

Universität Hamburg
Fachbereich Informatik

**Entwurf vom
16. Juli 2015**

Bachelorarbeit

Funktionsweise, Angriffe und Abwehrmechanismen von SSL/TLS

vorgelegt von

Tom Petersen

geb. am 13. Dezember 1990 in Hannover

Matrikelnummer 6359640

Studiengang Informatik

eingereicht am 16. Juli 2015

Betreuer: Dipl.-Inf. Ephraim Zimmer

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Hannes Federrath

Zweitgutachter: Dr. Dominik Herrmann

Aufgabenstellung

Die Protokollfamilie SSL/TLS umfasst Techniken zum Schutz von Kommunikationsdaten in IP-basierten Netzen. Ihre weite Verbreitung und Wichtigkeit für die IT-Sicherheit ist historisch gewachsen, und ihr Einsatz erstreckt sich über mittlerweile weit mehr Protokolle der Anwendungsschicht, als nur das ursprünglich anvisierte HTTP. Diese weite Verbreitung hat zwei wesentliche Konsequenzen. Zum einen wurden sowohl die Spezifikation der Protokollfamilie als auch praktische Implementierungen von SSL/TLS Gegenstand zahlreicher Angriffe. Zum zweiten sind ein grundlegendes Verständnis der Funktionsweise von SSL/TLS und der erwähnten Angriffe obligatorisch bei der Entwicklung und Implementierung von verteilter Software, Internetdiensten und Protokollimplementierungen auf der Anwendungsschicht, die mittels SSL/TLS abgesichert werden sollen.

In dieser Bachelorarbeit soll unter Einbeziehung aktueller Entwicklungen und Forschungsergebnisse die Funktionsweise von SSL/TLS, bedeutende Angriffe auf diese Protokollfamilie sowie daraus erarbeitete Anpassungen der Protokollspezifikation und Abwehrmechanismen erläutert und speziell für den Einsatz in der Hochschullehre aufbereitet werden. Darüber hinaus soll ein modular aufgebautes Tool zur Veranschaulichung der SSL/TLS-Funktionsweise sowie deren Angriffe und Abwehrmechanismen entwickelt und prototypisch umgesetzt werden. Der Fokus des Tools liegt in der Demonstration von SSL/TLS und dessen Schwächen mit beliebiger Verständnisvertiefung, sollte allerdings auch um weitere IT-Sicherheitsprotokolle erweiterbar sein.

Zusammenfassung

Abstract schreiben

Für den eiligen Leser sollen auf etwa einer halben, maximal einer Seite die wichtigsten Inhalte, Erkenntnisse, Neuerungen bzw. Ergebnisse der Arbeit beschrieben werden.

Durch eine solche Zusammenfassung (im engl. auch Abstract genannt) am Anfang der Arbeit wird die Arbeit deutlich aufgewertet. Hier sollte vermittelt werden, warum der Leser die Arbeit lesen sollte.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	5
1.1	Motivation	5
1.2	Richtung der Bachelorarbeit	5
2	SSL und TLS - ein Überblick	6
2.1	Implementierungen	7
3	Funktionsweise und Teilprotokolle	8
3.1	Record Protocol	8
3.2	Berechnung des Schlüsselmaterials	10
3.3	TLS-Handshake	10
3.4	Alert Protocol	15
3.5	Application Data Protocol	15
3.6	Sitzungen, Verbindungen und der verkürzte Handshake	16
3.7	Cipher-Suites	16
3.8	Frühere SSL-/TLS-Versionen und TLS 1.3	17
4	Angriffe gegen SSL und TLS	19
4.1	Version Rollback	19
4.2	Ciphersuite Rollback	19
4.3	Verhindern der ChangeCipherSpec-Nachricht	19
4.4	Schwache Cipher Suites	20
4.5	Bleichenbacher-Angriff	20
4.6	Padding Oracle Angriff	20
4.7	Lucky Thirteen	20
4.8	Chosen Plaintext Angriff gegen bekannte IVs	21
4.9	BEAST	21
4.10	CRIME	21
4.11	Poodle	21
4.12	FREAK	22
4.13	logjam	22
4.14	Zertifikate und Verwandtes	22
A	Fehlermeldungen des Alert Protocols	23
	Literaturverzeichnis	24

1 Einführung

In diesem Exposé werde ich darauf eingehen, warum ich mich in meiner Bachelorarbeit gerne mit dem TLS-Protokoll befassen würde und eine kurze Einführung in das Thema geben. Zuerst werde ich kurz erklären, was mich dazu motiviert hat, mich mit dem Thema zu befassen, und in welche Richtung eine mögliche Bachelorarbeit gehen könnte.

Danach folgt eine Übersicht über die Funktionsweise des Protokolls und bisherige Angriffe gegen aktuelle und frühere Versionen des TLS- bzw. SSL-Protokolls.

Auf geeignete Literatur bzw. Veröffentlichungen wird an den entsprechenden Stellen der Ausarbeitung eingegangen.

1.1 Motivation

TLS ist das wohl am meisten genutzte Sicherheitsprotokoll im Internet. Aus diesem Grund wurde es im Laufe seiner Entwicklung oft untersucht und angegriffen. Dabei sind viele einfache und elegante Angriffe gefunden worden, die zeigen, wie wirksam die kleinsten Schwächen in Protokollen ausgenutzt werden können, und das auch Entscheidungen in scheinbar unbedenklichen Bereichen zu Sicherheitslücken führen können.

In den verschiedenen SSL- und TLS-Versionen wurden viele Änderungen vorgenommen, um diese Angriffe zu verhindern. Daher bietet TLS auch gute Beispiele für Dinge, die bei der Erstellung eines Protokolls bedacht werden müssen, und für wirksame Gegenmaßnahmen gegen bestimmte Angriffe.

1.2 Richtung der Bachelorarbeit

Eine Bachelorarbeit, die sich mit TLS befasst, könnte neben der grundsätzlichen Funktionsweise und einer Übersicht über bisherige Angriffe auf die Änderungen in TLS 1.3 eingehen. Für diese Version liegt ein Draft in 5. Version vom 9. März 2015 vor ([Res15]).

Auch ein konstruktiver Teil wäre denkbar, der sich mit der Überprüfung von TLS-gesicherten Servern oder der Implementation von Angriffen (oder verwundbaren Systemen) zum Beispiel für die Lehre befassen könnte.

2 SSL und TLS - ein Überblick

SSL (Secure Socket Layer) bzw. TLS¹ (Transport Layer Security) ist ein zustandsbehaftetes Protokoll, das (meist) auf dem TCP-Protokoll² der Transportschicht des TCP/IP-Protokollstapels aufbaut.

Hauptaufgaben von TLS sind Authentifikation der Kommunikationspartner, Verschlüsselung der Kommunikation sowie die Sicherstellung der Integrität der übertragenen Nachrichten ([Mey14]). Dazu läuft die Kommunikation über TLS in zwei Phasen ab: Zu Beginn wird eine sichere Verbindung durch Festlegung der verwendeten kryptographischen Verfahren und des Schlüsselmaterials hergestellt. Danach können Daten transparent für Anwendungen und auf TLS aufbauende Protokolle über diese Verbindung gesendet werden. Einige Beispiele für solche Protokolle und Anwendungen der Anwendungsschicht, die TLS nutzen, sind:

HTTPS für die Datenübertragung, zumeist für die Auslieferung von Webseiten genutzt.

FTPS für die Dateiübertragung.

SMTP für das Senden und Weiterleiten von E-Mails (als SMTPS oder per STARTTLS³).

IMAP für den Zugriff auf E-Mails auf Mailservern (als IMAPS oder per STARTTLS³).

POP3 für den Abruf von E-Mails von Mailservern (als POP3S oder per STARTTLS³).

OpenVPN, eine verbreitete VPN-Software.

SSL wurde von der Firma Netscape entwickelt und zuerst in ihrem Browser, dem Netscape Navigator, verwendet. Nach mehreren neuen Protokollversionen und nachdem es starke Verbreitung gefunden hatte, wurde es durch die IETF als TLS 1.0 standardisiert (TLS 1.0 entspricht SSL 3.1). Aktuell ist die TLS-Version 1.2 und an Version 1.3 wird gearbeitet.

Inzwischen ist TLS laut [Sch09] das „gegenwärtig meistverwendete Verschlüsselungsprotokoll im Internet“. Gründe hierfür sind dem Autor zufolge insbesondere die leichte Integrierbarkeit in bestehende Strukturen, die im Gegensatz zu IPsec „deutlich schnörkelloser[e] und einfacher[e]“ Protokollspezifikation und auch die marktreife Verfügbarkeit in den frühen 90er Jahren.

TLS 1.0 RFC 2246 - <http://tools.ietf.org/html/rfc2246>

TLS 1.1 RFC 4346 - <http://tools.ietf.org/html/rfc4346>

TLS 1.2 RFC 5246 - <http://tools.ietf.org/html/rfc5246>

TLS 1.3 Draft - <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-tls-tls13-05>

1. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Einfachheit halber lediglich von TLS gesprochen. Bei etwaigen Unterschieden wird explizit auf diese eingegangen.

2. DTLS (Datagram Transport Layer Security) ist ein auf TLS basierendes Protokoll, dass auf UDP aufsetzt.

3. SMTPS/IMAPS/POP3S beginnen die TLS-Verbindung bereits direkt nach dem Verbindungsaufbau und laufen, um dieses Verhalten zu erzwingen, über einen anderen Serverport. STARTTLS ist ein Kommando, das nach Verbindungsaufbau gesendet werden kann, um eine TLS-Verbindung zu initiieren.

TLS Extensions Z.B.

RFC 3546 - <http://tools.ietf.org/html/rfc3546>,

RFC 3466 - <http://tools.ietf.org/html/rfc4366>,

RFC 6066 - <http://tools.ietf.org/html/rfc6066>

2.1 Implementierungen

3 Funktionsweise und Teilprotokolle

Die Informationen in diesem Abschnitt stammen überwiegend aus der TLS 1.2-Spezifikation ([DR08]). Für einen ersten Überblick wurde [Eck13] genutzt.

TLS besteht aus zwei Schichten. In der oberen Schicht sind vier Teilprotokolle spezifiziert: Handshake Protocol, Change Cipher Spec Protocol, Alert Protocol und Application Data Protocol, auf die später eingegangen wird. In der unteren Schicht befindet sich das Record Protocol, das die Daten von den Teilprotokollen der oberen Schicht entgegennimmt, verarbeitet und dann an tiefere Netzwerkschichten weitergibt. Eine Übersicht bietet Abbildung 3.1.

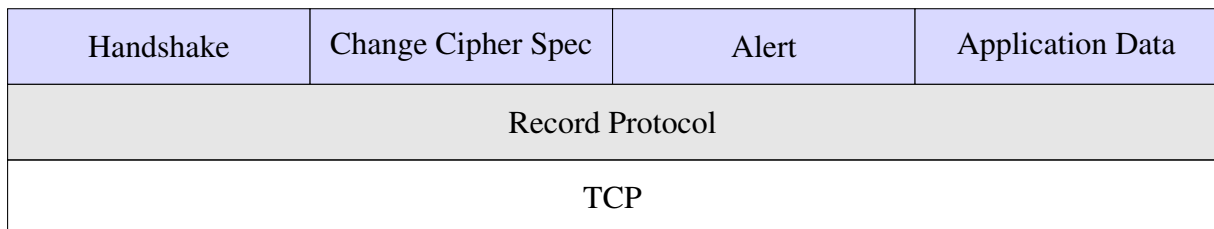


Abbildung 3.1: Überblick über die TLS-Protokollhierarchie

3.1 Record Protocol

Die zu sendenden Protokolldaten werden von dem Record Protocol fragmentiert (in maximal 2^{14} Byte große Pakete) und optional komprimiert. Danach wird je nach während des Handshakes verhandelten kryptographischen Funktionen (vgl. Abschnitt 3.3) die Integrität der Daten durch Berechnen und Anhängen eines MACs gesichert und die Nachricht verschlüsselt¹. Auf diese Schritte wird im Folgenden genauer eingegangen.

Daten, die von einer höheren Schicht entgegengenommen werden, werden zu Beginn in ein **TLSP Plaintext**-Objekt verpackt.

```
struct {
    ContentType type;
    ProtocolVersion version;
    uint16 length;
    opaque fragment[TLSP Plaintext.length];
} TLSP Plaintext;
```

Der **ContentType** steht für den Protokolltyp der Nachricht: Change Cipher Spec Protocol (20), Alert Protocol (21), Handshake Protocol (22) oder Application Data Protocol (23). Die **ProtocolVersion** besteht aus zwei Bytes für die über- und untergeordnete Protokollnummer (z.B. (3,3) für TLS 1.2). Im **fragment** werden die zu übertragenden Daten gespeichert.

1. Es wird MAC-then-Encrypt verwendet. Laut [BN00] ist Encrypt-then-MAC vorzuziehen. In [Kra01] wird dieses Ergebnis bestätigt, aber auch die Sicherheit von MAC-then-encrypt unter bestimmten Voraussetzungen gezeigt.

Zum Einstieg grobe Funktionsbeschreibung, evtl. schon mit Grafik über Verbindungsaufbau?, Grafik der TLS-Protokolle

Kapitel evtl. hinter den Handshake? Und vorher auf Schlüsselberechnung eingehen?

Nach <http://crypto.stackexchange.com/questions/1111/why-is-mac-then-encrypt-preferred-over-encrypt-then-mac> schlägt Schneier in Cryptography Engineering MAC-then-encrypt aus Gründen der Komplexität von Encrypt-then-MAC vor. Nachlesen! Gibt es in der Informatik-Bibliothek: T FER 45399

Danach werden die Daten optional durch den während des Handshakes vereinbarten Kompressionsalgorithmus komprimiert und in ein **TLSCompressed**-Objekt überführt.

```
struct {
    ContentType type;           /* same as TLSPlaintext.type */
    ProtocolVersion version; /* same as TLSPlaintext.version */
    uint16 length;
    opaque fragment[TLSCompressed.length];
} TLSCompressed;
```

Anschließend wird die Integrität der Daten mit einem MAC geschützt, der folgendermaßen berechnet wird:

```
MAC(MAC_write_key, seq_num +
    TLSCompressed.type +
    TLSCompressed.version +
    TLSCompressed.length +
    TLSCompressed.fragment);
```

Die fortlaufende Sequenznummer **seq_num** dient hierbei zur Verhinderung von Replay-Angriffen, also der erneuten Sendung von mitgelesenen Paketen durch einen Angreifer. Bei den in TLS verwendeten Cipher-Suites wird das HMAC-Verfahren zur Berechnung des MACs genutzt. Details zu diesem Verfahren sind in [KBC97] zu finden. Die hierbei verwendete Hashfunktion wird in der Cipher-Suite angegeben.

Danach wird der Klartext zusammen mit dem MAC verschlüsselt, in ein **TLSCiphertext**-Objekt überführt und dann verschickt.

```
struct {
    ContentType type;           /* same as TLSCompressed.type */
    ProtocolVersion version; /* same as TLSCompressed.version */
    uint16 length;
    select (SecurityParameters.cipher_type) {
        case stream: GenericStreamCipher;
        case block:  GenericBlockCipher;
        case aead:   GenericAEADCipher;
    } fragment;
} TLSCiphertext;
```

Abhängig vom verwendeten Verschlüsselungsverfahren sehen diese Nachrichten unterschiedlich aus. Bei Stromchiffren wird der MAC zusammen mit den Daten (**TLSCompressed.fragment**) verschlüsselt und übertragen.

Bei Blockchiffren werden die Daten zusammen mit dem MAC zuerst mit Padding versehen, um ein Vielfaches der Blocklänge als Länge zu erhalten. Jedes Padding-Byte enthält die Paddinglänge als Wert. Dann werden MAC und Daten zusammen verschlüsselt und mit dem für jede Nachricht zufällig generierten Initialisierungsvektor (IV) versendet.

Bei der Nutzung von AEAD-Chiffren² werden bei der Verschlüsselung zusätzlich zum Klartext und Schlüssel zwei zusätzliche Parameter verwendet: eine sogenannte nonce (eine einmalig verwendete, zufällige Eingabe) und zusätzliche Daten, in die die Sequenznummer der Nachricht, ihr Typ, ihre Version und ihre Länge einfließen. Der explizite Teil der nonce wird neben den verschlüsselten Daten übertragen. Der implizite Teil wird durch server bzw. client write IV

2. Authenticated Encryption with Associated Data: Betriebsmodi für Blockchiffren, die ohne zusätzlichen MAC Authentizität und Integrität bereitstellen. Beispiele für solche Modi sind CCM (Counter with CBC-MAC) oder GCM (Galois/Counter Mode).

gebildet (vgl. Abschnitt 3.2). Die Notwendigkeit einer MAC-Berechnung entfällt in diesem Fall.

3.2 Berechnung des Schlüsselmaterials

Bei der Berechnung von Schlüsseln verwendet TLS eine eigene Konstruktion namens PRF (Pseudo Random Function), die standardmäßig für alle Cipher-Suites verwendet wird und auf dem HMAC-Verfahren aufbaut:

```
PRF(secret, label, seed) = P_hash(secret, label + seed)

P_hash(secret, seed) = HMAC_hash(secret, A(1) + seed) +
                      HMAC_hash(secret, A(2) + seed) +
                      HMAC_hash(secret, A(3) + seed) + ...

mit
A(0) = seed
A(i) = HMAC_hash(secret, A(i-1))
```

Nach der ClientKeyExchange-Nachricht sind Client und Server im Besitz des pre-master-secret. Aus diesem und den in den Hello-Nachrichten übertragenen random-Werten wird nun auf beiden Seiten das master-secret folgendermaßen generiert:

```
master_secret = PRF(pre_master_secret,
                    "master secret",
                    ClientHello.random + ServerHello.random) [0..47];
```

Aus diesem master-secret werden je nach verwendeten kryptographischen Verfahren Schlüssel für die Erstellung des MACs, für die Verschlüsselung zwischen Client und Server und für eine zusätzliche Eingabe bei AEAD-Chiffren berechnet:

```
client write MAC key
server write MAC key
client write encryption key
server write encryption key
client write IV
server write IV
```

Dazu werden solange Schlüsselblöcke nach dem folgenden Verfahren erstellt, bis genug Daten vorhanden sind um alle benötigten Schlüssel konstruieren zu können:

```
key_block = PRF(SecurityParameters.master_secret,
                "key expansion",
                SecurityParameters.server_random +
                SecurityParameters.client_random);
```

3.3 TLS-Handshake

Das Handshake Protocol dient zur Herstellung einer gesicherten Verbindung. Hierbei werden verwendete TLS-Version und kryptographische Verfahren zwischen den Kommunikationspartnern vereinbart, optional ihre Identitäten authentifiziert und ein gemeinsames Geheimnis (das sogenannte pre-master-secret) für die bereits beschriebene Generierung der während der eigentlichen Kommunikation verwendeten Schlüssel übertragen oder berechnet.

Eine Übersicht über die während eines vollständigen Handshakes ausgetauschten Nachrichten bietet Abbildung 3.2. Im Folgenden werden diese Nachrichten und ihr Aufbau im Detail betrachtet. Nachrichten, die - je nach gewünschten Eigenschaften der Verbindung - optional gesendet werden können, sind mit einem Stern(*) gekennzeichnet.

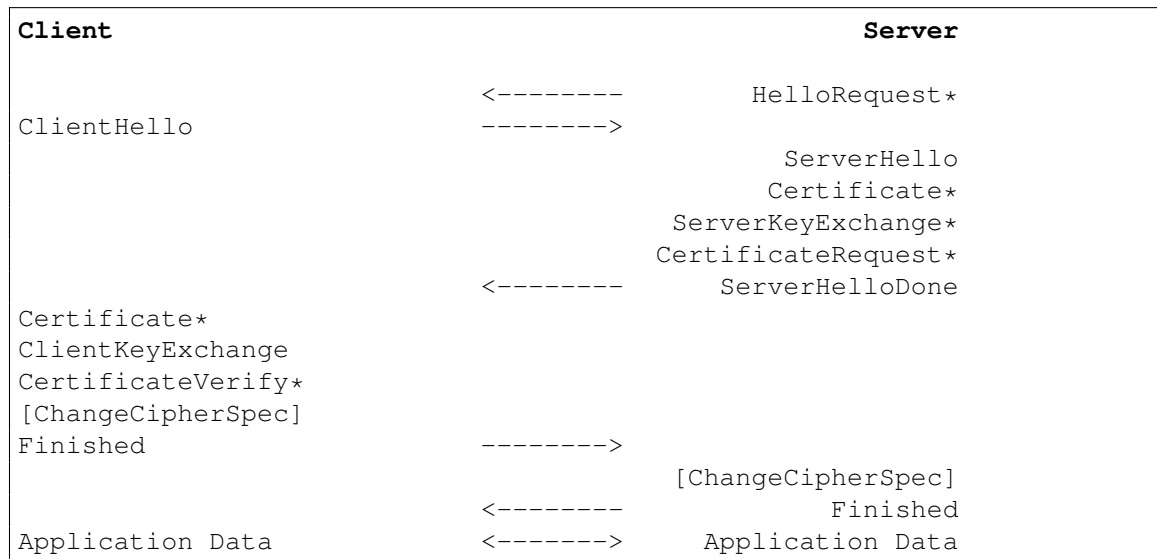


Abbildung 3.2: Nachrichtenverlauf beim vollständigen TLS-Handshake. Entnommen aus [DR08].

HelloRequest*

```
struct { } HelloRequest;
```

Diese Nachricht kann vom Server gesendet werden, wenn ein neuer Handshake gewünscht wird (beispielsweise um Schlüssel und kryptographische Funktionen während einer Verbindung neu auszuhandeln).

ClientHello

```
struct {
    ProtocolVersion client_version;
    Random random;
    SessionID session_id;
    CipherSuite cipher_suites<2..2^16-2>;
    CompressionMethod compression_methods<1..2^8-1>;
    select (extensions_present) {
        case false:
            struct {};
        case true:
            Extension extensions<0..2^16-1>;
    };
} ClientHello;
```

Hierbei enthält **client_version** die neueste vom Client unterstützte TLS-/SSL-Version (z.B. 3.3 für TLS 1.2). **random** besteht aus einem 4-Byte großen Zeitstempel (UNIX-Format) und 28 zufälligen Bytes. Die **session_id** dient zur Identifikation einer Sitzung. Sie ist

bei dem ersten Handshake leer und kann später dazu verwendet werden, bestehende Sitzungen wieder aufzunehmen (vgl. Abschnitt 3.6). Die Cipher-Suite-Liste enthält alle vom Client unterstützten Cipher-Suites in Reihenfolge seiner Präferenz. Ebenso wird eine Liste von unterstützten Kompressionsalgorithmen übertragen. Optional kann auch eine Liste von gewünschten TLS-Extensions angegeben werden (vgl. refbla).

Abschnitt über
TLS extensions vgl.
TLS1.2 - 7.4.1.4

ServerHello

```
struct {
    ProtocolVersion server_version;
    Random random;
    SessionID session_id;
    CipherSuite cipher_suite;
    CompressionMethod compression_method;
    select (extensions_present) {
        case false:
            struct {};
        case true:
            Extension extensions<0..2^16-1>;
    };
} ServerHello;
```

In **server_version** steht die höchste Version, die Server und Client unterstützen und die damit für die Kommunikation verwendet wird. **random** besteht äquivalent zur ClientHello-Nachricht aus einem 4-Byte Zeitstempel und 28 zufälligen Bytes. Die **session_id** enthält entweder eine neu generierte ID, die ID einer wieder aufgenommen Sitzung oder kann auch leer sein, um anzugeben, dass die Sitzung nicht wieder aufgenommen werden kann. In **cipher_suite** und **compression_method** überträgt der Server die von ihm aus den vom Client übertragenen Listen ausgewählte Cipher-Suite bzw. den Kompressionsalgorithmus. In der Extensionliste gibt der Server alle vom Client gewünschten Extensions an, die er unterstützt.

ServerCertificate*

```
struct {
    ASN.1Cert certificate_list<0..2^24-1>;
} Certificate;
```

In dieser Nachricht sendet der Server seine Zertifikatskette zur Überprüfung seiner Identität. Das erste Zertifikat in der Liste bildet das Serverzertifikat, folgende Zertifikate müssen das jeweils vorhergehende zertifizieren. Der im Zertifikat enthaltene Public Key muss zum ausgehandelten Schlüsselaustausch-Algorithmus passen. Wenn nicht anders ausgehandelt wird für die Zertifikate das X.509v3-Format verwendet.

RFC als Quelle

ServerKeyExchange*

```
struct {
    select (KeyExchangeAlgorithm) {
        case dh_anon:
            ServerDHParams params;
        case dhe_dss:
        case dhe_rsa:
            ServerDHParams params;
    } digitally-signed struct {
        opaque client_random[32];
    };
}
```

```

        opaque server_random[32];
        ServerDHParams params;
    } signed_params;
    case rsa:
    case dh_dss:
    case dh_rsa:
        struct {} ; /* message is omitted for rsa, dh_dss, and
                     dh_rsa */
};
} ServerKeyExchange;

```

Diese Nachricht wird nur für bestimmte Schlüsselaustausch-Algorithmen gesendet, wenn die ServerCertificate-Nachricht nicht genügend Informationen zum Austausch des pre-master-secret bietet (vgl. ClientKeyExchange-Nachricht).

CertificateRequest*

```

struct {
    ClientCertificateType certificate_types<1..2^8-1>;
    SignatureAndHashAlgorithm supported_signature_algorithms<2^16-1>;
    DistinguishedName certificate_authorities<0..2^16-1>;
} CertificateRequest;

```

TLS unterstützt optionale Clientauthentifizierung. Mit dieser Nachricht kann der Client vom Server aufgefordert werden ebenfalls ein Zertifikat zu senden. Die **certificate_types**-Liste enthält alle Zertifikatarten (z.B. Zertifikat mit RSA-Schlüssel, ...), die vom Server unterstützt werden, und **supported_signature_algorithms** die unterstützten Signaturalgorithmen. In **certificate_authorities** kann eine Liste von erwarteten CAs übertragen werden.

ServerHelloDone

```

struct { } ServerHelloDone;

```

Mit dieser Nachricht signalisiert der Server das Ende des ServerHello und zugehöriger Nachrichten.

ClientCertificate*

Wenn von dem Server eine Clientauthentifizierung gefordert wurde, kann der Client in dieser Nachricht seine Zertifikatskette senden. Das Format entspricht dem der ServerCertificate-Nachricht.

ClientKeyExchange

```

struct {
    select (KeyExchangeAlgorithm) {
        case rsa:
            EncryptedPreMasterSecret;
        case dhe_dss:
        case dhe_rsa:
        case dh_dss:
        case dh_rsa:
        case dh_anon:
            ClientDiffieHellmanPublic;
    };
};

```

```

    } exchange_keys;
} ClientKeyExchange;

```

Wenn RSA als Schlüsselaustausch-Algorithmus vereinbart wurde, so wird das vom Client generierte pre-master-secret mit dem Public Key des Servers verschlüsselt und gesendet. Es besteht aus der größten vom Client unterstützten Protokollversion (2 Bytes), um Version-Rollback-Angriffe zu verhindern (siehe Abschnitt 4.1), und 46 zufällig generierten Bytes.

```

struct {
    public-key-encrypted PreMasterSecret pre_master_secret;
} EncryptedPreMasterSecret;

```

Wenn der Schlüsselaustausch per Diffie-Hellman-Verfahren geschieht,...

DH ergänzen, p.61

```

struct {
    select (PublicValueEncoding) {
        case implicit: struct { };
        case explicit: opaque dh_Yc<1..2^16-1>;
    } dh_public;
} ClientDiffieHellmanPublic;

```

CertificateVerify*

```

struct {
    digitally-signed struct {
        opaque handshake_messages[handshake_messages_length];
    }
} CertificateVerify;

```

Diese Nachricht wird gesendet, falls ein Clientzertifikat vom Server angefordert wurde. Sie besteht aus einem mit dem Private Key des Clients signierten Hash der bisherigen Handshake-Nachrichten und dient dazu den Client zu authentifizieren.

ChangeCipherSpec

Diese Nachricht gehört zum Change Cipher Spec Protocol. Es enthält lediglich diese eine Nachricht mit dem Wert 1. Das Empfangen signalisiert dem Empfänger, dass alle nachfolgend gesendeten Nachrichten mit den ausgehandelten kryptographischen Verfahren und Schlüsseln geschützt werden. Dazu werden read pending state (bei Empfang der Nachricht) und write pending state (nach Senden der Nachricht) in die current states kopiert.

Irgendwo schon erwähnt oder bei der Einführung?

Finished

```

struct {
    opaque verify_data[verify_data_length];
} Finished;

```

Die Finished-Nachricht dient zur Verifikation von erfolgreichem Schlüsselaustausch und Authentifikation. Diese Nachricht ist wie erwähnt die erste, die von den ausgehandelten Verfahren und Schlüsseln geschützt wird. Daher kann hier überprüft werden, ob der Handshake erfolgreich verlaufen ist und beiden Kommunikationspartnern die gleichen Informationen vorliegen.

Die Nachricht besteht aus einem Hash über die bisher gesendeten bzw. empfangenen Nachrichten des Handshake Protocols zusammen mit dem master-secret:

```

verify_data = PRF(master_secret,
                  finished_label,
                  Hash(handshake_messages)) [0..verify_data_length-1];

```

Das **finished_label** wird durch "client finished" auf der Client- bzw. "server finished" auf der Serverseite gebildet. Der Hash wird durch die in der PRF verwendete Hashfunktion berechnet (vgl. Abschnitt 3.2). **verify_data_length** entspricht, wenn durch die Cipher-Suite nicht anders vorgegeben, 12 Bytes Länge.

Nachdem **verify_data** vom Server und Client jeweils mit der selbst gesendeten Nachricht verglichen wurde, ist die Verbindung im Erfolgsfall aufgebaut. Nun sind die **SecurityParameters** vereinbart und bilden zusammen mit den berechneten Schlüsseln (vgl. Abschnitt 3.2) den Verbindungszustand.

```

struct {
    ConnectionEnd          entity;
    PRFAlgorithm           prf_algorithm;
    BulkCipherAlgorithm    bulk_cipher_algorithm;
    CipherType             cipher_type;
    uint8                  enc_key_length;
    uint8                  block_length;
    uint8                  fixed_iv_length;
    uint8                  record_iv_length;
    MACAlgorithm           mac_algorithm;
    uint8                  mac_length;
    uint8                  mac_key_length;
    CompressionMethod      compression_algorithm;
    opaque                 master_secret[48];
    opaque                 client_random[32];
    opaque                 server_random[32];
} SecurityParameters;

```

Diese Informationen enthalten Angaben zu verwendeter Cipher-Suite, zum Kompressionsalgorithmus und das master-secret. Sie werden vom Record Protocol für die Verschlüsselung und Authentifizierung von Nachrichten verwendet.

3.4 Alert Protocol

Das Alert Protocol dient dazu, auftretende Fehler zu versenden, die während der Kommunikation auftreten. Hierbei kann es sich zum Beispiel um fehlgeschlagene Überprüfung von entschlüsselten Nachrichten (bad_record_mac) oder fehlerhafte Zertifikatsüberprüfung (bad_certificate) handeln. Unterschieden wird zwischen Fehlern (fatal alert), die sofort zum Schließen der Sitzung führen, und Warnungen (warning alert). Eine Übersicht über alle Fehler findet sich in Abschnitt 7.2 von [DR08].

3.5 Application Data Protocol

Das Application Data Protocol ist zuständig für das Durchreichen von Anwendungsdaten, die von der Anwendungsschicht gesendet werden sollen. Die Daten werden durch das Record Protocol übertragen und damit durch die während des Handshakes ausgehandelten Verfahren und Schlüssel geschützt.

3.6 Sitzungen, Verbindungen und der verkürzte Handshake

Wo passt das Kapitel hier denn am Besten hin?

TLS erstellt beim ersten Handshake eine Sitzung zwischen Client und Server. Hierbei wird ein Sitzungsidentifikator erstellt, der beim ServerHello mitgesendet wird.

Ein Client kann nun später, wenn er den erhaltenen Sitzungsidentifikator in einer ClientHello-Nachricht mitschickt, eine alte Sitzung in Form einer neuen Verbindung wiederaufnehmen oder mehrere Verbindungen parallel aufbauen. Dabei werden die in den **SecurityParameters** hinterlegten Verfahren genutzt und aus dem ebenfalls hinterlegten master-secret sowie den in den Hello-Nachrichten übertragenen random-Werten neue Schlüssel berechnet wie in Abschnitt 3.2 beschrieben. Dadurch kommt der erneute Verbindungsaufbau mit weniger gesendeten Nachrichten aus, als ein neuer Verbindungsaufbau, wie in Abbildung 3.3 ersichtlich ist. So kann auf Neuberechnung des master-secret, Server- und Client-Validierung und Aushandlung der Cipher-Suite verzichtet werden. Durch die Finished-Nachricht können sich Client und Server durch das gleiche Schlüsselmaterial, das auf dem master-secret beruht, trotzdem sicher sein, mit dem optional authentifizierten Gegenüber zu kommunizieren.

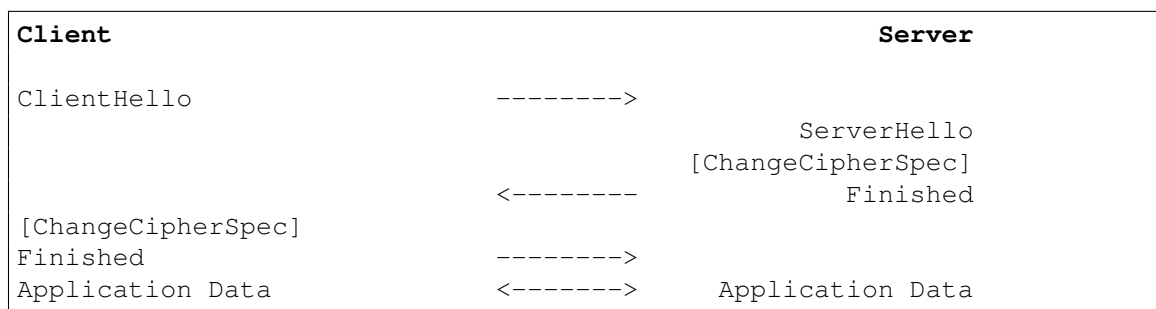


Abbildung 3.3: Nachrichtenverlauf beim abgekürzten TLS-Handshake. Entnommen aus [DR08].

3.7 Cipher-Suites

Eine Cipher-Suite legt fest, welche Algorithmen zum Schlüsselaustausch, zur Verschlüsselung und zur Berechnung des MACs verwendet werden, sowie welche Eigenschaften (Schlüssellänge, Blocklänge, ...) diese besitzen. In der TLS1.2-Spezifikation ([DR08]) sind 37 Cipher-Suites festgelegt.

Zum Schlüsselaustausch stehen RSA sowie verschiedene Varianten³ des Diffie-Hellman-Verfahrens zur Verfügung.

Zur Verschlüsselung sind die Stromchiffre RC4_128 sowie die Blockchiffren 3DES_EDE_CBC, AES_128_CBC und AES_256_CBC festgelegt.

Zur Berechnung des MACs können MD5, SHA1 und SHA256 verwendet werden (jeweils wie erwähnt unter Nutzung von HMAC).

3. DH: Zertifikat mit festen Diffie-Hellman-Parametern,
DHE: Temporäre Generierung von Parametern für jede Sitzung,
DH_anon: nicht-authentifizierte Parameter

Einen Sonderfall bildet die Cipher-Suite `TLS_NULL_WITH_NULL_NULL`, die vor der Festlegung der Cipher-Suite während des Handshakes als Standard festgelegt ist und weder Verschlüsselung noch MAC bietet.

Laut Spezifikation muss zumindest `TLS_RSA_WITH_AES_128_CBC_SHA` von jeder konformen Implementation angeboten werden.

3.8 Frühere SSL-/TLS-Versionen und TLS 1.3

Im Folgenden soll kurz auf frühere Versionen von TLS/SSL und die entscheidendsten Unterschiede zwischen diesen Versionen eingegangen werden, sowie ein kurzer Blick auf das noch nicht veröffentlichte TLS 1.3 geworfen werden.

SSL 1.0 wurde nie veröffentlicht.

SSL 2.0 war die erste Version, die öffentlich gemacht und auch patentiert wurde. In dieser Version bestanden einige große Schwachstellen: Der Handshake wurde noch nicht authentifiziert, so dass Angreifer beispielsweise die Cipher-Suite-Liste unbemerkt verändern konnten, viele schwache kryptographische Algorithmen wurden unterstützt und für Verschlüsselung und MAC-Berechnung wurden die gleichen Schlüssel verwendet. Auf diese Schwachstellen wird teilweise genauer in Kapitel 4 eingegangen. Da die Spezifikation nicht veröffentlicht wurde stammen diese Informationen aus [Mey14].

In **SSL 3.0** wurden verschiedene Schlüssel zur Verschlüsselung und MAC-Berechnung eingeführt und die während der MAC-Berechnung genutzte Hashfunktion konfigurierbar gemacht (aber noch kein HMAC verwendet). Der Handshake wurde jetzt authentifiziert (durch den Inhalt der Finished-Nachricht) und in die Generierung des pre-master-secret floss jetzt die Versionsnummer ein, um Version-Rollback-Angriffe zu verhindern. Außerdem wurden neue kryptographische Algorithmen eingeführt und weitere kleine Änderungen vorgenommen (vgl. [FKK]).

TLS 1.0 ist grobenteils äquivalent zu SSL 3.0. Es wurde die Pseudo Random Function eingeführt, die allerdings noch anders spezifiziert war als in der aktuellen Version. Die Berechnung des MACs erfolgte nun durch eine HMAC-Konstruktion. Außerdem wurde eine ChangeCipherSpec-Nachricht vor der Finished-Nachricht vorgeschrieben, um den DropChangeCipherSpec-Angriff zu verhindern (vgl. [DA99]).

In **TLS 1.1** wurden explizite Initialisierungsvektoren für Blockchiffren im CBC-Modus vorgeschrieben, um den in Abschnitt 4.8 vorgestellten Angriff zu verhindern. Das Verhalten bei Padding-Fehlern wurde verändert, um den Bleichenbacher-Angriff zu verhindern. Außerdem wurden die exportgeschwächten Cipher-Suites aus der Spezifikation entfernt (vgl. [DR06]).

In **TLS 1.2** wurde der Gebrauch von SHA1 und MD5 in der Pseudo Random Function durch eine Cipher-Suite-abhängige Hashfunktion ersetzt. Zusätzlich wurde die Unterstützung von AEAD-Cipher-Suites eingefügt. TLS-Extensions und der Gebrauch von AES als Blockchiffre wurden ergänzt. Außerdem wurden DES und IDEA als Blockchiffren aus der Spezifikation entfernt, die Unterstützung von SSL 2.0 nicht mehr empfohlen und weitere kleine Änderungen vorgenommen (vgl. [DR08]).

TLS 1.3 liegt momentan lediglich als Draft vor ([Res15], Version von Juli 2015). Die hier dargestellten Informationen stellen lediglich den aktuellen Entwicklungsstand dar und sind

daher nicht als endgültig und nur mit Vorsicht zu betrachten. In dem aktuellen Draft wird Elliptic Curve Cryptography hinzugefügt, die Unterstützung für alle SSL-Versionen und auch Kompression komplett entfernt (wahrscheinlich als Maßnahme gegen den Angriff aus Abschnitt 4.10). Die größte Veränderung ist die komplette Entfernung von Strom- und Blockchiffren im CBC-Modus zur Verschlüsselung. Es werden nur noch AEAD-Chiffren unterstützt, womit auch die separate Berechnung eines MACs entfällt. Außerdem wurde die PRF-Konstruktion durch die Verwendung von HKDF (HMAC-based Key Derivation Function, siehe [Kra]) ersetzt.

4 Angriffe gegen SSL und TLS

Eine gute Übersicht zu bisherigen Angriffen auf TLS findet sich in [MS13]. Viele Schwächen früherer Protokollversionen bis SSL 3 sind in [WS96] zu finden.

JEDEN Angriff auf angreifbare Version und Änderungen in neuen Versionen überprüfen.

4.1 Version Rollback

Ein Angreifer kann eine SSL 3-konforme ClientHello-Nachricht so modifizieren, dass der Server eine SSL 2-Verbindung aufbaut. So kann der Angreifer alle Schwächen der älteren Protokollversion ausnutzen. Abhilfe schafft die Einbindung der SSL-Version in das per RSA übertragene pre-master-secret.

Ein Schwachpunkt könnte laut [WS96] immer noch die Wiederaufnahme einer SSL 3-Sitzung durch eine SSL 2-ClientHello-Nachricht sein. Dieses sollte in Implementationen verhindert werden.

4.2 Ciphersuite Rollback

Ein für SSL 2.0 bestehender Angriff ermöglichte aktiven Angreifern die während des Handshake-Protokolls übertragenen Listen von unterstützten Cipher Suites zu verändern, so dass schwache kryptographische Verfahren erzwungen werden konnten (oftmals exportgeschwächte Verfahren mit kürzeren Schlüsselängen).

In SSL 3.0 wird dieser Angriff dadurch verhindert, dass die Finished-Nachrichten von Client und Server jeweils einen mit dem master-secret berechneten MAC über die Nachrichten des *Handshake*-Protokolls enthalten, der die Integrität dieser Nachrichten bestätigt.

Eine detaillierte Übersicht ist in [WS96] zu finden.

4.3 Verhindern der ChangeCipherSpec-Nachricht

Im Sonderfall einer SSL-Verbindung, die lediglich die Integrität der Nachrichten schützen soll, aber nicht verschlüsselt, lässt sich ausnutzen, dass der in der Finished-Nachricht gesendete MAC die ChangeCipherSpec-Nachricht nicht mit einschließt. Dadurch kann ein aktiver Angreifer diese Nachrichten abfangen und nicht weiterleiten, sodass die Verbindungspartner die Integritätsprüfung nicht einsetzen. Ein Angreifer ist so in der Lage, gesendete Nachrichten zu verändern.

Theoretisch wäre der Angriff unter bestimmten Voraussetzungen und schwacher Kryptographie auch bei verschlüsselten Verbindungen möglich, unter praktischen Gesichtspunkten aber eher unwahrscheinlich.

Die TLS 1.0-Spezifikation verhindert diesen Angriff dadurch, dass sie eine ChangeCipherSpec-Nachricht vor der Finished-Nachricht explizit vorschreibt.

Details zu diesem Angriff sind in [WS96] zu finden.

4.4 Schwache Cipher Suites

Tu es! Exportbeschränkte Dinge erwähnen

4.5 Bleichenbacher-Angriff

Daniel Bleichenbacher stellte 1998 in [Ble98] einen Adaptive Chosen Ciphertext Angriff gegen RSA-basierte Protokolle vor.

Der Angriff basiert auf dem festen Format nach PKCS #1 formatierter Nachrichten.

Weiter ausformulieren

4.6 Padding Oracle Angriff

In [Vau02] beschreibt der Autor einen Angriff zur Erlangung des Klartextes, bei dem das für Blockchiffren nötige Padding im CBC-Modus ausgenutzt wird. Durch das vorgegebene Format des Paddings und da das Padding bei TLS nicht durch den MAC geschützt ist (MAC - then PAD - then Encrypt) ermöglicht es theoretisch in einer relativ kleinen Zahl von Anfragen die Berechnung des Klartextes. Praktisch konnte das Verfahren nicht eingesetzt werden, da SSL 3.0 für Padding- und Entschlüsselungsfehler gleiche Fehlermeldungen ausgibt und bei Paddingfehlern mit einem decryption_failed-error die Sitzung abbricht.

TLS 1.0 nicht? Mal gucken

In [CHVV03] beschreiben die Autoren eine Umsetzung des Angriffs auf TLS-gesicherte IMAP-Verbindungen zur Erlangung von Passwörtern. Hierbei wird das Problem ununterscheidbarer und verschlüsselter Fehlermeldungen durch einen Timing-Angriff umgangen. Außerdem bedenken die Autoren das Abbrechen der Sitzung durch Nutzung vieler paralleler Sitzungen mit dem gleichen verschlüsselten Aufruf (wie es bei der Authentifizierung im IMAP-Protokoll der Fall ist).

nachschauen!

Begriff: Padding Oracle einbauen

4.7 Lucky Thirteen

In [AFP13] stellen die Autoren weitere auf [Vau02] basierende Angriffe vor, die ebenfalls auf Timing-Attacken zur Erkennung falschen Paddings und mehrere Verbindungen setzen.

4.8 Chosen Plaintext Angriff gegen bekannte IVs

In [Bar04] stellt der Autor einen Angriff vor, der die Art ausnutzt, wie die für den CBC-Modus nötigen Initialisierungsvektoren (IV) von TLS bereitgestellt werden. Durch die Nutzung des letzten Ciphertextblocks der letzten Nachricht als IV der neuen Nachricht lässt sich unter bestimmten Voraussetzungen ein Chosen-Plaintext-Angriff durchführen. Der Autor beschreibt eine Möglichkeit unter Nutzung von Browser-Plugins über HTTPS übertragene Passwörter oder PINs herauszufinden. In [Bar06] verbessert der Autor seinen Angriff durch die Nutzung von Java-Applets anstelle von Browser-Plugins.

Seit TLS 1.1 werden explizite IV vorgeschrieben. Hierzu besteht jede Nachricht aus einem Ciphertextblock mehr als Klartextblöcken. Dieser erste Block bildet den IV für die restliche Verschlüsselung. Da dieser IV nicht vor dem Senden der Nachricht bekannt ist, wird der hier beschriebene Chosen-Plaintext-Angriff verhindert.

4.9 BEAST

In [DR11] und in einem Konferenzbeitrag auf der ekoparty Security Conference 2011 wurde von den Autoren das Tool BEAST vorgestellt, das die Ideen aus [Bar04] aufgreift. Die Autoren erweiterten den Angriff jedoch auf einen sogenannten block-wise chosen-boundary Angriff, bei dem der Angreifer die Lage der Nachricht in den verschlüsselten Blöcken verändern kann. Die Autoren zeigten auch die praktische Umsetzbarkeit am Beispiel des Entschlüsselns einer über HTTPS gesendeten Session-ID.

4.10 CRIME

Auf der ekoparty Security Conference 2012 stellten die Entdecker des BEAST-Angriff einen weiteren Angriff vor, der die (optionale) Kompression in TLS nutzt, um beispielsweise Cookiedaten zu stehlen.

4.11 Poodle

In [MDK14] nutzen die Autoren den erneuten Verbindungsversuch mit älteren Protokollversionen wenn der Handshake fehlschlägt (SSL 3.0 Fallback), der in vielen TLS-Implementationen eingesetzt wird. Darauf aufbauend beschreiben sie einen Angriff, der bestehende Schwächen in der RC4-Chiffre bzw. in der Nicht-Prüfung von Padding im CBC-Modus in SSL 3.0 ausnutzt, um Cookiedaten zu stehlen.

RC4 noch irgendwo unterbringen? Vlt bei den Ciphersuites?
<http://www.isg.rhul.ac>

4.12 FREAK

Eine Gruppe von Pariser Wissenschaftlern entdeckte eine Möglichkeit, wie ein Angreifer die Kommunikationspartner während des Handshakes zur Nutzung schwacher Kryptographie (RSA export cipher suite) bringen kann. Weiterhin zeigten sie in [BDLF⁺] die Machbarkeit der Faktorisierung der entsprechenden RSA-Module und die Praxistauglichkeit des Angriffs.

4.13 logjam

In [ABD⁺] beschreiben die Autoren mehrere Angriffe gegen die Nutzung von Diffie-Hellman(DH)-Schlüsselaustausch während des TLS Handshakes. Ein Angriff richtet sich gegen kleine DH-Parameter (DHE-EXPORT), ein weiterer nutzt die weite Verbreitung von standardisierten DH-Parametern, um mittels Vorberechnung bestimmter Werte schneller diskrete Logarithmen für beim DH-Verfahren gesendete Nachrichten zu berechnen.

4.14 Zertifikate und Verwandtes

Viele Probleme, die in den letzten Jahren aufgetreten sind, betreffen nicht das TLS-Protokoll direkt, sondern die Erstellung und Validierung von (insbesondere) Server-Zertifikaten, und seien deshalb nur am Rande erwähnt. Ein guter Überblick ist in [MS13] zu finden.

Viele dieser Angriffe richteten sich gegen mangelnde Zertifikatvalidierung in TLS-Implementierungen (keine Validierung, keine Überprüfung des Servernamens, Akzeptanz unsignierter oder abgelaufener Zertifikate, ...) oder wenig Sorgfalt bei der Zertifikaterstellung durch Certificate Authorities (Nutzung von MD5, fehlerhafte Validierung von übermittelten Servernamen, fehlerhafte Ausgabe von intermediate-Zertifikaten, mangelhaft abgesicherte Server, ...).

Der Vollständigkeit halber sei hier auch noch die notwendige Sicherheit des privaten Serververschlüssels erwähnt. Gelangt ein Angreifer in seinen Besitz, so kann er den Datenverkehr problemlos mitlesen oder verändern.

A Fehlermeldungen des Alert Protocols

Literaturverzeichnis

- [ABD⁺] David Adrian, Karthikeyan Bhargavan, Zakir Durumeric, Pierrick Gaudry, Matthew Green, J. Alex Halderman, Nadia Heninger, Drew Springall, Emmanuel Thomé, Luke Valenta, Benjamin VanderSloot, Eric Wustrow, Santiago Zanella-Béguelin, and Paul Zimmermann. Imperfect Forward Secrecy: How Diffie-Hellman Fails in Practice. <https://weakdh.org/imperfect-forward-secrecy.pdf>. Zugriff am 22.05.2015.
- [AFP13] N. J. Al Fardan and K. G. Paterson. Lucky Thirteen: Breaking the TLS and DTLS Record Protocols. *2014 IEEE Symposium on Security and Privacy*, pages 526–540, 2013.
- [Bar04] Gregory V. Bard. The Vulnerability of SSL to Chosen Plaintext Attack, 2004.
- [Bar06] Gregory V. Bard. A Challenging But Feasible Blockwise-Adaptive Chosen-Plaintext Attack on SSL. In *SECRYPT 2006, Proceedings of the international conference on security and cryptography*, pages 7–10. INSTICC Press, 2006.
- [BDLF⁺] Karthikeyan Bhargavan, Antoine Delignat-Lavaud, Cédric Fournet, Markulf Kohlweiss, Alfredo Pironti, Pierre-Yves Strub, Santiago Zanella-Béguelin, Jean-Karim Zinzindohoué, and Benjamin Beurdouche. FREAK: Factoring RSA Export Keys. <https://www.smacktls.com/#freak>. Zugriff am 22.05.2015.
- [Ble98] Daniel Bleichenbacher. Chosen Ciphertext Attacks Against Protocols Based on the RSA Encryption Standard PKCS #1. In *Proceedings of the 18th Annual International Cryptology Conference on Advances in Cryptology, CRYPTO '98*, pages 1–12, London, UK, 1998. Springer-Verlag.
- [BN00] Mihir Bellare and Chanathip Namprempre. Authenticated Encryption: Relations among Notions and Analysis of the Generic Composition Paradigm. In *Advances in Cryptology - ASIACRYPT 2000*. Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [CHVV03] Brice Canvel, Alain P. Hiltgen, Serge Vaudenay, and Martin Vuagnoux. Password Interception in a SSL/TLS Channel. In *Advances in Cryptology - CRYPTO 2003*, volume 2729, pages 583–599. Springer, 2003.
- [DA99] T. Dierks and C. Allen. The TLS Protocol - Version 1.0. RFC 2246, 1999.
- [DR06] T. Dierks and E. Rescorla. The Transport Layer Security (TLS) Protocol - Version 1.1. RFC 4346, 2006.
- [DR08] T. Dierks and E. Rescorla. The Transport Layer Security (TLS) Protocol - Version 1.2. RFC 5246, 2008.
- [DR11] Thai Duong and Juliano Rizzo. Here Come The XOR Ninjas. 2011.
- [Eck13] Claudia Eckert. *IT-Sicherheit - Konzepte, Verfahren, Protokolle*. Oldenbourg Verlag, München, 2013.
- [FKK] A. Freier, P. Karlton, and P. Kocher. Technical report.

- [KBC97] H. Krawczyk, M. Bellare, and R. Canetti. HMAC: Keyed-Hashing for Message Authentication. RFC 2104, 1997.
- [Kra] Hugo Krawczyk. cryptographic extraction and key derivation: The hkdf scheme.
- [Kra01] Hugo Krawczyk. The Order of Encryption and Authentication for Protecting Communications (or: How Secure Is SSL?). In *Proceedings of the 21st Annual International Cryptology Conference on Advances in Cryptology, CRYPTO '01*, pages 310–331, London, UK, 2001. Springer-Verlag.
- [MDK14] Bodo Möller, Thai Duong, and Krzysztof Kotowicz. This POODLE Bites: Exploiting the SSL 3.0 Fallback, 2014.
- [Mey14] Christopher Meyer. *20 Years of SSL/TLS Research - An Analysis of the Internet's Security Foundation*. Dissertation, Ruhr-University Bochum, 2014.
- [MS13] Christopher Meyer and Jörg Schwenk. SoK: Lessons Learned From SSL/TLS Attacks. In *The 14th International Workshop on Information Security Applications*, 2013.
- [Res15] E. Rescorla. The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3 - draft-ietf-tls-tls13-07. Technical report, 2015.
- [Sch09] Klaus Schmeh. *Kryptographie - Verfahren, Protokolle, Infrastrukturen*. dpunkt.verlag, Heidelberg, 2009.
- [Vau02] Serge Vaudenay. Security Flaws Induced by CBC Padding - Applications to SSL, IPSEC, WTLS... In *Advances in Cryptology - EUROCRYPT 2002*, pages 534–545. Springer, 2002.
- [WS96] David Wagner and Bruce Schneier. Analysis of the SSL 3.0 Protocol. In *The Second USENIX Workshop on Electronic Commerce*, pages 29–40. USENIX Association, 1996.

Todo list

■ Abstract schreiben	3
■ Zum Einstieg grobe Funktionsbeschreibung, evtl. schon mit Grafik über Verbindungsaufbau?, Grafik der TLS-Protokolle	8
■ Kapitel evtl. hinter den Handshake? Und vorher auf Schlüsselberechnung eingehen? .	8
■ Nach http://crypto.stackexchange.com/a/224 schlägt Schneier in Cryptography Engineering MAC-then-encrypt aus Gründen der Komplexheit von Encrypt-then-MAC vor. Nachlesen! Gibt es in der Informatik-Bibliothek: T FER 45399	8
■ Abschnitt über TLS extensions vgl. TLS1.2 - 7.4.1.4	12
■ RFC als Quelle	12
■ DH ergänzen, p.61	14
■ Irgendwo schon erwähnt oder bei der Einführung?	14
■ Wo passt das Kapitel hier denn am Besten hin?	16
■ JEDEN Angriff auf angreifbare Version und Änderungen in neuen Versionen überprüfen.	19
■ Tu es! Exportbeschränkte Dinge erwähnen	20
■ Weiter ausformulieren	20
■ TLS 1.0 nicht? Mal gucken	20
■ nachschauen!	20
■ Begriffe: Padding Oracle einbauen	20
■ RC4 noch irgendwo unterbringen? Vllt bei den Ciphersuites? http://www.isg.rhul.ac.uk/tls/	21