

# Messenger über einen verborgenen Netzwerkkanal

## Bachelorarbeit

Wintersemester 2018/19

im Studiengang Angewandte Informatik

an der Hochschule Ravensburg - Weingarten

von

Maximilian Nestle Matr.-Nr.: 27427

Abgabedatum : 8. Januar 2019

---

# Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel

## Messenger über einen verborgenen Netzwerkkanal

selbständig angefertigt, nicht anderweitig zu Prüfungszwecken vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und wörtliche sowie sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Weingarten, 8. Januar 2019

Maximilian Nestle

---

# Inhaltsverzeichnis

|   |            |
|---|------------|
| <b>Kurzfassung</b>  | <b>III</b> |
| <b>Abstract</b>   | <b>IV</b>  |
| <b>Danksagung</b>   | <b>V</b>   |
| <b>Vorwort</b>  | <b>VI</b>  |
| <b>1 Einleitung</b>   | <b>1</b>   |
| 1.1 Motivation . . . . .  | 1          |
| 1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung . . . . .                    | 1          |
| <b>2 Grundlagen</b>   | <b>3</b>   |
| 2.1 Datenschutz . . . . .   | 3          |
| 2.2 Datensicherheit . . . . .                                     | 3          |
| 2.2.1 Vertraulichkeit . . . . .                                   | 4          |
| 2.2.2 Integrität . . . . .  | 4          |
| 2.2.3 Verfügbarkeit . . . . .                                     | 4          |
| 2.2.4 Authentizität . . . . .                                     | 4          |
| 2.3 Kryptographie . . . . .                                       | 5          |
| 2.4 Symmetrische Verschlüsselung . . . . .                        | 5          |
| 2.5 Asymmetrische Verschlüsselung . . . . .                       | 6          |
| 2.6 Steganographie . . . . .                                      | 6          |
| 2.7 Internet Protokolle . . . . .                                 | 8          |
| 2.7.1 Sicherungsschicht/Data Link Layer (Schicht 2) . . . . .     | 8          |
| 2.7.2 Vermittlungsschicht/Network Layer (Schicht 3) . . . . .     | 8          |
| 2.7.3 Transportschicht/ Transport Layer (Schicht 4) . . . . .     | 9          |
| 2.7.4 Kommunikationsschicht/Session Layer (Schicht 5) . . . . .   | 9          |
| <b>3 Was ist ein Covert-Channel?</b>                              | <b>11</b>  |
| 3.1 Definition . . . . .  | 11         |
| 3.2 Was zeichnend einen guten Covert-Channel aus? . . . . .       | 11         |
| 3.3 Wozu sind Covert-Channels nicht geeignet? . . . . .           | 12         |
| <b>4 Mögliche steganografische Covert-Channel</b>                 | <b>13</b>  |
| 4.1 Zeitabhängiger Covert-Chanel . . . . .                        | 13         |
| 4.2 Benutzung verschiedener Protokolle . . . . .                  | 13         |
| 4.3 Benutzung von unbenutzten Bits in Protokoll-Headern . . . . . | 13         |

---

|  |           |
|--|-----------|
| 4.4 Verwendung der Paketgröße . . . . .  | 13        |
| <b>5 Schlussbemerkungen und Ausblick</b> | <b>14</b> |
| <b>A Ein Kapitel des Anhangs</b>         | <b>15</b> |
| <b>Literatur</b>                         | <b>17</b> |
| <b>Stichwortverzeichnis</b>              | <b>17</b> |

# Kurzfassung

# Abstract

# Danksagung

# Vorwort



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

In der heutigen Zeit wird die Datensicherheit immer wichtiger, da immer mehr personenbezogene Daten im Internet preisgegeben werden. Um die Datenübertragung zu sichern wird meistens ein asymmetrisches Verschlüsselungsverfahren verwendet.

Dieses Verfahren bieten zwar ein hohes Maß an Sicherheit, hat aber auch Nachteile, wie zum Beispiel eine Erhöhung der Rechenzeit, die Verwaltung eines Key-Managers und die Bedrohung durch einen „Man-in-the-Middle“ Angriff.

Eine Mögliche Alternative wäre beispielsweise die Steganographie. Dies ist die Kunst, Daten in legitimierte Datenkanälen zu verstecken ohne eine Verschlüsselung anzuwenden.

Steganographie ist zudem sehr unauffällig, da in unverschlüsselten Daten meistens keine sensiblen Daten vermutet werden.

## 1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Ziel der Bachelorarbeit ist die Erstellung eines Messengers, bei dem zwei Personen Daten empfangen und verschicken können. Dabei soll die Kommunikation über ein Netzwerk stattfinden und steganografisch verschlüsselt werden.

Der Messenger soll hier als ein „Proof of Concept“ dienen und die Möglichkeiten der Steganografie veranschaulichen.

Die Daten sollen nicht mit einem mathematischen Verfahren verschlüsselt werden, sondern in ein oder mehreren Protokollen „versteckt“ eingebettet und übertragen werden. Dazu soll ein optimales Verfahren zur Dateninfiltration und -exfiltration gefunden werden. Als Verfahren können hier zum Beispiel Covert- Channels eingesetzt werden. Das Verfahren sollte unauffällig, für Dritte schwer zu interpretieren und mit größt möglicher Übertragungsrate senden. Optimal wäre eine ähnliche Sicherheit zu gewährleisten, wie mit einer mathematischen Verschlüsselung. Ziel ist es außerdem jedes Dateiformat übertragen zu können. Das resultierende Programm

soll in der Lage sein, gleichzeitig Server und Client zu sein, was bedeutet, dass mit dem gleichen Programm gesendet und empfangen werden kann.

Eine einfache GUI soll dem Benutzer das Senden und Empfangen der Daten so einfach wie möglich machen.

Wünschenswert wäre ein möglichst einfacher Verbindungsaufbau, der ohne den direkten Austausch der IP- Adressen statt findet.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Datenschutz

Der Datenschutz ist ein Überbegriff für das in Gesetzte festgelegten Recht, dass jede Person über die Preisgabe der personenbezogenen Daten bestimmen kann. Die Bundesbeauftragten für den Datenschutz und die Informationssicherheit (BfDI) definieren den Datenschutz wie folgt:

*„Datenschutz garantiert jedem Bürger Schutz vor missbräuchlicher Datenverarbeitung, das Recht auf informationelle Selbstbestimmung und den Schutz der Privatsphäre“ [Die18]*

Das bedeutet, dass jeder der personenbezogene Daten, ohne Zustimmung des Betroffenen speichert oder weiterverarbeitet vor Gericht angeklagt werden kann. Damit dies nicht passiert haben die meisten Institute die mit personenbezogenen Daten umgehen einen Datenschutzbeauftragten, der die Einhaltung dieser Gesetzte überwacht.

### 2.2 Datensicherheit

Im Gegensatz zu dem Datenschutz bezieht sich die Datensicherheit nicht nur auf die personenbezogenen Daten, sondern auf alle Daten. Die Aufgabe der Datensicherheit werden durch das CIA-Prinzip beschreiben.

Zur Datensicherheit gehören nach diesem Prinzip alle Maßnahmen, die die Confidentiality, Integrity und Availability (Vertraulichkeit, Integrität, Verfügbarkeit) gewährleisten. [Nic18] Eine zusätzliche Aufgabe ist die Sicherstellung der Authentizität. Viele dieser Aufgaben werden mit Hilfe der Kryptographie realisiert und umgesetzt.

### 2.2.1 Vertraulichkeit

Die Vertraulichkeit ist dann gewährleistet, wenn die Daten nicht von unbefugten Personen eingesehen werden können. Es muss also ein System verwendet werden, bei dem sich befugte Benutzer legitimieren können und unbefugte beim Interpretieren gehindert werden.

In den meisten Fällen wird dies durch eine Verschlüsselung (symmetrisch oder asymmetrisch) umgesetzt. Alle legitimierten Benutzer erhalten den Schlüssel. Die Personen ohne Schlüssel können die Informationen nicht entschlüsseln - die Vertraulichkeit ist so garantiert.

Optimal wäre, wenn nicht legitime Benutzer, auch nicht an die verschlüsselten Daten kommen würde.

### 2.2.2 Integrität

Die Integrität beschäftigt sich damit, dass Daten nicht unbemerkt verändert oder abgefälscht werden. So soll zum Beispiel sichergestellt werden, dass eine Nachricht genau so beim Empfänger ankommt, wie sie abgesendet wurde.

Hierzu können Hash-Funktionen verwendet werden, die beim Verändern der Nachricht einen anderen Wert ergeben würden. Dabei müsste entweder die Hash-Funktion geheim sein oder der Hash-Wert verschlüsselt werden.

### 2.2.3 Verfügbarkeit

Der Dritte Punkt ist die Verfügbarkeit. Es soll immer sichergestellt werden, dass Daten aber auch Programme immer abrufbar sind. Hierzu gehören Mechanismen zur Vermeidung von DoS (Denial of Service) Angriffen. Diese Angriffe würden beispielsweise einen Server so überfordern, dass dieser keine Dateien mehr ausliefern kann - die Verfügbarkeit ist dann nicht mehr gewährleistet.

### 2.2.4 Authentizität

Die Authentizität bestätigt, dass Daten von der angegebenen Informationsquelle stammen. Es ist ein Identitätsbeweis des Absenders gegenüber dem Empfänger.

Dies kann zum Beispiel mit einer Public-Key Verschlüsselung realisiert werden. So kann der Sender die Nachrichten mit seinem Public-Key verschlüsseln und jeder im Besitz des Public-Keys kann bestätigen, dass die Nachricht genau von dieser Person kommt.

## 2.3 Kryptographie

Kryptographie bedeutet „wörtlich: Die Lehre vom Geheimen schreiben“ [Hel18] und beschäftigt sich mit der mathematischen Verschlüsselung von Informationen. Dabei gibt es zwei große Verschlüsselungsarten - die Symmetrischen und die Asymmetrischen Verschlüsselungen. Bei beiden Verfahren wird durch einen Schlüssel (meistens eine Zahl) und einem Algorithmus aus einer lesbaren Information eine Unlesbare. Um dies wieder rückgängig zu machen wird ebenfalls ein Schlüssel und ein Algorithmus benötigt.

Eine der wichtigsten Grundprinzipien der Kryptographie wurde bereits im 19. Jahrhundert von A.Kerkhoffs aufgestellt. Eine der wichtigsten Aussagen hierbei ist, dass die Sicherheit einer Verschlüsselung nicht von dem Verschlüsselungsalgorithmus, sondern allein von dem Schlüssel abhängig sein soll. Das heißt, dass ein guter Verschlüsselungsalgorithmus öffentlich gemacht werden kann, ohne die Sicherheit zu gefährden. Ein Beispiel ist der RSA Algorithmus. Dies ist einer der heute verbreitetsten Algorithmen. Der Algorithmus ist für jeden öffentlich zugänglich, dies hat aber keine Auswirkung auf die Sicherheit, da die Sicherheit allein auf der Geheimhaltung des Passwortes basiert.

Dies hat zum Beispiel auch den Vorteil, dass bei einem Personalwechsel nicht der ganze Algorithmus ausgetauscht werden muss, sondern nur das Passwort.

## 2.4 Symmetrische Verschlüsselung

Bei der symmetrischen Verschlüsselung wird zum Verschlüsseln und Entschlüsseln der gleiche Schlüssel verwendet.

$$E_k(M) = C$$

$$D_k(C) = M$$

[Ert01]

Der Schlüssel  $K$  wird dazu verwendet die Nachricht zu verschlüsseln und Entschlüsseln. Das Problem bei symmetrischen Verschlüsselungen ist die Schlüsselübertragung, die auf jeden Fall geheim stattfinden muss. Bekannte Beispiele sind der DES und AES.

## 2.5 Asymmetrische Verschlüsselung

Bei einer asymmetrisch Verschlüsselung hat man zum verschlüsseln einen anderen Schlüssel wie zum entschlüsseln. Dieses System wird „Public-Key-Kryptographie“ genannt, da es einen öffentlichen (K1) und einen privaten Schlüssel (K2) gibt. Dabei wird der K1 zum Verschlüsseln verwendet und K2 zum Entschlüsseln.

$$E_{k1}(M) = C$$

$$D_{k2}(C) = M$$

[Ert01]

Dieses System löst das Problem der Schlüsselübergabe, da der öffentliche Schlüssel ohne Bedenke an den Kommunikationspartner übertragen werden kann. Bei einem Möglichen Angriff kann der Angreifer mit dem Schlüssel nichts anfangen, da er mit ihm nicht entschlüsseln kann. Nur der private Schlüssel, der geheim bleibt und nicht versendet wird, kann dann die Entschlüsselte Nachricht dechiffrieren.

Diese Art von Algorithmus kann so auch zur Authentifizierung eingesetzt werden. Bekannte Asymmetrische Verschlüsselungen sind der RSA-Algorithmus, der Algorithmus von Diffi und Hellmann oder Algorithmus von ElGamal.

## 2.6 Steganographie

Die Steganographie ist die Kunst vom verborgenem Schreiben. Je nachdem welche Literatur man verwendet wird die Steganographie als Unterpunkt der Kryptographie oder als einen eigene Disziplin gesehen. In dieser Arbeit wird die Steganographie eigenständig betrachtet und als alternative zur Kryptographie gesehen.

Beide, die Kryptographie und die Steganographie, sind Möglichkeiten Informationen geheim und von Dritten ungesehen zu übertragen. Wie bereits oben beschrieben beschäftigt sich die Kryptographie mit dem verschlüsseltem Schreiben. Die Steganographie hingegen benutzt keine Verschlüsselung, sondern versucht die geheime Information in einem unauffälligen oder legitimiertem Informationskanal zu verstecken.

Wie von Peter Purgathofer [Pur10] beschrieben hat die Steganographie eine große Bedeutung in der Geschichte, denn die Menschen waren gerade in Kriegszeiten schon immer auf der Suche nach einem sicher Weg Informationen zu übertragen.

So hat zum Beispiel der griechisch Spion Demaratos Wachstafeln dazu benutzt um Informationen zu verschicken. Nur hat er die nicht ins Wachs geschrieben sondern in das darunterliegende

Holz.

Ebenfalls soll Histiaeus, der Tyrann von Milet, seine geheimen Nachrichten auf die Schädel der Sklaven tätowiert haben. Die Haare wuchsen nach und die Nachricht war verborgen.

Es gibt noch viele andere Beispiele Anfängen von unsichtbarer Tinte bis hin zu Morsezeichen in Gemälden, aber vor allem Künstlern wurde oft vorgeworfen, mit Hilfe von Steganographie Geheime Nachrichten zu verbreiten. So wurde zum Beispiel Mozart immer wieder beschuldigt freibeuterische Nachrichten in der „Zauberflöte“ versteckt zu haben.

Die Beispiele der Geschichte zeigen deutlich wie die Steganographie funktioniert: Es gibt immer eine unauffällige Trägernachricht (Wachstafel, Sklave, Gemälde, Musikstück...).

In diese Trägernachricht wie die geheime Nachricht versteckt (Unter Wach oder Haaren, Blickwinkel auf das Gemälde, Notenreihenfolge...)

Um die Nachricht zu entschlüsseln benötigt der Empfänger nur die Information wo sich die Nachricht befindet beziehungsweise wie sie versteckt wird. Das Schema von Gary C. Kessler [Kes15] macht dieses Prinzip sehr anschaulich:

*Steganographisches Medium = Geheime Nachricht + Träger Nachricht + Steganografischer Schlüssel*

Dabei darf der Steganografische Schlüssel nicht mit dem aus der Kryptographie verwechselt werden. Es handelt sich hier mehr um das Wissen wo und wie die geheime Nachricht verborgen ist.

Dabei bedient sich die Steganographie der „Security by Obscurity“ (Sicherheit durch Unwissenheit), was bedeutet, dass die Sicherheit allein davon abhängt, ob das Geheimhaltungsverfahren unbekannt bleibt. Übrigens gehören kryptographische Verfahren die nicht unter Kerckhoffs Prinzip fallen auch zu „Security by Obscurity“. Will man also ein solches System sicherer machen muss man dafür sorgen, dass das Verfahren so abwegig beziehungsweise obskur gestalten wird sodass nie jemand auf die Idee kommt nach einer geheimen Nachricht zu suchen.

Die Steganographie hat in der Geschichte eine relativ einfache aber sichere Methode geboten Nachrichten zu übertragen. Aber auch heute mit dem Internet sind wir nahezu immer von Datenkanälen umgeben die sich für die steganographische Datenübertragung eignen. Der Vorteil hierbei ist, dass meistens unter den ganzen kryptographisch verschlüsselten Datenpaketen die Steganographie vergessen wird.

## 2.7 Internet Protokolle

Im den folgenden Kapiteln soll kurz das OSI-Schichtenmodell, auf welches das heutige Internet aufbaut, erklärt werden. Dabei repräsentiert jede Schicht eine Protokoll, das für die Kommunikation im Internet nötig ist.

Es werden nur die Protokolle betrachtet, die für dieses Projekt relevant sind.

### 2.7.1 Sicherungsschicht/Data Link Layer (Schicht 2)

Diese Schicht beinhaltet Protokolle, welche einen weitestgehend fehlerfreie Datenübertragung garantieren sollen. Außerdem wird der Zugriff auf das Übertragungsmedium ermöglicht. [Wik18]

#### Ethernet

Beim Ethernet-Protokoll werden die Daten in Pakete zerteilt. Diese können dann zwischen den Geräten im Netzwerk verschickt werden. Dabei ist das Ethernet-Protokoll immer nur im jeweiligen Netzwerksegment gültig. [Zis13] Die Adressierung wird mit Hilfe der MAC-Adressen realisiert. Diese Adresse ist einmalig und wird jedem netzwerkfähigem Gerät vom Hersteller zugeordnet.

| 7 Byte         | 1 Byte | 6 Byte                  | 6 Byte                    | 4 Byte   | 2 Byte | bis<br>1500 Byte | max.<br>42 Byte | 4 Byte |
|----------------|--------|-------------------------|---------------------------|----------|--------|------------------|-----------------|--------|
| Präam-<br>bel, | SFD    | MAC-<br>Adresse<br>Ziel | MAC-<br>Adresse<br>Quelle | VLAN-Tag | Typ    | Nutzdaten        | PAD             | FCS    |

Bild 2.1: Erweiterter Ethernet-Frame nach IEEE 802.1Q [Zis13]

### 2.7.2 Vermittlungsschicht/Network Layer (Schicht 3)

Die Protokolle dieser Schicht werden verwendet, um über Netzwerkgrenzen hinaus Nachrichten zu versenden. [Zis13] Dieses Protokoll liegt innerhalb der Nutzdaten des Ethernet-Pakets.



## IPv4

Zur Adressierung werden IPv4 Adressen verwendet, die 32 bit (4 Byte) lang sind. Vergeben werden die Adressen von der IANA (Internet Assigned Numbers Authority). Jeder der aus dem Internet erreichbar sein will, muss sich bei der IANA oder einer untergeordneten Organisation eine IP-Adresse oder Adressbereich geben lassen.

Das Internet Protokoll wird wie in folgender Abbildung gezeigt in das Ethernet Paket eingebettet.

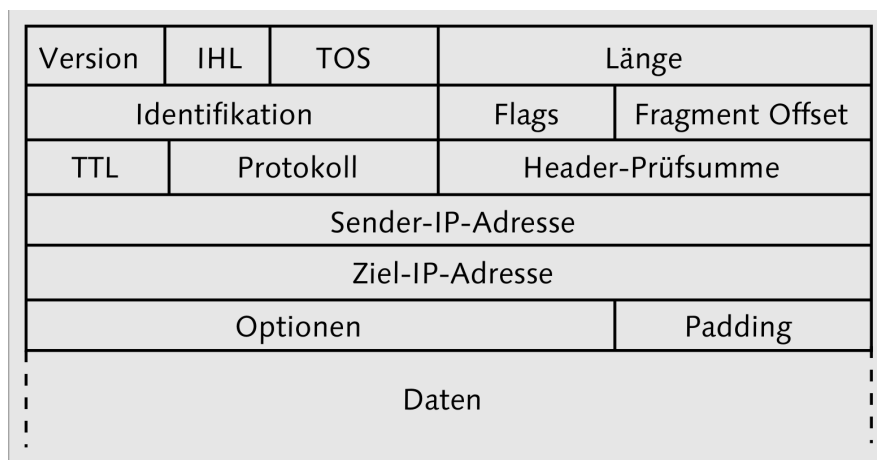


Bild 2.2: IPv4 Header [Zis13]

## IPv6

Da die IPv4 langsam knapp werden, wurde das IPv6 Protokoll erstellt, welches über Adressen mit 6 Byte Länge verfügt. Dies bedeutet, dass deutlich mehr Adressen erstellt und vergeben werden können. Die Funktion ist aber mehr oder weniger die gleiche.

Das IPv6 Internet Protokoll ist in folgender Abbildung gezeigt.

### 2.7.3 Transportschicht/ Transport Layer (Schicht 4)

### 2.7.4 Kommunikationsschicht/Session Layer (Schicht 5)

|                            |               |            |
|----------------------------|---------------|------------|
| Version                    | Traffic Class | Flow Label |
| Payload Length             | Next Header   | Hop Limit  |
| Absender-Adresse (128 Bit) |               |            |
| Ziel-Adresse (128 Bit)     |               |            |

Bild 2.3: IPv6 Header [Zis13]

## 3 Was ist ein Covert-Channel?

### 3.1 Definition

Covert-Channels sind Netzwerk Kanäle, die nicht offen praktiziert, erklärt, engagiert, angesammelt oder gezeigt werden. [Gol03]

Hierbei kann ein Kanal eine beliebige Methode sein Informationen zwischen zwei Geräten über ein Netzwerk auszutauschen. Bei Covert-Channels wird sich die größtmöglich Mühe gegeben, diesen Informationskanal vor Dritten unbemerkt zu halten.

Bei steganografischen Covert-Channels werden Methoden aus der Steganografie verwendet um diesen Kanal zu verbergen.

In dieser Arbeit handelt es sich bei Covert-Channel immer um Kanäle, die mit einem steganografischem Verfahren verschlüsselt werden.

### 3.2 Was zeichnend einen guten Covert-Channel aus?

Bei den weit verbreiteten mathematischen Verschlüsselungen muss sich meistens keine Sorgen gemacht werden, ob der Datenaustausch von Dritten entdeckt werden kann, da hier die Daten ohne richtigen Key nutzlos sind.

Bei den Covert-Channels ist dies problematischer, da ein entdeckter Kanal in der Regel direkt interpretiert werden kann. Ein Covert-Channel lebt, wie der Name auch schon verrät, davon wie gut dieser versteckt ist.

Dabei besitzt die Steganografie einen großen Vorteil: Ist das Verfahren zum Verstecken der Daten nicht bekannt, so ist es nahezu unmöglich den Covert-Channel zu finden, da nicht klar ist wo und nach was gesucht werden muss (Security by Obscurity).

Ist hingegen klar, um welches Verfahren es sich handelt und besteht die Vermutung, dass eine Kommunikation über einen versteckten Kanal stattfindet so kommt man leicht an die Informationen.

Um einen Covert-Channel zu Bewerten müssen folgende Aspekte betrachtet werden:

Der erste ist die Fähigkeit, wie einfach sich ein Kanal verstecken lässt. Hier fließt zum Einen die Allgemeine Unauffälligkeit des Covert-Channels ein. Aber auch die Eigenschaften des bereits herrschenden Netzwerkverkehrs, in den der Channel eingebettet werden soll.

Der zweite Aspekt ist die allgemeine Unbekanntheit des Verfahrens, sodass nicht nach einem möglichen versteckten Kanal gesucht werden kann. Hier kann eine Methode zur individuellen Gestaltung des Channels eine Verbesserung bringen.

Natürlich muss auch die Datenübertragungsrate betrachtet. Diese ist meistens sehr gering aber hier gibt es auch große Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren.

Die Daten sollten

### **3.3 Wozu sind Covert-Channels nicht geeignet?**

Hohe Datenübertragung

## **4 Mögliche steganografische Covert-Channel**

### **4.1 Zeitabhängiger Covert-Chanel**

### **4.2 Benutzung verschiedener Protokolle**

### **4.3 Benutzung von unbenutzten Bits in Protokoll-Headern**

### **4.4 Verwendung der Paketgröße**

## **5 Schlussbemerkungen und Ausblick**

## **A Ein Kapitel des Anhangs**





# Literatur

- [Die18] DIE BUNDESBEAUFTRAGTEN FÜR DEN DATENSCHUTZ UND DIE INFORMATIONSSICHERHEIT (BFDI): *Was ist Datenschutz?* <https://www.bfdi.bund.de/DE/Datenschutz/Ueberblick/ueberblick-node.html>, 2018. Abrufdatum: 16.10.2018.
- [Ert01] ERTEL, WOLFGANG: *Angewandte Kryptographie*. Fachbuchverlag Leipzig. Carl Hanser Verlag), ISBN, 2001.
- [Gol03] GOLTZ, JAMES P.: *Under the radar: A look at three covert communications channels*. 2003.
- [Hel18] HELLMANN, ROLAND: *IT-Sicherheit: eine Einführung*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2018.
- [Kes15] KESSLER, GARY C.: *An Overview of Steganography for the Computer Forensics Examiner (Updated Version, February 2015)*, 2015.
- [Nic18] NICO GRUNDMEIER: *Sicherheitslücken im Internet*. <http://www.informatik.uni-oldenburg.de/~iug10/sli/indexd917.html?q=node/19>, 2018. Abrufdatum: 16.10.2018.
- [Pur10] PURGATHOFER, PETER: *Eine kurze Geschichte der Steganographie*. Die Funktion verdeckter Kommunikation: Impulse für eine Technikfolgenabschätzung zur Steganographie, 9:65, 2010.
- [Wik18] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS: *OSI-Modell* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. <https://de.wikipedia.org/wiki/OSI-Modell>, 2018. Abrufdatum: 03.01.2019.
- [Zis13] ZISLER, HARALD: *Computer-Netzwerke*, 2013.