

Hochschule Darmstadt

– Fachbereich Informatik –

Performanz Evaluation von PQC in der Authentifizierungsphase von TLS 1.3 unter variierenden Netzwerkcharakteristiken

Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science (B.Sc.)

vorgelegt von

Ronja Wolf

Matrikelnummer: 761118

Referent : Prof. Dr. Andreas Heinemann

Korreferent : Johanna Henrich

ERKLÄRUNG

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen benutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder noch nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen.

Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfungsbehörde eingereicht worden.

Darmstadt, 05. Dezember 2022

Ronja Wolf

INHALTSVERZEICHNIS

I Thesis

1	Einleitung	2
1.1	Motivation	2
1.2	Problemstellung und Ziel	2
1.3	Related Work	3
1.4	Vorgehensweise	4
2	Grundlagen	6
2.1	Netzwerke	6
2.2	Kryptographie	6
2.2.1	Symmetrische Kryptographie	7
2.2.2	Asymmetrische Verschlüsselung	8
2.2.3	Kryptographische Hashfunktionen	9
2.2.4	Authentifizierungsverfahren	9
2.3	Transport Layer Security	10
2.4	Post-Quantum-Kryptographie und NIST	11
2.4.1	Quanteninformatik	11
2.4.2	National Institute of Standards and Technology	11

	Literatur	12
--	-----------	----

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1	OSI-Referenzmodell mit hervorgehobener Transportschicht	6
Abbildung 2.2	Ein einfaches asymmetrisches kryptographisches Verfahren	8

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AES	Advanced Encryption Standard
CRYSTALS	Cryptographic Suite for Algebraic Lattices
CBC	Cipher Block Chaining
DES	Data Encryption Standard
ECDH	Elliptic-curve Diffie-Hellman
ECDSA	Elliptic Curve Digital Signature Algorithm
EdDSA	Edwards-curve Digital Signature Algorithm
FALCON	Fast Fourier lattice-based compact signatures over NTRU
GAN	Global Area Network
IETF	Internet Engineering Task Force
MAC	Message Authentication Code
NIST	National Institute of Standards and Technology
OQS	Open Quantum Safe
OSI	Open Systems Interconnection
PAN	Personal Area Network
PQC	Post-Quanten-Kryptographie
RSA	Rivet-Shamir-Adleman
SHA	Secure Hash Algorithm
TLS	Transport Layer Security

Teil I

THESIS

EINLEITUNG

In Transport Layer Security (TLS) 1.3 wird ein Handshake durchgeführt, bei dem ein Schlüsselaustausch sowie die Authentifizierung des Servers gegenüber dem Client durchgeführt wird. Bei Bedarf kann auch eine beidseitige Authentifizierung durchgeführt werden. Erst im Anschluss findet die eigentliche Kommunikation statt. Aktuell werden dabei für die Authentifizierung die klassischen asymmetrischen Verfahren Edwards-curve Digital Signature Algorithm (EdDSA), Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA) und Rivest-Shamir-Adleman (RSA) verwendet. In dieser Arbeit soll betrachtet werden, inwiefern sich die Performanz von TLS 1.3 verändert, wenn stattdessen Post-Quanten-Kryptographie (PQC) Verfahren, d. h. kryptographische Verfahren, die gegen Quantencomputer resistent sind, eingesetzt werden.

1.1 MOTIVATION

Die Entwicklung von Quantencomputern schreitet voran. Wenn Quantencomputer jedoch einsatzfähig sind, wird es mit ihnen möglich sein, viele der aktuell verwendeten kryptographischen Algorithmen zu brechen. Dies liegt daran, dass diese auf Berechnungen basieren, die auf klassischen Computern nicht in einer vertretbaren Zeit durchführbar sind. Dies sind vor allem die Primfaktorzerlegung und der diskrete Logarithmus. Quantencomputer können diese Berechnungen aufgrund ihrer Eigenschaften jedoch schneller durchführen. Davon sind auch die im TLS 1.3 Handshake verwendeten Algorithmen betroffen.

Um zu verhindern, dass hierdurch Probleme entstehen, müssen rechtzeitig PQC-Algorithmen identifiziert werden, mit denen die dann unsicherern Algorithmen ersetzt werden können. Dabei ist zu beachten, dass diese andere Charakteristika haben. Damit der Einsatz von PQC-Algorithmen gelingen kann, muss bekannt sein, wie sich diese unter verschiedenen Netzwerkbedingungen verhalten.

1.2 PROBLEMSTELLUNG UND ZIEL

In dieser Arbeit sollen die klassischen kryptographischen Algorithmen, die bei TLS 1.3 zur Authentifizierung verwendet werden, durch PQC-Algorithmen, wie z. B. Fast Fourier lattice-based compact signatures over NTRU (FALCON), ersetzt werden. In dem Auswahlprozess der National Institute of Standards and Technology (NIST) haben sich dabei besonders Cryptographic Suite for Algebraic Lattices (CRYSTALS) Dilithium, FALCON und SPHINCS+ als vielversprechende Kandidaten für Algorithmen zur digitalen Signatur hervorge-

tan.

Allerdings ist in der realen Welt kein ideales Netzwerk vorhanden und es treten Störfaktoren, wie etwa der Verlust von Paketen oder Latenz auf. Diese Störfaktoren haben einen Einfluss auf die Performanz des Algorithmus. Da TLS 1.3 jedoch ein Protokoll ist, das an verschiedenen Stellen in der Praxis zum Einsatz kommt und hier die Performanz durchaus eine wichtige Rolle spielt, ist die Performanz für den Benutzer von großer Bedeutung.

In dieser Arbeit soll zunächst nur die Authentifizierung mittels PQC-Verfahren durchgeführt werden. Es wird angenommen, dass für den Schlüsselaustausch ein klassisches Verfahren verwendet wird. Dieses bleibt bei allen Versuchen unverändert, sodass nur Auswirkungen durch die Verwendung von PQC-Algorithmen in der Authentifizierungsphase auf die Performanz des TLS-Handshake bewertet werden.

Die konkrete Fragestellung der Arbeit ist, inwiefern sich die Performanz des Handshakes von TLS 1.3 unter der Verwendung verschiedener PQC-Algorithmen in der Authentifizierungsphase verändert, wenn verschiedene Netzwerkparameter manipuliert werden.

Ziel der Arbeit ist es, daraus ableiten zu können, welche Algorithmen für die Verwendung in der Authentifizierungsphase von TLS 1.3 unter realen Netzwerkbedingungen geeignet sind. Dies ist relevant für die Verwendung des Algorithmus in einer Netzwerkumgebung.

1.3 RELATED WORK

Crockett et al. entwarfen 2019 eine Implementierung von PQC im TLS 1.3 Handshake. Dabei wurden verschiedene, in der Literatur vorhandene Grundkonzepte diskutiert [CPS19]. Dabei geben sie eine Empfehlung, wie eine Implementierung aussehen kann. In der Arbeit selbst wird darauf hingewiesen, dass eine Prüfung der Algorithmen sowohl unter Veränderung einzelner Netzwerkparameter als auch unter realistischen Netzwerkbedingungen notwendig ist.

Paul et al. untersuchten 2022, wie Zertifikatsketten für die Authentifizierung mit PQC-Verfahren aussehen könnten [Pau+22]. Dabei verwenden sie "Mixed Certificate Chains", bei denen innerhalb derselben Zertifikatskette verschiedene Algorithmen angewandt werden. Diese Arbeit soll diese Konzepte aufgreifen, sie betrachtet jedoch, wie sich die Performanz des Handshakes bei der Veränderung einzelner Netzwerkparameter verhält.

Henrich hat in ihrer Masterarbeit untersucht, wie sich die Verwendung von PQC-Algorithmen im Schlüsselaustausch von TLS1.3 unter verschiedenen Netzwerkbedingungen verhält [Hen22]. Sie kommt dabei zu dem Ergeb-

nis, dass insbesondere Kyber, Saber, NTRU und NTRU Prime auch bei variierenden Netzwerkparametern eine sehr gute Performanz haben und teils noch schneller als Elliptic-curve Diffie-Hellman (ECDH) sind. In Analogie dazu soll in dieser Arbeit die Authentifizierung betrachtet werden.

Das dabei verwendete Framework zur Emulation verschiedener Netzwerkszenarien wurde in einer Arbeit von Paquin et al. aus dem Jahr 2020 [PST20] vorgestellt.

Eine weitere Arbeit in diesem Bereich stammt von Sikeridis et al. aus dem Jahr 2020 und beschäftigt sich bereits mit der Performanz von PQC-Verfahren zur Authentikation in TLS 1.3 [SKD20]. In dieser Arbeit wurde der TLS 1.3 Handshake zwischen einem Client und realen Servern in verschiedenen Staaten durchgeführt, um zu überprüfen, inwiefern dies Auswirkungen auf die Performanz der Algorithmen hat. Diese Arbeit soll sich davon abgrenzen, indem sie gezielt einzelne Netzwerkparameter in einer Emulation manipuliert. Damit soll herausgefunden werden, welche Parameter einen entscheidenden Einfluss auf die Performanz haben.

1.4 VORGEHENSWEISE

Für diese Arbeit soll in einem Linux-Kernel der Aufbau einer TLS 1.3 Verbindung zwischen einem Server und einem Client durchgeführt werden. Dies geschieht unter verschiedenen Netzwerkparametern sowie mit verschiedenen PQC-Algorithmen in der Authentifizierungsphase von TLS 1.3.

Dafür wird für verschiedene PQC-Algorithmen eine Reihe an Versuchen durchgeführt, in denen verschiedene Netzwerkcharakteristiken verändert werden. Nach der erfolgreichen Authentifizierung des Servers gegenüber dem Client wird die Verbindung abgebrochen. Die Zeit zwischen dem Aufbau und dem Abbau der Verbindung wird gemessen und dient als Vergleichsgröße. Diese Versuche sollen ebenfalls unter verschiedenen Sicherheitsleveln durchgeführt werden.

Für den Verbindungsaufbau zwischen Client und Server werden Linux-Kernel-Tools verwendet. Die verschiedenen Netzwerkparameter werden mithilfe des Tools NetEm emuliert. Dabei sollen Veränderungen an folgenden Parametern betrachtet werden:

- Duplikate
- Jitter
- Korrupte Pakete
- Latenz

- Paketverlust
- Reordering
- Übertragungsrate

Diese werden zunächst einzeln betrachtet. Da sie in der Realität jedoch gemeinsam auftreten, können in einem späteren Versuch auch verschiedene Netzwerkparameter miteinander kombiniert werden.

Die eigentliche Authentifizierung wird mithilfe der Open Quantum Safe (OQS) Library [SM17] durchgeführt. Aufgrund des aktuellen Stands der NIST-Empfehlungen werden die folgenden Algorithmen betrachtet:

- SPHINCS⁺
- Dilithium
- Falcon

Gegebenenfalls sollen die Ergebnisse in einer realen Netzwerkumgebung mit einem Server aus einer Cloudinstanz bestätigt werden. Dies soll jedoch nicht Kern der Arbeit sein.

Nach der Durchführung der Versuche sollten ausführliche Daten dazu vorliegen, wie sich die Laufzeit von TLS 1.3 unter verschiedenen Algorithmen, Algorithmenparametern und Netzwerkcharakteristiken verhält. Diese sollen im Anschluss miteinander verglichen werden.

Dabei werden sich voraussichtlich große Unterschiede zwischen den betrachteten Algorithmen zeigen. Aus dem Vergleich der Performanz von TLS 1.3 soll eine Empfehlung gegeben werden, welche Algorithmen für welche Art von Netzwerk am besten geeignet sind.

GRUNDLAGEN

2.1 NETZWERKE

Ein Computernetzwerk besteht mindestens aus zwei Computern, einem Übertragungsmedium und Protokollen, die festlegen, in welcher Form die Computer Daten austauschen. Ein Computernetzwerk kann sich physisch über einige Meter (dann spricht man von einem Personal Area Network (PAN)) bis über die gesamte Erde (dann spricht man von einem Global Area Network (GAN)) ausdehnen. Das Internet ist ein GAN. [Bau18a].

Beim Open Systems Interconnection (OSI) Referenzmodell (vgl. Abbildung 2.1) wird eine Netzwerkverbindung in sieben logische Schichten unterteilt. Es wird verwendet, um eine Kommunikation über ein Netzwerk darzustellen. Die einzelnen Schichten sind dabei durch Schnittstellen miteinander verbunden, sodass einzelne Protokolle leicht ausgetauscht werden können [Bau18b].

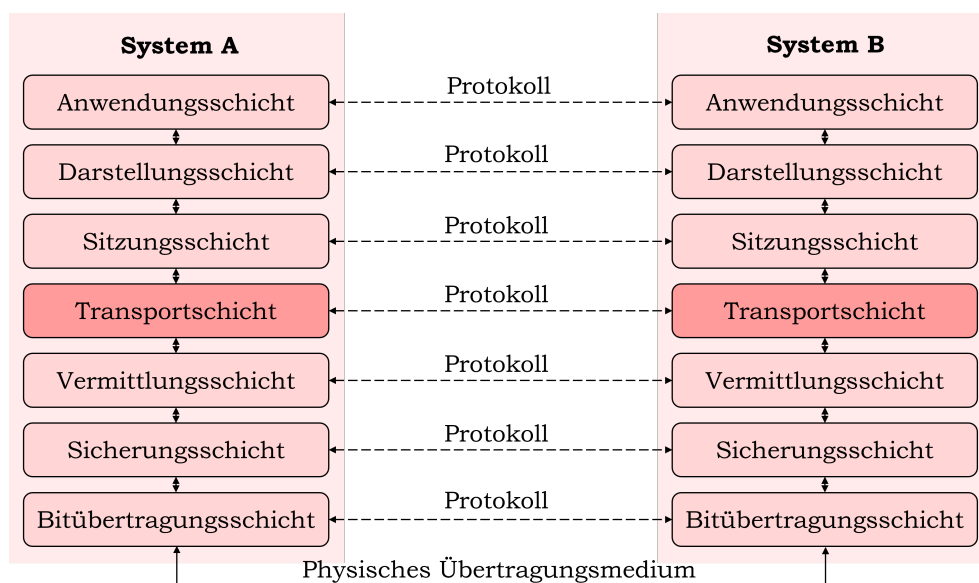


Abbildung 2.1: OSI-Referenzmodell mit hervorgehobener Transportschicht

2.2 KRYPTOGRAPHIE

Der Begriff Kryptographie bezeichnet die "Wissenschaft vom geheimen Schreiben" [Wät18]. Dabei wird der verschlüsselte Text als "Chiffretext" und der entschlüsselte Text als "Klartext" bezeichnet. Das Gegenstück der Kryptogra-

phie ist die Kryptanalyse, deren Ziel es ist, Kryptographie zu brechen. Kryptographie und Kryptanalyse bilden das Fachgebiet der Kryptologie [PP10a].

Ein wichtiges Prinzip der Kryptographie ist das Kerckhoffsche Prinzip. Dieses besagt, dass die verwendeten Methoden zur Ver- und Entschlüsselung auch dann noch sicher sein müssen, wenn sie öffentlich bekannt sind. Dies bedeutet, dass die Sicherheit des Verfahrens auf dem Schlüssel basieren muss.

Dies ist aus mehreren Gründen entscheidend. Zum einen ist es i. d. R. nicht oder nur mit großen Schwierigkeiten möglich, ein gesamtes Verfahren unter Verschluss zu halten. Die Geheimhaltung eines Schlüssels ist deutlich einfacher. Zum anderen ist es so möglich, das Verfahren durch Dritte evaluieren zu lassen und auf Fehler hingewiesen werden zu können [KW11a].

Innerhalb der Kryptographie unterscheidet man dann zwischen symmetrischer und asymmetrischer Kryptographie [PP10a]. Diese werden im Folgenden näher betrachtet.

2.2.1 Symmetrische Kryptographie

Bis 1976 wurde ausschließlich mit symmetrischer Kryptographie gearbeitet. Klassische Einsatzgebiete dieser Art der Verschlüsselung sind auch heute noch die Datenverschlüsselung sowie Integritätsprüfungen.

Bei der symmetrischen Kryptographie werden für die Ver- und Entschlüsselung der gleiche Schlüssel verwendet. Der zu verschlüsselnde Klartext wird mit dem Schlüssel verschlüsselt und kann dann über einen unsicheren Kanal transportiert werden. Der Empfänger erhält den Chiffretext und kann diesen mithilfe des gleichen Schlüssels wieder in den Klartext umwandeln.

Ein großes Problem dieser Art der Verschlüsselung ist das Problem des sicheren Schlüsselaustauschs. Die beiden Kommunikationspartner müssen sich auf einen Schlüssel einigen. Dies muss jedoch über einen sicheren Kanal geschehen, damit sichergestellt werden kann, dass der Schlüssel nicht an unberechtigte Dritte gerät [PP10a].

Innerhalb der symmetrischen Kryptographie kommen Strom- und Blockchiffren zum Einsatz. Während Stromchiffren jedes Bit des Klartexts einzeln verschlüsseln, verschlüsseln Blockchiffren den Klartext in Blöcken fester Größe [PP10c].

Stromchiffren sind besonders für Echtzeitanwendungen und für den Einsatz auf Systemen mit begrenzten Ressourcen geeignet. Dies liegt daran, dass sie hereinkommende Bits sofort verschlüsseln und über einen unsicheren Kanal übertragen können. Sie sind nicht darauf angewiesen, eine be-

stimmte Menge an Daten abzuwarten. Eine bekannte Stromchiffre ist beispielsweise RC4, die bei HTTPS zum Einsatz kommt.

In den meisten Anwendungen, in denen symmetrische Kryptographie zum Einsatz kommt, werden jedoch Blockchiffren verwendet [PP10c]. Auf Blockchiffren bauen viele weitere Bausteine der Kryptographie auf. So können beispielsweise Stromchiffren oder Hashfunktionen durch Blockchiffren erzeugt werden.

2.2.2 Asymmetrische Verschlüsselung

Im Gegensatz zur symmetrischen Kryptographie wird bei der asymmetrischen Kryptographie nicht derselbe Schlüssel für Ver- und Entschlüsselung verwendet. Der Grundgedanke ist, dass der Schlüssel für die Entschlüsselung geheim gehalten werden muss, der Schlüssel für die Verschlüsselung jedoch nicht.

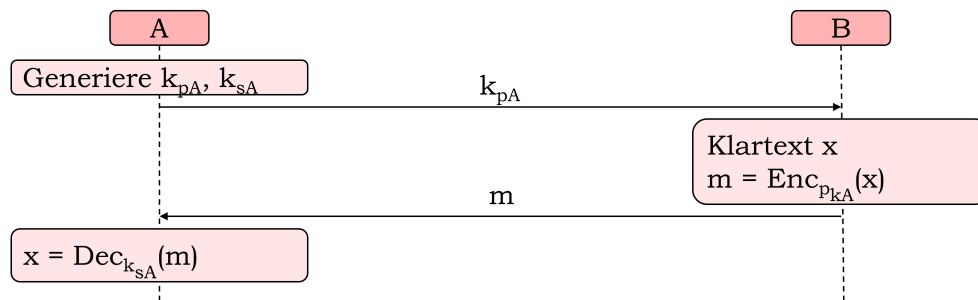


Abbildung 2.2: Ein einfaches asymmetrisches kryptographisches Verfahren

Asymmetrische kryptographische Verfahren basieren jeweils auf einem von drei mathematischen Problemen:

1. Primfaktorzerlegung
2. Diskreter Logarithmus
3. Elliptische Kurven

Alle diese Probleme haben gemein, dass sie ohne Zusatzinformationen nur mit einem sehr großen Zeitaufwand durch einen Computer gelöst werden können. Die Zusatzinformation, die das Lösen des Problems und somit das Entschlüsseln der Nachricht ermöglicht, ist der private Schlüssel des Empfängers der Nachricht [PP10b].

Ein bekanntes Beispiel für eine asymmetrische Chiffre, die auf dem mathematischen Problem der Primfaktorzerlegung basiert, ist RSA.

TODO: Abbildung einfügen

Der diskrete Logarithmus ist beispielsweise Grundlage des Diffie-Hellman-Schlüsselaustauschs. Für diesen gibt es auch eine Variante, die elliptische Kurven verwendet.

TODO: Abbildung einfügen

2.2.3 Kryptographische Hashfunktionen

Hashfunktionen sind kryptographische Funktionen, die eine Eingabe beliebiger Länge auf eine Ausgabe fester Länge abbildet. Diese Berechnung muss sehr einfach erfolgen können. Auf der Ausgabe können jedoch keine Schlüssel auf die Eingabe geschlossen werden.

Weiterhin darf zu einem bekannten Eingabewert keine zweite Eingabe gefunden werden können, die den gleichen Hashwert ergibt. Diese Eigenschaft bezeichnet man als schwache Kollisionsresistenz.

Außerdem gibt es die starke Kollisionsresistenz. Diese besagt, dass keine frei wählbare unterschiedlichen Eingaben gefunden werden dürfen, die den gleichen Hashwert ergeben.

Hashfunktionen können entweder eine eigene designierte Hashfunktion sein oder auf einer symmetrischen Blockchiffre basieren. Designierte Hashfunktionen sind beispielsweise Secure Hash Algorithm ([SHA](#))-2 und SHA-3.

2.2.4 Authentifizierungsverfahren

Auch bei den Authentifizierungsverfahren unterscheidet man zwischen symmetrischen Verfahren und asymmetrischen Verfahren. Auch diese sollen im folgenden genauer betrachtet werden.

2.2.4.1 Symmetrische Authentifizierungsverfahren

Symmetrische Authentifizierungsverfahren werden auch als Message Authentication Code ([MAC](#)) bezeichnet. Sie basieren in der Regel auf Blockchiffren (vgl. Abschnitt [2.2.1](#)) oder kryptographischen Hashfunktionen (vgl. Abschnitt ??) [[KW11b](#)].

MACs generieren aus einer Nachricht beliebiger Länge eine kryptographische Prüfsumme, die unabhängig von der Länge der Nachricht immer die gleiche Länge hat. Da es sich hier um ein symmetrisches Verfahren handelt, benötigen die Kommunikationspartner einen gemeinsamen kryptographischen Schlüssel.

Die Prüfsumme erlaubt es, Manipulationen an der Nachricht zu erkennen sowie den Ursprung der Nachricht nachzuvollziehen. Mit MACs ist es jedoch nicht möglich, die Urheberschaft einer Nachricht eindeutig einer Person zuzuordnen. Es kann lediglich festgestellt werden, dass die Person den Schlüssel kennt. Diesen kennen jedoch immer mindestens zwei Parteien.

MACs können auf Blockchiffren basieren. Häufig wird beispielsweise AES im Cipher Block Chaining (CBC) Modus dafür verwendet. Dafür werden für die einzelnen Blöcke der zu authentifizierenden Nachricht die folgenden Berechnungen durchgeführt:

$$y1 = ek(x1 \text{ XOR } IV) \text{ usw.}$$

Ein einfaches Verfahren für einen MAC, der auf einer Hashfunktion basiert, ist der HMAC. In der Abbildung wird der Schlüssel als geheimer Präfix verwendet. Dieser könnte jedoch auch als Suffix verwendet werden. [Paar2010-D]

TODO: Abbildung einfügen

2.2.4.2 Asymmetrische Authentifizierungsverfahren

Asymmetrische Authentifizierungsverfahren werden auch als Digitale Signaturen bezeichnet. Dabei verschlüsselt die zu authentifizierende Partei einen Klartext mit ihrem privaten Schlüssel und schickt den Klartext und den Chiffretext an den Kommunikationspartner. Wenn dieser den Chiffretext mit dem öffentlichen Schlüssel der zu authentifizierenden Person entschlüsselt und den korrekten Klartext erhält, ist die Authentifizierung erfolgreich verlaufen.

TODO: Abbildung einfügen

In vielen Fällen wird auch für digitale Signaturen RSA verwendet.

Ein großes Problem von digitalen Signaturen ist, dass sichergestellt werden muss, dass der öffentliche Schlüssel auch wirklich zum Kommunikationspartner gehört. Dafür werden Zertifikate verwendet [Paar2010-E].

TODO: Abbildung einfügen

2.3 TRANSPORT LAYER SECURITY

TLS ist ein 1996 durch die Internet Engineering Task Force (IETF) festgelegtes Protokoll mit dem Ziel, einen Standard für die sichere Kommunikation im über das Internet zu finden. Das Protokoll agiert auf der Transportschicht. Während die ursprünglichen Ziele des Protokolls Datensicherheit und -integrität waren, wurde in späteren Versionen zunehmend auch die

Kommunikation mit anderen TLS-Versionen sowie die Möglichkeit des Ausbaus des Protokolls, z. B. durch neue Algorithmen, betrachtet [Kiz20].

2.4 POST-QUANTUM-KRYPTOGRAPHIE UND NIST

2.4.1 Quanteninformatik

Während die klassische Einheit in der Informatik aus einem Bit entstehen kann, das entweder den Wert 0 oder den Wert 1 annehmen kann, wird die Grundlage der Quanteninformatik durch sogenannte Qubits gebildet. Diese unterscheiden sich in einigen wesentlichen Punkten von den klassischen Bits [Jus20]:

1. Während der Wert eines klassischen Bits zu jedem Zeitpunkt eindeutig als 0 oder 1 identifiziert werden kann, können Qubits auch einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen.
2. Wird der Wert eines Qubits gemessen, ist dieser immer 0 oder 1. Der Wert eines Qubits kann sich demnach durch die Messung verändern.
3. Eine Veränderung in einem Qubit kann eine instantane Veränderung in einem anderen Qubit hervorrufen.

2.4.2 *National Institute of Standards and Technology*

Das National Institute of Standards and Technology (übersetzt Nationales Institut für Standards und Technologie) ist eine Bundesbehörde der Vereinigten Staaten, deren Hauptaufgabe Standardisierungsprozesse sind. In der Kryptographie war das NIST u. a. dafür verantwortlich, die Verschlüsselungsstandards Advanced Encryption Standard (AES) und Data Encryption Standard (DES) zu standardisieren.

LITERATUR

- [Bau18a] Christian Baun. “Grundlagen der Computervernetzung”. In: *Computernetze kompakt*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, S. 15–33. ISBN: 978-3-662-57469-0. DOI: [10.1007/978-3-662-57469-0_3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-57469-0_3). URL: https://doi.org/10.1007/978-3-662-57469-0_3.
- [Bau18b] Christian Baun. “Protokolle und Protokollschichten”. In: *Computernetze kompakt*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, S. 35–44. ISBN: 978-3-662-57469-0. DOI: [10.1007/978-3-662-57469-0_4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-57469-0_4). URL: https://doi.org/10.1007/978-3-662-57469-0_4.
- [CPS19] Eric Crockett, Christian Paquim und Douglas Stebila. *Prototyping post-quantum and hybrid key exchange and authentication in TLS and SSH*. 2019.
- [Hen22] Johanna Henrich. “Performanz Evaluation von PQC in TLS 1.3 unter variierenden Netzwercharakteristiken”. Magisterarb. Hochschule Darmstadt, 2022.
- [Jus20] Bettina Just. “Einführung”. In: *Quantencomputing kompakt: Spukhafte Fernwirkung und Teleportation endlich verständlich*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, S. 1–4. ISBN: 978-3-662-61889-9. DOI: [10.1007/978-3-662-61889-9_1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-61889-9_1). URL: https://doi.org/10.1007/978-3-662-61889-9_1.
- [Kiz20] Joseph Migga Kizza. “Computer Network Security Protocols”. In: *Guide to Computer Network Security*. Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 367–398. ISBN: 978-3-030-38141-7. DOI: [10.1007/978-3-030-38141-7_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38141-7_17). URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-38141-7_17.
- [KW11a] Ralf Küsters und Thomas Wilke. “Grundlegendes”. In: *Moderne Kryptographie: Eine Einführung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011, S. 7–12. ISBN: 978-3-8348-8288-2. DOI: [10.1007/978-3-8348-8288-2_2](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8288-2_2). URL: https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8288-2_2.
- [KW11b] Ralf Küsters und Thomas Wilke. “Symmetrische Authentifizierungsverfahren”. In: *Moderne Kryptographie: Eine Einführung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011, S. 211–237. ISBN: 978-3-8348-8288-2. DOI: [10.1007/978-3-8348-8288-2_9](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8288-2_9). URL: https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8288-2_9.

- [PP10a] Christof Paar und Jan Pelzl. "Introduction to Cryptography and Data Security". In: *Understanding Cryptography: A Textbook for Students and Practitioners*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, S. 1–27. ISBN: 978-3-642-04101-3. DOI: [10.1007/978-3-642-04101-3_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04101-3_1). URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-04101-3_1.
- [PP10b] Christof Paar und Jan Pelzl. "Introduction to Public-Key Cryptography". In: *Understanding Cryptography: A Textbook for Students and Practitioners*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, S. 149–171. ISBN: 978-3-642-04101-3. DOI: [10.1007/978-3-642-04101-3_6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04101-3_6). URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-04101-3_6.
- [PP10c] Christof Paar und Jan Pelzl. "Stream Ciphers". In: *Understanding Cryptography: A Textbook for Students and Practitioners*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, S. 29–54. ISBN: 978-3-642-04101-3. DOI: [10.1007/978-3-642-04101-3_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04101-3_2). URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-04101-3_2.
- [PST20] Christian Paquin, Douglas Stebila und Goutam Tamvada. "Benchmarking Post-quantum Cryptography in TLS". In: *International Conference on Post-Quantum Cryptography*. 2020.
- [Pau+22] Sebastian Paul, Norman Lahr, Yulia Kuzovkova und Ruben Niederhagen. "Mixed Certificate Chains for the Transition to Post-Quantum Authentication in TLS 1.3". In: *Proceedings of the 2022 ACM Asia Conference on Computer and Communications Security*. 2022.
- [SKD20] Dimitrios Sikeridis, Panos Kampanakis und Michael Devetsikiotis. "Post-Quantum Authentication in TLS 1.3: A Performance Study". In: *Network and Distributed Systems Security (NDSS) Symposium 2020*. 2020.
- [SM17] Douglas Stebila und Michele Mosca. "Post-quantum key exchange for the Internet and the Open Quantum Safe project". In: *Selected Areas in Cryptography (SAC)*. 2017. URL: <https://openquantumsafe.org/>.
- [Wät18] Dietmar Wätjen. "Grundlagen". In: *Kryptographie: Grundlagen, Algorithmen, Protokolle*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S. 1–13. ISBN: 978-3-658-22474-5. DOI: [10.1007/978-3-658-22474-5_1](https://doi.org/10.1007/978-3-658-22474-5_1). URL: https://doi.org/10.1007/978-3-658-22474-5_1.