identitäten und Vertrauensdienste im E-Government: Vertrauensniveaus und Mechanismen*
- [34] *Elliptic Curve Cryptography*
- [35] *TR-03116-4 Kryptographische Vorgaben für Projekte der Bundesregierung: Kommunikationsverfahren in Anwendungen*
- [36] *TR-03124-1eID-Client – Part 1: Specifications*
- [37] *TR-03175 Infrastruktur zur Absicherung von Dokumenten mit digitalen Siegeln*
- [38] *Certificate Policy 2024: Root-CA der PKI-1-Verwaltung*

Literatur

Literatur

[1] S. Schumacher, *Einführung in kryptographische Methoden*, 2004. besucht am 19. Apr. 2004. Adresse: http://www.cryptomancer.de/21c3/21c3-kryptographie-paper.pdf

[2] S. Schumacher, „Kryptographische Dateisysteme im Detail," in *Chemnitzer Linux-Tage 2011, Tagungsband*, (Technische Universität Chemnitz), Team der Chemnitzer Linux-Tage, Hrsg., Chemnitz: Universitätsverlag, 2011, S. 39–46. Adresse: https://monarch.qucosa.de/api/qucosa%3A19466/attachment/ATT-0/

[3] S. Schumacher, „Zwei-Faktor-Authentifizierung mit Yubikey-Token, Ein kostengünstiges Verfahren," *UpTimes*, S. 16–27, 2 2018, ISSN: 1860-7683. besucht am 1. Feb. 2019. Adresse: https://www.guug.de/uptimes/2018-2/uptimes_2018-02.pdf

[4] P. Benioff, „The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines," *Journal of statistical physics*, Jg. 22, Nr. 5, S. 563–591, 1980.

[5] P. A. Benioff, „Quantum mechanical Hamiltonian models of discrete processes that erase their own histories: Application to Turing machines," *International Journal of Theoretical Physics*, Jg. 21, Nr. 3, S. 177–201, 1982.

[6] R. P. Feynman, „Quantum mechanical computers.," *Found. Phys.*, Jg. 16, Nr. 6, S. 507–532, 1986.

[7] A. Einstein, B. Podolsky und N. Rosen, „Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?" *Physical review*, Jg. 47, Nr. 10, S. 777, 1935.

[8] J. Preskill, *Quantum computing and the entanglement frontier*, 2012. arXiv: 1203.5813 [quant-ph]. Adresse: https://arxiv.org/abs/1203.5813

[9] H. Yu, L. McCuller, M. Tse, N. Kijbunchoo, L. Barsotti und N. Mavalvala, „Quantum correlations between light and the kilogram-mass mirrors of LIGO," *Nature*, Jg. 583, Nr. 7814, S. 43–47, 2020.

[10] D. Deutsch, „Quantum theory, the Church–Turing principle and the universal quantum computer," *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, Jg. 400, Nr. 1818, S. 97–117, 1985.

[11] E. Bernstein und U. Vazirani, „Quantum complexity theory," in *Proceedings of the twenty-fifth annual ACM symposium on Theory of computing*, 1993, S. 11–20.

[12] P. W. Shor, „Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer," *SIAM Journal on Computing*, Jg. 26, Nr. 5, S. 1484–1509, Okt. 1997, ISSN: 1095-7111. DOI: 10.1137/s0097539795293172 Adresse: http://dx.doi.org/10.1137/S0097539795293172

[13] C. Gidney und M. Ekerå, „How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits," *Quantum*, Jg. 5, S. 433, Apr. 2021, ISSN: 2521-327X. DOI: 10.22331/q-2021-04-15-433 Adresse: http://dx.doi.org/10.22331/q-2021-04-15-433

[14] J.-Y. Cai, „Shor's algorithm does not factor large integers in the presence of noise," *Science China Information Sciences*, Jg. 67, Nr. 7, Juni 2024, ISSN: 1869-1919. DOI: 10.1007/s11432-023-3961-3 Adresse: http://dx.doi.org/10.1007/s11432-023-3961-3

[15] L. K. Grover, „A fast quantum mechanical algorithm for database search," in *Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing*, 1996, S. 212–219.

[16] „Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard, FIPS 203," 2024. besucht am 17. Aug. 2025. Adresse: https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.203

[17] „Module-Lattice-Based Digital Signature Standard, FIPS 204," 2024. besucht am 17. Aug. 2025. Adresse: https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.204

[18] „Stateless Hash-Based Digital Signature Standard, FIPS 205," 2024. besucht am 17. Aug. 2025. Adresse: https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.205

[19] „Recommendation for Stateful Hash-Based Signature Schemes, NIST Special Publication 800-208,“ 2020. besucht am 19. Aug. 2025. Adresse: https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-208

[20] I. Duits, „The post-quantum Signal protocol: Secure chat in a quantum world,“ Magisterarb., University of Twente, 2019.

[21] A. Alkhulaifi und E.-S. M. El-Alfy, „Exploring Lattice-based Post-Quantum Signature for JWT Authentication: Review and Case Study,“ in *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, 2020, S. 1–5. DOI: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129505

[22] A. C. Chen, „A Comparative Study of Hybrid Post-Quantum Cryptographic X. 509 Certificate Schemes,“ *arXiv preprint arXiv:2511.00111*, 2025.

[23] W. Li, Y. Li und T. Chung, *pqRPKI: A Practical RPKI Architecture for the Post-Quantum Era*, 2026. arXiv: 2603.06968 [cs.NI]. Adresse: https://arxiv.org/abs/2603.06968

[24] C. Turino, W. J. Buchanan, O. Lo und C. Thümmler, „PQC-LEO: An Evaluation Framework for Post-Quantum Cryptographic Algorithms,“ in *2025 IEEE 7th International Conference on Trust, Privacy and Security in Intelligent Systems, and Applications (TPS-ISA)*, IEEE, Nov. 2025, S. 237–247. DOI: 10.1109/tps-isa67132.2025.00033 Adresse: http://dx.doi.org/10.1109/TPS-ISA67132.2025.00033

[25] D. Gómez-Cambronero, D. Munteanu und A. I. González-Tablas, *Layered Performance Analysis of TLS 1.3 Handshakes: Classical, Hybrid, and Pure Post-Quantum Key Exchange*, 2026. arXiv: 2603.11006 [cs.CR]. Adresse: https://arxiv.org/abs/2603.11006

[26] R. Chhetri, *Benchmarking Post-Quantum Cryptography on Resource-Constrained IoT Devices: ML-KEM and ML-DSA on ARM Cortex-M0+*, 2026. arXiv: 2603.19340 [cs.CR]. Adresse: https://arxiv.org/abs/2603.19340

[27] E. Hirsch, K. Raab, T. Bauer und D. Loebenberger, „Detecting Cryptographically Relevant Software Packages with Collaborative LLMs,“ in *Proceedings of the 12th International Conference on Information Systems Security and Privacy*, SCITEPRESS - Science und Technology Publications, 2026, S. 354–365. DOI: 10.5220/0014441400004061 Adresse: http://dx.doi.org/10.5220/0014441400004061

[28] „Migration zu Post-Quanten-Kryptografie. Handlungsempfehlungen des BSI,“ 2020-08-01. Adresse: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Krypto/Post-Quanten-Kryptografie.pdf?__blob=publicationFile&v=1

[29] „Kryptographische Verfahren: Empfehlungen und Schlüssellängen,“ 2024-02-02. Adresse: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/TechnischeRichtlinien/TR02102/BSI-TR-02102.pdf?__blob=publicationFile&v=5

[30] „Kryptographische Verfahren: Verwendung von Transport Layer Security (TLS),“ Technische Richtlinie des BSI, 2024-01. Adresse: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/TechnischeRichtlinien/TR02102/BSI-TR-02102-2.pdf?__blob=publicationFile&v=4

[31] „Kryptographische Verfahren: Verwendung von Secure Shell (SSH),“ Technische Richtlinie des BSI, 2024-02-29. Adresse: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/TechnischeRichtlinien/TR02102/BSI-TR-02102-4.pdf?__blob=publicationFile&v=3

[32] „Kryptographische Verfahren: X.509 Zertifikate und Zertifizierungspfadvalidierung,“ Technische Richtlinie des BSI, 2020. Adresse: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/TechnischeRichtlinien/TR02103/BSI-TR-02103.pdf?__blob=publicationFile&v=2

[33] „TR-03107-1 Elektronische Identitäten und Vertrauensdienste im E-Government: Vertrauensniveaus und Mechanismen,“ Technische Richtlinie des BSI, 2019-05-07. Adresse: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/TechnischeRichtlinien/TR03107/TR-03107-1.pdf?__blob=publicationFile&v=1

[34] „Elliptic Curve Cryptography," 2018-06-01. Adresse: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Publications/TechGuidelines/TR03111/BSI-TR-03111_V-2-1_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=1

[35] „TR-03116-4 Kryptographische Vorgaben für Projekte der Bundesregierung: Kommunikationsverfahren in Anwendungen," Technische Richtlinie des BSI, 2023-03-07. Adresse: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/TechnischeRichtlinien/TR03116/BSI-TR-03116-4.pdf?__blob=publicationFile&v=5

[36] „TR-03124-1eID-Client – Part 1: Specifications," Technische Richtlinie des BSI, 2021-10-08. Adresse: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/TechnischeRichtlinien/TR03124/TR-03124-1.pdf?__blob=publicationFile&v=2

[37] „TR-03175 Infrastruktur zur Absicherung von Dokumenten mit digitalen Siegeln," Technische Richtlinie des BSI, 2022-05-13. Adresse: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/TechnischeRichtlinien/TR03175/BSI-TR-03175.pdf?__blob=publicationFile&v=4

[38] „Certificate Policy 2024: Root-CA der PKI-1-Verwaltung," 2024-12-31. Adresse: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/VerwaltungsPKI/Certificate_Policy_2024.pdf?__blob=publicationFile&v=3