



Universität Bremen

Fachbereich 3: Mathematik und Informatik

Bachelorarbeit

Anpassungen von DTLS zur sicheren Kommunikation in eingeschränkten Umgebungen

Lars Schmertmann

Matrikel-Nr. 246 918 7

30. September 2013

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Carsten Bormann

2. Gutachter: Dr.-Ing. Olaf Bergmann

Betreuer: Dr.-Ing. Olaf Bergmann

Lars Schmertmann

Anpassungen von DTLS zur sicheren Kommunikation in eingeschränkten Umgebungen

Bachelorarbeit, Fachbereich 3: Mathematik und Informatik

Universität Bremen, August 2013

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt, nicht anderweitig zu Prüfungszwecken vorgelegt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Sämtliche wesentlich verwendete Textausschnitte, Zitate oder Inhalte anderer Verfasser wurden ausdrücklich als solche gekennzeichnet.

Bremen, den 30. September 2013

Lars Schmertmann

Danksagung

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Olaf Bergmann - Unterstützung	1
Jens Trillmann - Unterstützung	2
Dominik Menke - Vorlage	3

Zusammenfassung

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Verwandte Arbeiten	1
1.2.1 Datagram Transport Layer Security in Constrained Environments	1
1.2.2 A Hitchhiker's Guide to the (Datagram) Transport Layer Security Protocol	2
1.3 Ziel	3
2 Vorgehensweise	5
3 TLS / DTLS	7
3.1 Handshake	8
3.2 Alert	10
4 Anpassungen	11
4.1 Header	11
4.2 Handshake	12
5 Definition des Ciphersuits	17
6 Vergleich	19
6.1 Headercompression	19
6.2 Ciphersuit	19
7 Praktische Umsetzung	21
7.1 Server	21
7.1.1 flash-store	21
7.1.2 time	21
7.1.3 ecc	21
7.1.4 er-13-dtls	22
7.2 Client	22
7.3 Testumgebung	22
8 Fazit	23

A	Appendix	25
A.1	Abbildungsverzeichnis	25
A.2	Tabellenverzeichnis	25
A.3	Literatur	25
A.4	Liste der Abkürzungen	26
A.5	Glossar	27

List of TODOs

remove \listoftodos again	
■ Olaf Bergmann - Unterstützung	4
■ Jens Trillmann - Unterstützung	4
■ Dominik Menke - Vorlage	4
■ remove \listoftodos again	iii
■ ändern in 802.15.4	11
■ head auseinandernehmen	13
■ Test1	19
■ Test1	19
■ Test1	23

Einleitung

1.1 Motivation

Während es im Internet schon seit Mitte der 90er Jahre das „Transport Layer Security (TLS) Protocol“ [DR08] (früher SSL) gibt, um den Datenverkehr über das „Transmission Control Protocol (TCP)“ abzusichern fehlte lange Zeit ein Standard um den Datenverkehr über das „User Datagram Protocol (UDP)“ zu sichern, während die Beliebtheit des Protokolls, unter anderem im Bereich der Onlinespiele, zunahm [ERNM12, Kapitel 1]. Um diese Lücke zu schließen begann die Internet Engineering Task Force (IETF) 2004 damit ein Protokoll nach dem Vorbild von TLS zu entwickeln, was 2006 schließlich zu der Standardisierung des „Datagram Transport Layer Security (DTLS) Protocol“ [ERNM12] führte. Dieses ist fast identisch mit TLS, wurde jedoch um Mechanismen ergänzt, die in UDP im Gegensatz zu TCP fehlen. Dazu gehört insbesondere die Zuverlässigkeit der Datenübertragung die beim Verbindungsaufbau und somit der Aushandlung der Sicherheitsmechanismen notwendig ist. TLS und DTLS haben sich im Internet bewährt, sind jedoch zu einer Zeit entstanden, als das „Web of Things (WoT)“ noch nicht vertreten war. Die dort verwendeten Geräte haben nur sehr wenig Ressourcen zur Verfügung. Dies betrifft neben wenig Rechenleistung und Speicher auch den Energievorrat. Etabliert hat sich dort das „Constrained Application Protocol (CoAP)“ [SKHCB13] über UDP aufgrund seines schlanken Designs. Passend zu UDP ist das umfangreiche DTLS-Protokoll, das sich jedoch nicht so einfach auf „kleinen“ Endgeräten realisieren lässt. Genau hier soll diese Arbeit ansetzen und DTLS entsprechend Anpassen damit es auch auf Geräten mit wenig Ressourcen funktionieren kann.

1.2 Verwandte Arbeiten

1.2.1 Datagram Transport Layer Security in Constrained Environments

Im Internet-Entwurf „Datagram Transport Layer Security in Constrained Environments“ [KHOB12] haben K. Hartke und O. Bergmann bereits einige Probleme aufgezeigt, die der Einsatz von DTLS in eingeschränkten

Umgebungen mit sich bringt und mögliche Lösungen vorgeschlagen.

Eines der Hauptprobleme ist hier die geringe Paketgröße in Netzen die IPv6 over Low power Wireless Personal Area Network (6LoWPAN) verwenden, da hier die Nutzdaten auf eine Länge von 127 Byte beschränkt sind. Insbesondere beim Aufbau der sicheren Verbindung (Handshake) müssen viele Daten ausgetauscht werden, was bei der Verwendung von DTLS die Paketgröße überschreiten würde. Lösen würde das Problem bspw. eine Nutzung der IP-Fragmentierung, was aber bei Verlust einzelner Pakete zu einem neuen Versand aller IP-Fragmente führen würde und somit umfangreichen Datenverkehr erzeugt, der einen hohen Energieverbrauch mit sich bringt. Ein weiterer Ansatz besteht darin, die Menge der Daten sowohl beim Verbindungsaufbau als auch bei der Datenübertragung durch Komprimierung der Headerdaten zu verringern wofür es unterschiedliche Vorschläge gibt. Bei Nutzung von CoAP wäre es auch möglich, den Verbindungsaufbau über CoAP zu realisieren. Dadurch ist die Transportsicherung gegeben und große Pakete könnten mit einer blockweisen Übertragung effizient übertragen werden, so dass bei Paketverlusten nur die verlorenen Pakete erneut übertragen werden müssten.

Beachtet werden müssen auch die Zeiten, nach denen ein Paket als verloren angesehen und erneut gesendet wird. Gerade beim Verbindungsaufbau kann es durch aufwendige Berechnungen, wie sie bspw. im Elliptic Curve Diffie-Hellman Schlüsselaustausch benötigt werden, zu einer erhöhten Antwortzeit kommen, was nicht zu einem erneuten Paketversand führen sollte.

Beim Verbindungsaufbau werden viele Daten ausgetauscht, was gerade in eingeschränkten Umgebungen einige Zeit dauern kann. Um die Zeit möglichst kurz zu halten, ist es wichtig die Anzahl der Kommunikationsvorgänge gering zu halten oder den Verbindungsaufbau schon durchzuführen bevor Anwendungsdaten ausgetauscht werden, damit diese dann sofort übertragen werden können.

Um Speicher zu sparen müssen auch die Anzahl der sicheren Verbindungen begrenzt werden und/oder Verbindungen nach einiger Zeit automatisch geschlossen werden um neue Verbindungen zu ermöglichen.

1.2.2 A Hitchhiker's Guide to the (Datagram) Transport Layer Security Protocol

Im Internet-Entwurf „A Hitchhiker's Guide to the (Datagram) Transport Layer Security Protocol“ [[HTSKSK13](#)] haben H. Tschofenig, S.S. Kumar und S. Keoh zunächst die Unterschiede von TLS 1.0, 1.1 und 1.2 erläutert und klargestellt, dass die Details beim Handshake von der Wahl des Ciphersuits abhängen. Anhand einiger Beispiele erläutern sie, dass es wichtig ist, sich der Position eines Gerätes in einer Verbindung bewusst zu sein. So kann ein Sensor mit beschränkten Ressourcen sowohl als Server als auch als Client realisiert werden wobei es auch auf die Anzahl der möglichen Verbindungen ankommt. Ein Sensor der als Client agiert wird mit großer Wahrscheinlichkeit immer nur einen Server kontaktieren um dort neue Sensordaten zu hinterlegen, während ein als Server realisierter Sensor durchaus auch Anfragen von mehreren Clienten erhalten kann. Je klarer die Position und die Umgebung des Sensors ist, desto weniger flexibel kann dieser implementiert werden was den Aufwand und die Codegröße reduziert.

Im weiteren Verlauf gehen sie auf wichtige Design-Entscheidungen ein und Erläutern deren Bedeutung und mögliche Auswirkungen.

Kernstück des Entwurfs ist die Auswertung des Speicherverbrauchs, sowohl im Read-Only Memory (ROM) als auch im Random-Access Memory (RAM), und die Menge der Übertragenen Daten bei einem Handshake. Anhand eines modifizierten Prototypens zeigen sie dort auf, welche grundlegenden Teile von DTLS, ohne Berücksichtigung der Ciphersuit spezifischen Funktionen, wieviel Speicher verbrauchen und werten die Menge der übertragenen Daten in einem kompletten Handshake für die unterschiedlichen Protokollschichten aus. Des weiteren haben sie die Codegrößen von bspw. Hash-Funktionen und anderen für TLS notwendigen Berechnungen ausgewertet, wie sie in unterschiedlichen Ciphersuits verwendet werden.

Abschließend stellen sie fest, dass sie TLS/DTLS durchaus auf eingeschränkte Umgebungen zuscheiden lässt, wobei mehr Flexibilität aber zu einem größeren Programmcode führt.

1.3 Ziel

Ziel soll es sein DTLS so weit anzupassen, dass es sich in eingeschränkten Umgebungen, insbesondere auf einem Redbee Econotag [Red13] mit dem MC1322X Mikrocontroller [Sem13], nutzen lässt. Dabei soll der Funktionsumfang von DTLS aber nicht eingegrenzt werden. Sämtliche im Standard definierten Möglichkeiten sollen weiterhin nutzbar sein und insbesondere durch Aushandlung eines Ciphersuits angewendet werden können.

Vorgehensweise

Im Vordergrund soll die Implementierung eines Sicherheitsprotokolls stehen, das sich an den Prinzipien von DTLS orientiert und einige der Vorschläge aus dem Internet-Entwurf von K. Hartke und O. Bergmann, und/oder eigene Ideen, realisiert. Dabei liegt ein besonderes Interesse darauf den Handshake über CoAP [SKHCB13] zu realisieren und somit einige in DTLS eingefügte Konzepte überflüssig zu machen. Die Implementierung wird im Anschluss durch einen Vergleich mit DTLS evaluiert, wobei folgende Punkte eine Rolle spielen sollen: Volumen des generierten Traffics, Größe/Komplexität des Quellcodes und die vom Protokoll benötigte Speichermenge.

Die Implementierung besteht aus dem Clienten auf einem gängigen PC/Laptop, bei dem es keine speziellen Einschränkungen an Energie, Speicher oder Effizienz gibt, und aus dem Server der für einen Redbee Econotag [Red13] mit dem MC1322X Mikrocontroller [Sem13] optimiert werden soll. Da der genannte Mikrocontroller die Verschlüsselung mit dem Advanced Encryption Standard (AES) im CTR- und CBC-Mode in Hardware unterstützt und die Rechenleistung sowie der Speicher beschränkt ist, soll nur ein Ciphersuit „TLS_PSK_ECDH_WITH_AES_128_CCM_8“, in Anlehnung an den RFC 6655 [MDB12], realisiert werden. Dieses gibt einen Schlüsselaustausch mit Hilfe elliptischer Kurven vor, die mit kleineren Zahlen genau so sicher sind wie ein standard Diffie-Hellman-Schlüsselaustausch und sich somit effizient berechnen lassen. Zusätzlich wird auch ein Pre-Shared Key (PSK) verwendet, damit der Verbindungsaufbau nur den Clienten möglich ist, die über diesen Schlüssel verfügen. Die Verschlüsselung der Anwendungsdaten erfolgt dann im „Authenticated Encryption with Associated Data (AEAD)“ Modus [McGo8] wobei sich hier „Counter with CBC-MAC (CCM)“ [DWRHNF03] aufgrund der Hardwarevoraussetzungen am besten eignet. Dieser besteht aus einer Verschlüsselung der Daten durch AES im CTR-Modus während der dazugehörige Message Authentication Code (MAC) durch AES im CBC-Modus berechnet wird. Die Anzahl der möglichen sicheren Verbindungen soll beschränkt werden, um den Speicherverbrauch gering zu halten. Die dafür notwendigen verbindungspezifischen Daten wie bspw. der Master-Schlüssel sollen dabei im Flash-Speicher des Redbee Econotags abgelegt werden, so dass nur die für das aktuelle Paket benötigten Daten im RAM-Speicher befinden. Auf diese Weise lässt sich die Anzahl der möglichen sicheren Verbindungen trotz Beschränkung maximieren.

Bei der Evaluation soll die Datenmenge der Header-Daten sowohl beim Verbindungsaufbau als auch bei der

Übertragung von Anwendungsdaten mit einer reinen DTLS-Implementierung verglichen werden. Dabei werden nicht nur fehlerfreie Verbindungen betrachtet sondern auch Paketverluste mit einbezogen. Verglichen wird auch der notwendige Speicherbedarf bei Verbindungsaufbau und Übertragung der Anwendungsdaten. Ebenso soll die Größe/Komplexität des zugrunde liegenden Quellcodes bewertet werden.

TLS / DTLS

Das Sicherheitsprotokoll TLS [DR08] wird im Allgemeinen mit dem stromorientierten TCP verwendet. Wurde durch TCP eine Verbindung hergestellt, können Daten von beliebiger Größe in jede Richtung übertragen werden. TCP wird dafür sorgen, dass der eingegebene Bytestrom vollständig und in der richtigen Reihenfolge auf der Gegenseite wieder ausgegeben wird. Um die TLS bezogenen Daten nun zu kennzeichnen und voneinander abzugrenzen existiert das „Record Layer Protokoll“ dessen Header in Abbildung 3.1 dargestellt ist. Dort ist neben der Art des Inhalts und der Protokollversion auch die Länge enthalten, so dass aufeinanderfolgende Pakete im Datenstrom voneinander abgegrenzt werden können. Als Inhalt kommen 4 Sub-Protokolle in Frage. Während das Application-Data-Protokoll für den Transport der Anwendungsdaten genutzt wird, kommt das Handshake-Protokoll für die Aushandlung der Sicherheitsparameter zum Einsatz. Über das Change-Cipher-Spec-Protokoll werden die zuletzt ausgehandelten Sicherheitsparameter aktiviert. Sollte es beim Handshake oder der Übertragung von Anwendungsdaten zu Fehlern kommen, werden diese mit Hilfe des Alert-Protokolls übertragen.

Da bei DTLS [ERNM12] im Allgemeinen das paketorientierte UDP verwendet wird, bei dem die Länge eines Paketinhalts bekannt ist, wirkt die Längenangabe zunächst überflüssig. Jedoch ist es insbesondere bei einem Handshake sinnvoll, mehrere DTLS-Pakete innerhalb eines UDP-Pakets zusammenzufassen, so dass auch hier wieder eine Längenangabe benötigt wird, um die Pakete voneinander abzugrenzen. Zusätzlich sind bei DTLS nun die Datenfelder für die Epoche und die Sequenz-Nummer hinzugekommen. Während diese beiden Werte bei TLS durch die gewährleistete Reihenfolge der Daten durch TCP implizit bekannt sind, müssen diese bei DTLS explizit angegeben werden, da UDP weder die Reihenfolge noch den Transport der Daten garantiert. Die Epoche wird bei einem erfolgreichen Handshake erhöht und ordnet so die dazugehörenden Daten den im Handshake ausgehandelten Sicherheitsparametern zu, während die Sequenznummer in jeder Epoche bei 0 beginnt und bei jedem Paketversand erhöht wird.

```
1 struct {
2     ContentType type;
3     ProtocolVersion version;
4     uint16 epoch; // Nur bei DTLS
5     uint48 sequence_number; // Nur bei DTLS
6     uint16 length;
7     uint8 fragment[DTLS_Record.length];
8 } DTLS_Record;
```

Abbildung 3.1 Header des Record Layer Protokolls von TLS / DTLS

3.1 Handshake

Damit es überhaupt zu einer sicheren Verbindung kommen kann, müssen zunächst einige Sicherheitsparameter mit Hilfe des Handshake-Protokolls ausgehandelt werden. Der Header eines Handshake-Pakets setzt sich gemäß Abbildung 3.2 zusammen. Während es bei TLS ausreichend ist, den Typ, die Länge und die Daten selbst zu senden, wurden bei DTLS weitere Datenfelder ergänzt. Das `message_seq` dient zur Durchnumerierung der Handshake-Nachrichten um Paketverluste von UDP zu erkennen und eine mögliche falsche Reihenfolge der Pakete auszugleichen. Da UDP eine begrenzte Paketgröße hat und eine Fragmentierung der UDP-Pakete auf IP-Ebene vermieden werden soll, müssen Handshake-Nachrichten eventuell auf mehrere UDP-Pakete verteilt werden. Um dies zu ermöglichen wurden `fragment_offset` und `fragment_length` ergänzt. So können die Daten in mehrere Teile geteilt werden, während die Länge und die Position im Paket hinterlegt werden. `length` enthält nach wie vor die Gesamtlänge, so dass eine Fragmentierung jederzeit erkannt werden kann.

```
1 struct {
2     HandshakeType msg_type;
3     uint24 length;
4     uint16 message_seq; // Nur bei DTLS
5     uint24 fragment_offset; // Nur bei DTLS
6     uint24 fragment_length; // Nur bei DTLS
7     uint8 fragment[Handshake.length];
8 } Handshake;
```

Abbildung 3.2 Header des Handshake Protokolls von TLS / DTLS

Der bei einem Handshake entstehende Nachrichtenaustausch in vollständiger Form ist in Abbildung 3.3 aufgeführt. Die mit * markierten Pakete werden hier kurz erklärt, spielen aber im weiteren Verlauf keine Rolle, da die Authentifizierung durch den PSK realisiert werden soll und auf die Zertifikate verzichtet wird, um Ressourcen zu sparen.

Eingeleitet wird dieser mit einem ClientHello, in dem der Client seine Möglichkeiten bekannt gibt. Dazu gehören u.a. die unterstützten Protokollversionen, Ciphersuits und Kompressionsmethoden. Während der Server bei TLS nun direkt mit einem ServerHello und weiteren Handshake-Paketen antworten kann, lässt

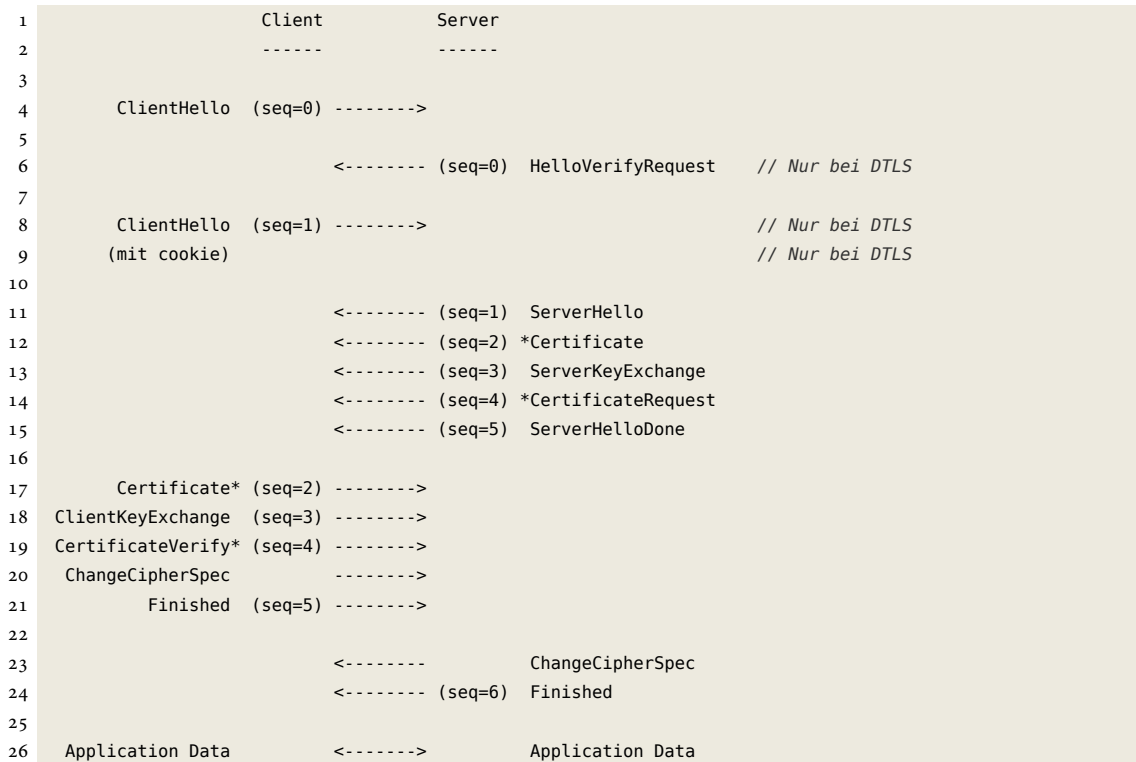


Abbildung 3.3 Nachrichtenaustausch während eines TLS / DTLS Handshakes

sich das bei DTLS so nicht realisieren. Da UDP kein verbindungsorientiertes Protokoll ist, können Pakete mit gefälschtem Absender versendet werden. Auf diese Art könnte ein Denial of Service (DoS) Angriff durchgeführt werden, in dem zahllose Pakete mit unterschiedlichen Absendern an den Server gesendet werden, welche alle ein ClientHello enthalten. Problematisch ist hierbei der Zustand der für jedes ClientHello im Server erzeugt wird. Neben dem Speicherverbrauch kann die Berechnung des ServerKeyExchange eine Menge Rechenleistung benötigen, so dass die Ressourcen des Servers schnell aufgebraucht sind. Um dies zu vermeiden und den Absender zu verifizieren wurde in DTLS ein Cookie ergänzt. Dieser wird aus dem ClientHello generiert und als Antwort an den Clienten gesendet. So kann der Server den Cookie bei einem erneuten ClientHello wieder berechnen und mit dem mitgelieferten vergleichen. Dadurch wird bei der ersten Anfrage ein Zustand vermieden und der Client verifiziert.

Im ServerHello gibt der Server bekannt, welche der vom Client genannten Möglichkeiten ausgewählt wurden. Folgen können dann ein Zertifikat, Daten für einen Schlüsselaustausch sowie eine Anfrage für das Zertifikat des Clienten. Abschließend folgt ein ServerHelloDone um dem Clienten zu signalisieren, dass er wieder an der Reihe ist. Dieser sendet nun sein eigenes Zertifikat, falls vom Server angefordert. Es folgen Daten für den Schlüsselaustausch und Daten, die es dem Server ermöglichen das Zertifikat des Clienten zu überprüfen, falls dieses die Möglichkeit bietet Daten zu signieren. Damit sind zunächst alle Daten ausgetauscht, die für

die Aushandlung der Sicherheitsmechanismen notwendig sind.

Während die bisher genannten Handshake-Nachrichten mit den Sicherheitsparametern der aktuell gültigen Epoche versendet werden, folgt nun der Versand eines ChangeCipherSpec. Dieses Paket gehört formell nicht zum Handshake-Protokoll sondern bildet ein eigenes Protokoll, da hier die Epoche verändert wird. Ein ChangeCipherSpec Paket besteht ausschließlich aus einem 1 Byte langen Header mit dem Wert 1 und enthält keine weiteren Daten. Nach dem Versand des Pakets werden alle folgenden Pakete mit den Sicherheitsparametern der neuen Epoche versendet während erst der Empfang solch eines Pakets dazu führt, dass alle folgenden eingehenden Pakete mit Hilfe der neuen Sicherheitsparameter gelesen werden.

Schließlich wird noch eine Finished-Nachricht, die wieder zum Handshake-Protokoll gehört, ausgetauscht. Diese enthält einen Hash aller bisher ausgetauschten Daten und wird mit den Sicherheitsparametern der neuen Epoche verschlüsselt. So wird der Handshake verifiziert und die neuen Sicherheitsparameter auf Korrektheit geprüft.

3.2 Alert

Wenn es während des Handshakes oder der Übertragung von Anwendungsdaten zu Fehlern kommt, werden diese mit Hilfe des Alert Protokolls übertragen. Der Header (siehe Abbildung 3.4) enthält neben dem AlertLevel, welches *warning* (1) oder *fatal* (2) sein kann, die Beschreibung des Fehlers. Während Fehler des Levels *fatal* zu einem unmittelbaren Verbindungsabbruch führen, sind Fehler des Levels *warning* zur Information der Gegenseite über mögliche Probleme gedacht. Das Alert-Protokoll unterscheidet sich bei TLS und DTLS nicht voneinander, da eine zuverlässige Übertragung nicht notwendig ist. Sollte aufgrund eines verloren gegangenen Alert-Pakets eine Anfrage wiederholt werden, wird erneut ein Alert-Paket generiert.

```
1 struct {  
2     AlertLevel level;  
3     AlertDescription description;  
4 } Alert;
```

Abbildung 3.4 Header des Alert Protokolls von TLS / DTLS

Anpassungen

Während CoAP über Port 5683 betrieben wird, erfolgt Kommunikation über die mit DTLS gesicherte Variante nun über Port 5684 und trägt den Namen „coaps“ [IAN13]. In den folgenden Unterkapiteln wird beschrieben, welche Anpassungen am allgemeinen DTLS-Header möglich sind und wie der DTLS-Handshake über CoAP abgewickelt werden kann.

4.1 Header

Da die maximale Datenmenge in 6LoWPAN-Paketen auf 127 Byte begrenzt ist würde der in DTLS definierte Header mit 13 Byte schon mehr als 10% des Datenvolumens ausmachen. Um das zu vermeiden wird die Stateless Header Compression aus dem Entwurf von K. Hartke und O. Bergmann [KHOB12, Kapitel 3] angewendet. Diese zeichnet sich durch eine verlustfreie Komprimierung aus, für die keine weiteren Informationen bereitgestellt werden müssen. Damit lässt sich der Header im besten Fall auf 2 Byte, wie in Abbildung 4.1 dargestellt, komprimieren.

ändern in 802.15.4

```

1  0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5
2  +--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+
3  |0| T | V | E | 1 1 0 | S | L |
4  +--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+

```

Abbildung 4.1 Komprimierter Handshake-Header

Der RecordType (T) kann mit 2 Bit folgende 4 Zustände annehmen: *8-Bit-Feld* (0), *Alert* (1), *Handshake* (2) und *Anwendungsdaten* (3). Trotz Realisierung des Handshakes über CoAP ist diese Unterteilung notwendig, damit auch der DTLS-Layer über die Art des Inhalts informiert ist und speziell die direkt für ihn bestimmten Daten bearbeiten kann. Hierzu gehören die Daten des Alert-Protokolls, welche ohne CoAP übertragen werden. Bei den Anwendungsdaten muss außerdem überprüft werden, dass diese nicht innerhalb der Epoche

o, ohne Sicherheitsparameter, versendet oder empfangen werden. Auf direkte Angabe von *ChangeCipherSpec* wurde verzichtet, da dies bei einem Handshake über CoAP nicht mehr notwendig ist (siehe Kapitel 4.2). Sollten weitere Unterprotokolle notwendig sein, können diese innerhalb eines 1 Byte langen Typenfeldes an den Header gehangen werden, was durch den Wert 0 signalisiert wird. In diesem zusätzlichen Byte wird dann der im TLS/DTLS definierte Wert hinterlegt. So ist es auch möglich die 3 direkt definierten Werte unkomprimiert zu versenden. Die komprimierten Werte wurden so angeordnet, dass durch Addition von 20 die in TLS/DTLS definierten Werte ermittelt werden können.

Die Version (V) kann mit 2 Bit folgende 4 Zustände annehmen von denen 3 Benutzt werden: *DTLS 1.0* (0), *16-Bit-Feld* (1) und *DTLS 1.2* (2). DTLS 1.0 und DTLS 1.2 können hier direkt definiert werden, da DTLS 1.0 weit verbreitet und DTLS 1.2 die aktuellste Version ist. Auf DTLS 1.1 wurde verzichtet, da Implementierungen die über DTLS 1.0 hinaus gehen im Allgemeinen auch DTLS 1.2 unterstützen. Auch hier ist es möglich weitere Versionen an den Header anzuhängen, in dem V auf 1 gesetzt wird wobei hier mit 2 Byte das in TLS definierte Versionsformat zum Einsatz kommt.

Die Epoche (E) kann mit den Werten 0 bis 4 kann direkt angegeben werden. Da jede Kommunikation mit der Epoche 0 beginnt, und nach dem ersten Handshake in Epoche 1 fortgeführt wird, sind dies die am Häufigsten verwendeten Werte. Jeder weitere Handshake erhöht die Epoche um 1, so dass auch weitere Epochen möglich sind ohne den Header zu vergrößern. Sollten höhere Werte benötigt werden, lässt sich das mit den folgenden Zuständen realisieren: *8-Bit-Feld* (5), *16-Bit-Feld* (6) und *Implizit* (7). So können 8 oder 16 Bit lange Epochen an den Header gehängt werden, was den durch DTLS vorgegebenen Bereich vollständig abdeckt. Alternativ kann durch den Wert 7 signalisiert werden, dass es sich bei der Epoche um die gleiche handelt, wie bei dem vorausgehenden DTLS-Paket innerhalb des gleichen UDP-Pakets.

Für die Sequenz-Nummer (S) sind mit 3 Bit 8 Zustände möglich. Während mit den Werten 1 bis 6 die Länge in Byte der angehängten Sequenz-Nummer angegeben wird, kann durch den Wert 0 die Angabe unterbunden werden. Im Allgemeinen wird die Sequenz-Nummer in Verbindung mit der Epoche zur Berechnung des MACs herangezogen. Jedoch gibt es Ciphersuits die andere Mechanismen verwenden, so dass keine Sequenz-Nummer notwendig ist. Falls mehrere DTLS-Pakete innerhalb eines UDP-Pakets enthalten sind, kann die Sequenz-Nummer durch den Wert 7 auch relativ zum Vorgänger-Paket (+1) angegeben werden.

Schließlich folgt noch ein 2 Bit Wert für die Länge. Falls im UDP-Paket nur ein DTLS-Paket enthalten ist, kann hier der Wert 0 gesetzt werden, wodurch keine Länge angegeben wird. Diese ist durch die Länge des UDP-Pakets implizit bekannt. Mit den Werten 1 und 2 kann die Länge in Byte der angehängten Länge angegeben werden, während durch den Wert 3 das letzte DTLS-Paket im UDP-Paket gekennzeichnet wird, dessen Länge wieder implizit bekannt ist.

4.2 Handshake

Auch der Handshake orientiert sich am Entwurf von K. Hartke und O. Bergmann [KHOB12, Kapitel 4].

Wie in Kapitel 3 beschrieben, wurde der Header des DTLS-Handshake-Protokolls um eine Sequenz-Nummer und 2 Datenfelder für die Fragmentierung ergänzt. Diese sind zunächst notwendig, um die in UDP fehlende Zuverlässigkeit und begrenzte Paketgröße auszugleichen. Da der Handshake nun über CoAP realisiert wird, können diese Datenfelder jedoch wieder wegfallen, da CoAP über geeignete Mechanismen verfügt.

Durch eine Kennzeichnung aller CoAP-Anfragen während des Handshakes als „confirmable“ stellt CoAP sicher, dass alle Daten zuverlässig übertragen werden. Dies wird dadurch realisiert, dass auf jede Anfrage mit mindestens einem Acknowledgement (ACK)-Paket geantwortet wird. Bleibt dies aus, wird die Anfrage nach Ablauf einer Wartezeit wiederholt. Durch diese Zuverlässigkeit und den Erhalt der Reihenfolge der Daten innerhalb eines CoAP-Pakets ist es somit möglich auf das „message_seq“ Datenfeld zu verzichten.

Um IP-Fragmentierung zu vermeiden, wird die Blockweise-Datenübertragung von CoAP verwendet. Problematisch ist die Verwendung der IP-Fragmentierung, da bei Verlust eines einzelnen Fragments das ganze IP-Paket verworfen wird. So kommt es zu einer Wiederholung der CoAP-Anfrage und die Übertragung aller Fragmente wird wiederholt. Je nach Anzahl der Fragmente und der Paketverluste, kann es somit zu einer mehrfachen Übertragung, die sowohl Zeit als auch Energie benötigt. Um dies zu vermeiden werden die Daten schon durch CoAP in Fragmente unterteilt, die in einem einzelnen IP-Paket Platz finden. Jedes Fragment wird dann durch ein eigenes CoAP-Paket übertragen welches als „confirmable“ gekennzeichnet ist. Geht ein Fragment verloren bleibt das ACK-Paket aus und die Übertragung nur dieses Fragments wird wiederholt. So bleibt die Menge der übertragenen Daten und damit der Energieverbrauch minimal und eine Übertragung der Daten ist auch bei einer hohen Rate an Paketverlusten möglich. Durch diesen Mechanismus kann auch auf die Datenfelder `fragment_offset` und `fragment_length` verzichtet werden.

Problematisch: $\text{blocksize} = 2^x$ bei `block1` (anfrage per post) $\text{blocksize} = 32$, bei `block2` antworten = 64

head auseinandernehmen

Der vollständige Handshake über CoAP ist in Abbildung 4.2 zu sehen, wobei wieder die mit * markierten Daten in dieser Arbeit keine Anwendung finden.

Für die Realisierung des Handshakes über CoAP dient die Ressource „/dtls“. Dieser Uniform Resource Identifier (URI) wurde bewusst kurz gehalten, da er im Klartext in der CoAP-Anfrage eingefügt wird und so Daten und Energie spart. Während in einem gewöhnlichen DTLS-Handshake jedes einzelne DTLS-Paket einen vollständigen DTLS-Record-Header hat, ist dies hier nicht mehr notwendig, da mehrere DTLS-Pakete innerhalb eines CoAP-Pakets enthalten sind. Der DTLS-Record-Header erscheint somit einmalig vor jedem CoAP- oder Alert-Paket. Um die DTLS-Pakete innerhalb eines CoAP-Pakets voneinander abzugrenzen, dient nun der DTLSContent-Header (Abbildung `refig:com_content_header`).

Dieser wurde abgeleitet vom Handshake-Header, wird jedoch nicht mehr so genannt, da in einem CoAP-Paket unterschiedliche DTLS-Inhalte enthalten sind. Neben Handshake- und ChangeCipherSpec-Paketen sind dort zusätzlich Alert-Pakete möglich. Während in den ersten 6 Bits der in TLS/DTLS definierte Wert für den Handshake-Typ hinterlegt werden kann, enthalten die letzten beiden Bits die Anzahl der dem Header folgenden Bytes der Länge, wobei der Wert 0 die Länge 0 direkt definiert. Neben den in TLS/DTLS definierten Handshake-Typen werden die folgenden beiden Typen definiert: `change_cipher_spec` (32) und `alert` (33).

Obwohl eine zuverlässige Übertragung von Benachrichtigungen gemäß DTLS nicht notwendig ist, macht



Abbildung 4.2 Nachrichtenaustausch während eines TLS / DTLS Handshakes über CoAP

es insbesondere bei einem Handshake sinn, diese innerhalb eines CoAP-Paketes zu versenden, falls es sich um die Antwort auf eine Anfrage handelt. Ausgehend von einem ClientHello, das auf der Server-Seite ein Problem auslöst, erwartet der Client vom Server eine CoAP-Antwort. Wird die Benachrichtigung darüber ohne CoAP versendet, muss der Client bei Erhalt der Benachrichtigung dafür sorgen, dass die Anfrage aus der darüber liegenden CoAP Schicht entfernt wird, damit diese nicht wiederholt wird. Bei Versand der Benachrichtigung über CoAP erledigt sich dies von selbst, da ja eine Antwort auf die Anfrage erhalten wurde. Der CoAP-Response-Code ist in diesem Fall „5.00 Internal Server Error“. Ein Beispiel dafür ist in [Abbildung 4.4](#) zu sehen.

Während der Record-Typ bei Anwendungsdaten eindeutig ist, muss dieser nun für einen Handshake und Benachrichtigungen definiert werden. Alert wird hier nur verwendet, falls es sich um eine Benachrichtigung direkt über UDP ohne CoAP handelt. Benachrichtigungen innerhalb von CoAP sind eindeutig durch den Content-Header gekennzeichnet und gehören immer zu einem Handshake womit hier auch der Record-


```

1  0 1 2 3 4 5 6 7
2  +--+--+--+--+--+
3  |   T   | L |
4  +--+--+--+--+--+

```

Abbildung 4.3 Komprimierter Content-Header

```

1          Client          Server
2          -----
3
4      POST /dtls ----->
5      ClientHello
6
7          <----- 5.00 Internal Server Error
8                      Alert(handshake_failure)

```

Abbildung 4.4 Nachrichtenaustausch während eines TLS / DTLS Handshakes über CoAP

Type Handshake verwendet wird. Handshake wird generell verwendet, wenn es sich um Handshake-Daten handelt. Dazu zählt hier nun auch ein enthaltenes ChangeCipherSpec-Paket. Während bei TLS/DTLS der Versand eines ChangeCipherSpec-Pakets zur anschließenden Änderungen der Sicherheitsparameter des Paketversands führt, kommt es bei Empfang solch eines Pakets zur Änderungen der Sicherheitsparameter des Paketempfangs für alle folgenden Pakete. Diese Vorgehensweise ist hier nicht mehr notwendig. Die Epoche und somit die Sicherheitsparameter für den Paketempfang ergeben sich durch den DTLS-Header. Beachtet werden muss nur, wann eine alte Epoche für den Paketempfang für ungültig erklärt werden kann. Dieses ist auf der Seite des Clienten nach Erhalt der Nachricht Nr. 6 gemäß Abbildung 4.2 möglich da diese die letzte Nachricht der alten Epoche ist der Handshake erfolgreich abgeschlossen wurde. Der Server darf die alte Epoche für den Paketempfang jedoch erst nach Erhalt der ersten Anwendungsdaten in der neuen Epoche vernichten, da er nicht sicherstellen kann, dass Nachricht Nr. 6 den Clienten erreicht hat und diese somit Nachricht Nr. 5 wiederholen könnte. Genauso verhält es sich für die Epoche und die dazugehörigen Sicherheitsparameter für den Paketversand. Hat der Server Nachricht Nr. 6 erhalten kann er alle weiteren Nachrichten mit den Sicherheitsparametern der neuen Epoche versenden und die alten löschen. Der Server weiß bei Erhalt der ersten Anwendungsdaten ebenfalls, dass Pakete innerhalb der alten Epoche nicht mehr versandt werden und kann die dazu gehörenden Sicherheitsparameter vernichten.

Da somit gemäß Abbildung 4.2 das Finished-Paket innerhalb des CoAP-Pakets noch mit den alten Sicherheitsparametern verschlüsselt wird müssen hier zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden um den Zweck des Pakets zu bewahren. Hier wird der Hash über alle im Handshake ausgetauschten Pakete nun zusätzlich mit den neuen Sicherheitsparametern verschlüsselt, wobei das Finished-Paket durch das ChangeCipherSpec-Paket, welches einen Wechsel der Sicherheitsparameter kennzeichnet, eindeutig von den vorhergehenden Daten abgegrenzt wird. Das ChangeCipherSpec-Paket kennzeichnet somit nun immer einen Wechsel von der Epoche ohne Verschlüsselung zur neuen Epoche mit Verschlüsselung. Je nach Cipher-Suite wird dadurch die in TLS definierte Länge des Finished-Pakets von 12 vergrößert, da unter Umständen

Zusatzinformationen wie Nonce und MAC hinzukommen.

Definition des Ciphersuits

Vorhanden rfc6655 [MDB12]:

CipherSuite TLS_PSK_WITH_AES_128_CCM_8 = 0xC0,0xA8

CipherSuite TLS_PSK_WITH_AES_256_CCM_8 = 0xC0,0xA9)

CipherSuite TLS_PSK_DHE_WITH_AES_128_CCM_8 = 0xC0,0xAA

CipherSuite TLS_PSK_DHE_WITH_AES_256_CCM_8 = 0xC0,0xAB

Notiz: rfc4279 [PEHT05]

Neu:

CODTLS_PSK_WITH_AES_128_CCM_8 = 0xFF,0x02

CODTLS_PSK_ECDH_WITH_AES_128_CCM_8 = 0xFF,0x01

ccm gemäß rfc3610 [DWRHNF03]

mit Nonce_Len = 12, Len_len = 3, Mac_len = 8

Nonce:

Nonce mit Länge 12 Byte = IV + Epoch + message_seq

Zwar auf beiden Seiten gleich aber irrelevant da unterschiedliche keys.

außerdem unterschiedliche IV's

Generell:

CBC-MAC anstatt HMAC mit SHA256

```
1 F(secret, label, seed) = P_hash(secret + label + seed)
2
3 hash(seed) = CBC-MAC(A(1) + seed) +
4             CBC-MAC(A(2) + seed) +
5             CBC-MAC(A(3) + seed) + ...
6 0) = seed
7 i) = CBC-MAC(A(i-1))
8
9 ster_secret = PRF(pre_master_secret, "master secret", ClientHello.random + ServerHello.random) ↔
   [0..47]; (105 | 153) = (36 | 84) + 13 + 28 + 28
```

```
10 finished      = PRF(master_secret, finished_label, Hash(handshake_messages))[0..verify_data_length-1]; ←↗
    79 = 48 + 15 + 16
11 finished_label = "client finished" | "server finished"
12 y_block       = PRF(master_secret, "key expansion", server_random + client_random); ←↗
    117 = 48 + 13 + 28 + 28
13
14 y_block       = client_write_MAC_key[0]
15               server_write_MAC_key[0]
16               client_write_key[16]
17               server_write_key[16]
18               client_write_IV[4]
19               server_write_IV[4]
```

Finished:

Hash mit CBC-MAC der während dem Handshake ausgetauschten Daten wie sie über die Leitung gingen (nicht entpackt, headerkompression bleibt)

wird mit den Sicherheitsparametern der neuen Epoche verschlüsselt. Sequenznummer implizit 0

20 Byte lang -> Verschlüsselte 12 Byte finished (12) + (CBC_MAC) (8)

Vergleich

6.1 Headercompression

lala soso

Test1

6.2 Ciphersuit

CBC-MAC anstatt HMAC mit SHA₂₅₆

lala soso

Test1

Praktische Umsetzung

es kann nur ein handshake zur zeit stattfinden
psk wird nur benötigt bis pre master secret berechnet
am ende des handshakes wird alter psk vernichtet und neuer generiert
kann durch uri /psk über sichere leitung abgerufen werden so dass weiterer handshake durchgeführt werden können

7.1 Server

gebrauch von er-coap-13 erwähnen
für hello verify cookie: cbc-mac-16(client-ip + clienthello)

7.1.1 flash-store

erwähnen dass aus gobi-projekt aber verbessert / erweitert / geändert

7.1.2 time

7.1.3 ecc

jens und jens-quellen erwähnen - ohne änderungen eingebunden

7.1.4 er-13-dtls

modifikationen in er-13-coap erwähnen

7.2 Client

7.3 Testumgebung

flashen zunächst generell an ttyUSB1

border-router per „make border“ an ttyUSB1

sniffer per „make listen2“ an ttyUSB3

„make listen“ würde direkt in wireshark pipen. funktioniert nicht

server nach initialem flash -> update per client über coap

Kapitel 8

Fazit

lala soso

Test1

Appendix

A.1 Abbildungsverzeichnis

3.1	Header des Record Layer Protokolls von TLS / DTLS	8
3.2	Header des Handshake Protokolls von TLS / DTLS	8
3.3	Nachrichtenaustausch während eines TLS / DTLS Handshakes	9
3.4	Header des Alert Protokolls von TLS / DTLS	10
4.1	Komprimierter Handshake-Header	11
4.2	Nachrichtenaustausch während eines TLS / DTLS Handshakes über CoAP	14
4.3	Komprimierter Content-Header	15
4.4	Nachrichtenaustausch während eines TLS / DTLS Handshakes über CoAP	15

A.2 Tabellenverzeichnis

A.3 Literatur

- [DRo8] T. Dierks und E. Rescorla. *The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.2*. RFC 5246 (Proposed Standard). Internet Engineering Task Force, Aug. 2008. URL: <http://tools.ietf.org/html/rfc5246>.
- [DWRHNF03] Hifn D. Whiting, Vigil Security R. Housley und MacFergus N. Ferguson. *Counter with CBC-MAC (CCM)*. RFC 3610 (Proposed Standard). Internet Engineering Task Force, Sep. 2003. URL: <http://tools.ietf.org/html/rfc3610>.

- [ERNM12] RTFM Inc. E. Rescorla und Google Inc. N. Modadugu. *Datagram Transport Layer Security Version 1.2*. RFC 6347 (Proposed Standard). Internet Engineering Task Force, Jan. 2012. URL: <http://tools.ietf.org/html/rfc6347>.
- [HTSKSK13] Nokia Siemens Networks H. Tschofenig, Philips Research S.S. Kumar und Philips Research S. Keoh. *A Hitchhiker's Guide to the (Datagram) Transport Layer Security Protocol for Smart Objects and Constrained Node Networks*. Internet-Draft. Internet Engineering Task Force, Juli 2013. URL: <http://tools.ietf.org/html/draft-tschofenig-lwig-tls-minimal-03>.
- [IAN13] Internet Assigned Numbers Authority (IANA). *Service Name and Transport Protocol Port Number Registry*. Aug. 2013. URL: <http://www.iana.org/assignments/service-names-port-numbers/service-names-port-numbers.xhtml>.
- [KHOB12] Universitaet Bremen TZI K. Hartke und Universitaet Bremen TZI O. Bergmann. *Datagram Transport Layer Security in Constrained Environments*. Internet-Draft. Internet Engineering Task Force, Juli 2012. URL: <http://tools.ietf.org/html/draft-hartke-core-codtls-02>.
- [McGo8] D. McGrew. *An Interface and Algorithms for Authenticated Encryption*. RFC 5116 (Proposed Standard). Internet Engineering Task Force, Jan. 2008. URL: <http://tools.ietf.org/html/rfc5116>.
- [MDB12] D. McGrew und RSA Security Division of EMC D. Bailey. *AES-CCM Cipher Suites for Transport Layer Security (TLS)*. RFC 6655 (Proposed Standard). Internet Engineering Task Force, Juli 2012. URL: <http://tools.ietf.org/html/rfc6655>.
- [PEHT05] Nokia P. Eronen und Siemens H. Tschofenig. *Pre-Shared Key Ciphersuites for Transport Layer Security (TLS)*. RFC 4279 (Proposed Standard). Internet Engineering Task Force, 2005. URL: <http://tools.ietf.org/html/rfc4279>.
- [Red13] LLC Redwire. *Econotag: mc13224v development board with on-board debugging*. Mai 2013. URL: <http://www.redwirellc.com/store/node/1>.
- [Sem13] Freescale Semiconductor. *MC1322x - Advanced ZigBee™ - Compliant Platform-in-Package (PiP) for the 2.4 GHz IEEE® 802.15.4 Standard*. Mai 2013. URL: http://www.freescale.com/files/rf_if/doc/data_sheet/MC1322x.pdf.
- [SKHCB13] Z. Shelby, Universitaet Bremen TZI K. Hartke und Universitaet Bremen TZI C. Bormann. *Constrained Application Protocol (CoAP)*. Internet-Draft. Internet Engineering Task Force, Nov. 2013. URL: <http://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-core-coap>.

A.4 Liste der Abkürzungen

6LoWPAN IPv6 over Low power Wireless Personal Area Network, S. 2, 11

ACK Acknowledgement, S. 13

AEAD Authenticated Encryption with Associated Data, S. 5

AES Advanced Encryption Standard, S. 5

CCM Counter with CBC-MAC, S. 5

CoAP Constrained Application Protocol, S. 1, 2, 5, 11–15

DoS Denial of Service, S. 9

DTLS Datagram Transport Layer Security, S. 1–3, 5–7, 10–13, 15

IETF Internet Engineering Task Force, S. 1

MAC Message Authentication Code, S. 5, 12

PSK Pre-Shared Key, S. 5, 8

RAM Random-Access Memory, S. 3

ROM Read-Only Memory, S. 3

TCP Transmission Control Protocol, S. 1, 7

TLS Transport Layer Security, S. 1–3, 7, 10, 12, 13, 15

UDP User Datagram Protocol, S. 1, 7, 12–14

URI Uniform Resource Identifier, S. 13

WoT Web of Things, S. 1

A.5 Glossar

Ciphersuit

Gruppe aus 4 Algorithmen, die für Schlüsselaustausch, Authentifizierung, Hash und Verschlüsselung verwendet werden

S. 2, 3, 5, 8, 12

Fragment

Beschreibt einen Teil eines Ganzen

S. 2

Fragmentierung

Beschreibt die Aufteilung eines Ganzen in kleinere Teile

S. 2

Handshake

Beschreibt die Aushandlung von Sicherheitsparametern um eine sichere Verbindung herzustellen

S. 2, 3, 7