

Dezentralisierte asymmetrische Verschlüsselung über Tor

Die Lösung für sicheres Messaging?

Hendrik Lind

Facharbeit

Windthorst-Gymnasium Meppen

Seminarfach Informatik

13. Februar 2024

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Asymmetrische Verschlüsselung	2
2.1	Grundlagen	2
2.2	Mathematische Betrachtung	3
2.2.1	Eulersche Phi-Funktion	3
2.2.2	Generierung des Schlüsselpaars	3
2.3	Sicherheit	4
2.4	Vergleich zur symmetrischen Verschlüsselung	5
3	Das Tor-Netzwerk	5
3.1	Onion Services	6
3.1.1	Verbindungsaufbau	7
3.2	Sicherheit	8
4	Dezentralisierung	9
4.1	Sicherheit	9
5	Umsetzung des Messengers	9
5.1	Peer-to-Peer-Verbindung	10
5.2	Tor-Netzwerk	12
5.3	Nachrichtenaustausch	13
5.3.1	Server-Side-Identity verification	14
6	Verbesserungsmöglichkeiten	16
7	Fazit	16

1 Einleitung

Russland, China, Iran. In all diesen totalitären Staaten herrscht eine starke Zensur [vgl. Am23]. Rund 1,7 Milliarden Menschen sind allein nur in diesen drei Staaten von der Einschränkung der Meinungsfreiheit betroffen [vgl. Un22]. Wie können Bürger dieser Staaten ihre Meinung also verbreiten und andere Staaten auf staatskritische Probleme aufmerksam machen, ohne sich selber in Gefahr zu bringen?

Bei herkömmlichen Messengern, wie WhatsApp, Signal und Co., braucht die Außenwelt die Telefonnummern der im totalitären Staat wohnenden Bürgern und Reportern, um diese zu kontaktieren. Allerdings könnte ein totalitärer Staat, sich als Empfänger ausgeben, sodass Bürger/Reporter ihre private Nummer an den Staat überreichen und dieser somit jene Nummer rückverfolgen kann [vgl. Fä23]. Und genau hier liegt das Problem: Bürger und Reporter können nicht durch alltägliche Messenger mit der Außenwelt kommunizieren, da der Staat deren Nummer zurückverfolgen kann und somit weiter die Meinungsfreiheit einschränkt und unterbindet [vgl. ebd.].

Durch die zentrale Infrastruktur, welche die meisten Messenger, wie zum Beispiel WhatsApp und Signal verwenden, ist es für totalitäre Staaten, wie China, möglich, die IP-Adressen jener Server zu blockieren und somit für Bürger und Reporter unzugänglich zu machen [vgl. Wu+23; Bh23].

Ein dezentralisierter Messenger, welcher Ende-zu-Ende verschlüsselt ist und über das Tor-Netzwerk kommuniziert, könnte bei diesen Problemen eine Lösung sein. Die Frage, ob ein solcher Messenger die Lösung für Bürger eines totalitären Staates ist, soll in dieser Arbeit geklärt werden.

Um diese Frage beantworten zu können, beschäftigt sich diese Arbeit in dem zweiten Kapitel mit der asymmetrischen Verschlüsselung, welche benötigt wird um die Ende-zu-Ende-Verschlüsselung (E2EE) umzusetzen und die Definition der E2EE, sowie der Sicherheitsbetrachtung der asymmetrischen Verschlüsselung [vgl. LB21]. Die Arbeit geht dabei nicht auf weitere Padding-Verfahren ein. Eine mögliche Lösung, um eine Anonymität über das Internet zu gewährleisten wird in Kapitel drei vorgeschlagen, wobei das Tor-Netzwerk eine wichtige Rolle spielt. Diese Arbeit befasst sich im vierten Kapitel mit einer Dezentralisierung der Infrastruktur, um eine weitere Sicherheitsebene zu schaffen. Zuletzt werden im fünften Kapitel die Vor-

und Nachteile eines solchen Messengers betrachtet, im sechsten Kapitel wird eine mögliche Umsetzung des Messengers beschrieben und im siebten Kapitel wird ein

35 Fazit gezogen.

2 Asymmetrische Verschlüsselung

Um einen sicheren Nachrichtenaustausch zu gewährleisten, wird in dieser Arbeit die E2EE implementiert. Bei der E2EE wird von dem Sender die Nachricht, bevor sie an den Empfänger geschickt wird, verschlüsselt [vgl. Gr14]. Dazwischenliegen-

40 de Akteure, wie zum Beispiel Server oder mögliche Angreifer, können demzufolge die Nachricht nicht lesen [vgl. ebd.]. **Nur** der Empfänger der Nachricht kann diese auch entschlüsseln. Als Ent- und Verschlüsselungsverfahren der Nachrichten wird die asymmetrische Verschlüsselung verwendet [vgl. ebd.]. Diese Arbeit beschränkt sich bei der asymmetrischen Verschlüsselung auf das RSA-Verfahren.

45 2.1 Grundlagen

Grundsätzlich gibt es bei der asymmetrischen Verschlüsselung ein Schlüsselpaar (Keypair), welches aus einem privaten Schlüssel (private key) und einem öffentlichen Schlüssel (public key) besteht [vgl. BSW15b]. Diese beiden Schlüssel hängen mathematisch zusammen, sodass der öffentliche Schlüssel Nachrichten **nur** ver-

50 schlüsseln aber nicht entschlüsseln kann [vgl. ebd.]. **Nur** der zum Schlüsselpaar dazugehörige private Schlüssel ist in der Lage, die verschlüsselte Nachricht wieder zu entschlüsseln (siehe Abb. 1) [vgl. ebd.].

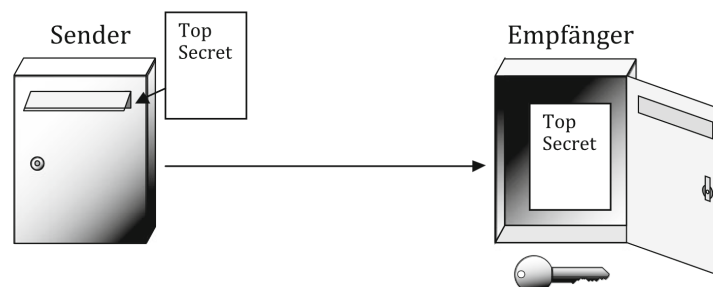


Abbildung 1: Jeder Sender kann mit dem öffentlichen Schlüssel die Nachricht „verschlüsseln“ (also eine Nachricht in den Briefkasten werfen), aber nur der Empfänger kann den Briefkasten mit seinem privaten Schlüssel öffnen und somit die Nachricht herausnehmen[vgl. BSW15a]

2.2 Mathematische Betrachtung

Alle Variablen der folgenden Berechnungen liegen im Bereich \mathbb{N} [vgl. Is16].

55 Für die Generierung des Schlüsselpaares benötigen wir zuerst zwei große zufällige Primzahlen, P und Q [vgl. ebd.]. Daraus ergibt sich $n = P \cdot Q$, wobei $P \neq Q$, sodass P bzw. Q nicht durch \sqrt{n} ermittelt werden kann [vgl. ebd.]. Der private Schlüssel besteht aus den Komponenten $\{n, d\}$ währenddessen der öffentliche Schlüssel aus $\{n, e\}$ besteht [vgl. Wa+13].

60 2.2.1 Eulersche Phi-Funktion

Die Eulersche Phi-Funktion spielt eine wichtige Rolle in dem RSA-Verfahren [vgl. Tu08]. Grundsätzlich gibt $\phi(x)$ an, wie viele positive teilerfremde Zahlen bis x existieren (bei wie vielen Zahlen der größte gemeinsame Teiler (gcd) 1 ist) [vgl. Ta13]. Somit ergibt $\phi(6) = 2$ oder bei einer Primzahl $\phi(7) = 7 - 1 = 6$ somit $\phi(x) = x - 1$,
65 wenn x eine Primzahl ist, da jede Zahl kleiner als x teilerfremd sein muss [vgl. Tu08].

$$\phi(n) = \phi(P \cdot Q)$$

$$\phi(n) = \phi(P) \cdot \phi(Q)$$

$$\phi(P) = P - 1 \qquad \phi(Q) = Q - 1$$

$$\phi(n) = (P - 1) \cdot (Q - 1)$$

2.2.2 Generierung des Schlüsselpaares

Sowohl der private als auch der öffentliche Schlüssel besteht unter anderem aus folgender Komponente: $n = P \cdot Q$ [vgl. Ta96]. Für den öffentlichen Schlüssel benötigen wir die Komponente e , die zur Verschlüsselung einer Nachricht verwendet
70 wird [vgl. ebd.]. e ist hierbei eine zufällige Zahl, bei welcher folgende Bedingungen gelten [vgl. ebd.]:

$$e = \begin{cases} 1 < e < \phi(n) \\ \text{gcd}(e, \phi(n)) = 1 \\ e \text{ kein Teiler von } \phi(n) \end{cases}$$

Mit der errechneten Komponente e , welche Nachrichten verschlüsselt, kann der öffentliche Schlüssel nun an den Sender übermittelt werden.

Um den privaten Schlüssel zu berechnen, benötigen wir die Komponente d , wel-

75 che zur Entschlüsselung verwendet wird [vgl. MS13].

$$\phi(n) = (P - 1)(Q - 1)$$

$$e \cdot d = 1 \mod \phi(n)$$

2.3 Sicherheit

Um die Sicherheit des RSA-Verfahrens betrachten zu können, müssen wir nun den Ver-/Entschlüsselungsvorgang betrachten.

$$c = m^e \mod n \quad \text{Verschlüsselung zu } c \text{ mit } m \text{ als Nachricht}$$

$$m = c^d \mod n \quad \text{Umkehroperation (Entschlüsselung) von } c \text{ zu } m$$

Um die verschlüsselte Nachricht c zu entschlüsseln, bräuchte ein Angreifer die Komponente des privaten Schlüssels d . d ist allerdings mit einem starken Rechenaufwand verbunden, da, wie schon vorher bereits gezeigt, dafür $\phi(n)$ kalkuliert werden müsste. Somit wird eine Primfaktorzerlegung von n benötigt wird [vgl. Ta13]. Bei der Verschlüsselung von m zu c liegt eine Trapdoor-Einwegfunktion vor [vgl. Kr16a]. Das bedeutet, dass es zwar leicht ist $f(x) = i$ zu berechnen (bei RSA: Verschlüsselung), es jedoch unmöglich ist von i auf den Ursprungswert x zu schließen, ohne dass weitere dafür notwendigen Komponente bekannt sind (bei RSA wäre die benötigte Komponente d) [vgl. ebd.].

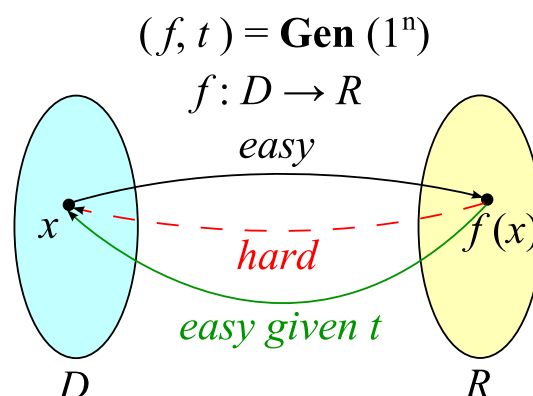


Abbildung 2: Die Trapdoor-Einwegfunktion bildlich dargestellt[vgl. Kr16b]

Wichtig bei dem RSA-Verfahren ist, dass die Länge von n (die Schlüssellänge) mindestens 3000 Bit betragen sollte, da sonst die Primfaktorzerlegung von n mit modernen Computern möglich sein könnte [vgl. Si23].

90

2.4 Vergleich zur symmetrischen Verschlüsselung

Bei der symmetrischen Verschlüsselung wird der gleiche Schlüssel sowohl für die Verschlüsselung als auch für die Entschlüsselung verwendet [vgl. IBM21]. Im Vergleich zu der asymmetrischen Verschlüsselung, ist die symmetrische Verschlüsselung schneller und keine Beschränkung des Chiffretextes [vgl. HK20; Op24]. Jedoch muss der Schlüssel der symmetrischen Verschlüsselung sicher an den jeweils anderen Kommunikationspartner übermittelt werden, um Nachrichten zu entschlüsseln [vgl. ebd.].

3 Das Tor-Netzwerk

Die Anonymität des Messengers ist ein weiterer zentraler Aspekt, um die jeweiligen Kommunikationspartner zu schützen. Das Tor-Netzwerk ist hierbei ein möglicher Lösungsansatz, da normalen Routing, wie wir es tagtäglich nutzen, der Client kommuniziert direkt mit dem Zielserver, somit der Zielserver die IP-Adresse des Clients einsehen kann [vgl. El16]. Eine Rückverfolgung der IP-Adresse ist somit möglich [vgl. Fä23]. Und genau bei diesem Problem setzt das Tor-Netzwerk an. Das Tor-Netzwerk besteht hierbei aus vielen *Nodes*, welche eingehende Tor-Verbindungen akzeptieren und weiterverarbeiten. Damit ein Client eine Anfrage über das Netzwerk verschicken kann, sucht er zunächst einen Pfad durch das Netzwerk, genannt *Circuit* [vgl. To24d]. Der *Circuit* besteht dabei meist aus drei *Nodes* und ist für 10 Minuten gültig, bis der Client das *Circuit* erneuert (also einen neuen Pfad „sucht“) [vgl. To24c]. Die drei *Nodes* werden klassifiziert in einer *Entry Node*, einer *Relay Node* und einer *Exit Node*, worüber später Anfragen an die Zielserver geschickt werden können [vgl. ebd.]. Dabei verschlüsselt der Client verschlüsselt die eigentliche Anfrage mehrmals, hüllt sie also in ein mehrere „Schalen“ ein, welche eine *Onion* bilden, und leitet diese über den *Circuit* an den Zielserver weiter [vgl. DMS04]. Anfangs wird die *Onion* von dem Tor-Client an die *Entry Node* geschickt [vgl. ebd.]. Bei jeder *Node*, wie der *Entry Node*, wird eine Schale der *Onion* „geschält“ (die *Onion* also einmal entschlüsselt), welche Informationen zu dem nächsten Knotenpunkt enthält [vgl. Au18]. Die Node leitet nun die um eine Schale „geschälte“ *Onion* an den nächsten Knotenpunkt weiter [vgl. ebd.]. Sobald die Anfrage bei der *Exit Node* angekommen ist, entfernt diese die letzte „Schale“ der Anfrage, welche nun

über Tor – Die Lösung für sicheres Messaging?

vollständig entschlüsselt ist und an den Zielservers geschickt werden kann [vgl. ebd.].

Dieses Routing-Verfahren ist auch als *Onion-Routing* bekannt [vgl. DMS04].

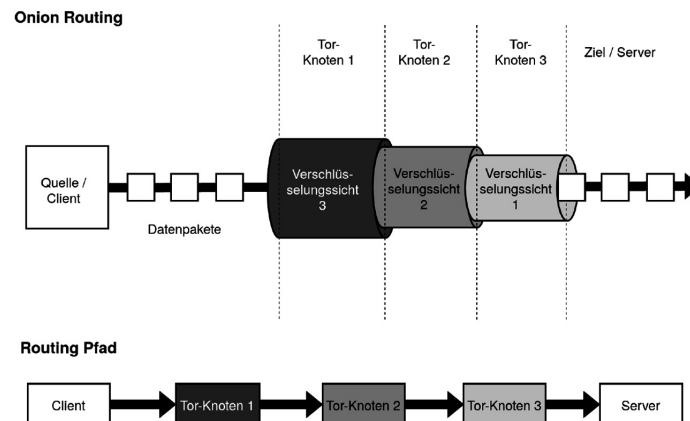


Abbildung 3: Das Prinzip des Onion-Routings [vgl. Wi+22a]

Nur die *Entry Node* weiß somit die reale IP-Adresse des Clients und **nur** die *Exit Node* weiß, an welchen Zielservers die Anfrage geschickt wurde [vgl. Au18]. Dazwischenliegende *Nodes*, wie die *Relay Node* erkennen nur eine verschlüsselte Anfrage und haben keinerlei Informationen über den eigentlichen Client oder den Zielservers. Die *Exit Node* schickt allerdings die Anfrage ohne Verschlüsselung des Tor-Netzwerkes an den Zielservers, wodurch Informationen der Nutzer ausgelesen werden könnten (wenn die Anfrage nicht über das HTTPS-Protokoll versendet wurde) und zusätzlich die IP-Adresse des Zielservers speichern [vgl. Ch+11]. Durch Etablieren von *Exit Nodes* in dem Tor-Netzwerk könnten Angreifer somit die Anonymität des Netzwerkes bzw. der Nutzer gefährden [vgl. ebd.].

3.1 Onion Services

Onion Services sind eine mögliche Lösung für den *Exit Node*-Angriff [vgl. To24g]. Diese nicht auf die *Exit Node* angewiesen sind und agieren nur innerhalb des Tor-Netzwerkes mit anderen Tor-Clients und verhalten sich wie normale Tor-Clients [vgl. ebd.]. Onion Services sind nicht über das normale Internet erreichbar, wie die Zielservers im vorherigen Beispiel, sondern nur über das Tor-Netzwerk [vgl. To24f]. Bei Onion Services müssen im Vergleich zu normalen öffentlichen Servern keine Ports geöffnet werden, damit ein Client sich mit dem Server verbinden kann, da der Onion Service direkt mit dem Tor-Netzwerk über ausgehende Verbindungen kommuniziert (auch bekannt als *NAT punching*) und darüber sämtliche Daten geleitet werden

über Tor – Die Lösung für sicheres Messaging?

[vgl. ebd.].

145 3.1.1 Verbindungsaufbau

Zunächst generiert der Onion Service ein Schlüsselpaar, bestehend aus einem öffentlichen und einem privaten Schlüssel [vgl. Ge23b]. Unter anderem wird nun aus dem öffentlichen Schlüssel die Adresse des Onion Services generiert und endet mit „.onion“ [vgl. ebd.]. Ein Beispiel für eine solche Adresse ist die der Suchmaschine

150 DuckDuckGo:

duckduckgogg42xjoc72x3sjasowoarfbgcmvfimaftt6twagswzczad.onion [vgl. Du24].

Der Onion Service sich nun mit dem Tor-Netzwerk wie ein normaler Client über einen *Circuit*, welcher aus drei *Nodes* besteht [vgl. To24f]. Der Service sendet eine Anfrage an das letzte Relay im *Circuit*, sodass es als *Introduction Point* dient

155 und etabliert eine Langzeitverbindung jenem (der *Circuit* erneuert sich also nicht alle 10 Minuten wie bei dem Tor-Client) [vgl. ebd.]. Dieser Vorgang wiederholt sich zweimal, bis der Onion Service drei *Introduction Points* auf drei verschiedenen *Circuits* gefunden hat [vgl. ebd.]. Damit andere Clients den Onion Service erreichen

können, erstellt der Onion Service einen *Onion Service descriptor*, welcher die Adressen der *Introduction Points* und Authentifizierungsschlüssel enthält, signiert diesen mit seinem privaten Schlüssel und schickt den *Descriptor* an die Directory Authority [vgl. To24a; To24e]. Die Directory Authority ist ein Server, welcher Informationen über das Tor-Netzwerk, wie zum Beispiel die des Onion Services, speichert und verteilt [vgl. To24b]. Im Sinne dieser Arbeit, hat der Onion Service sich nun von Per-

165 son A mit dem Tor-Netzwerk verbunden, jedoch braucht es noch Person B, welche sich über ihren Tor-Client mit dem Onion Service der Person B verbindet. Damit der Tor-Client von Person A sich allerdings verbinden kann, fragt der Client nun die Directory Authority an den signierten *Descriptor* des Onion Services von Person B an den Client zu schicken [vgl. K 23]. Der Client besitzt nun die Adressen der *Intro-*

170 *duction Points* und die Signatur des *Descriptors*, sodass dieser mit dem öffentlichen Schlüssel der Onion Adresse die Signatur überprüfen kann [vgl. ebd.]. Der Client generiert nun 20 zufällige Bytes (Secret) und schickt diese an eine zufällig ausgewählte *Relay Node*, welche nun als *Rendezvous Point* dient [vgl. To23b]. Das Secret wird von dem Client auch an eine von den *Introduction Points* geschickt, sodass

175 der Onion Service mit dem gleichen Secret eine Verbindung zu dem *Rendezvous*

über Tor – Die Lösung für sicheres Messaging?

Point aufbauen kann [vgl. To23a]. Der *Rendezvous Point* leitet, wenn der Client und der Onion Service über deren *Circuits* miteinander verbunden sind, die Nachrichten zwischen den beiden weiter [vgl. To23b]. Der Client und der Onion Service kommunizieren nun also nur über das Tor-Netzwerk miteinander und sind nicht mehr auf die *Exit Node* angewiesen.

3.2 Sicherheit

In der Sicherheitsbetrachtung beziehe ich mich ausschließlich auf die Verbindung zwischen Onion Services und Tor-Clients (also nicht zwischen Tor-Client und *Exit Node*).

Das Tor-Netzwerk in Verbindung mit den Onion Services liefert, wie bereits erläutert, durch *Circuits* und *Rendezvous Point* eine hohe Anonymität. Im Gegenzug sorgt die hohe Anonymität, welche durch die vielen *Nodes* und durch mehrfache Verschlüsselungen erreicht wird, auch dazu, dass das Tor-Netzwerk um das 120-fache langsamer ist im Vergleich zum normalen Routing [vgl. LSS10]. Das Tor-Netzwerk ist praktisch unmöglich in der Praxis zu blockieren, da über 6.500 verschiedene *Nodes* existieren und es somit keinen zentralen Hauptserver gibt, von welchem das Tor-Netzwerk abhängig ist ¹ [vgl. Wi+22b]. Theoretisch ist eine Deanonymisierung eines Onion Services möglich, wenn der ISP (Internet Service Provider, also z.B. Telekom, EWE, etc.) eingehende und ausgehende Verbindungen zwischen Client und Onion Service bzw. zu deren *Relay Node* aufzeichnet und diese mithilfe von Machine Learning analysiert [vgl. Lo+24]. Dabei war die Umsetzung der theoretischen Grundlage bis jetzt mit idealisierten Bedingungen erfolgreich, jedoch braucht es noch weiterer Studien, um die möglichen Gefahren dieses Algorithmus einzustufen [vgl. ebd.]. Dabei könnten, wenn die deutsche, amerikanische und die französische Regierung zusammenarbeiten, 78,34 % der *Circuits* deanonymisieren [vgl. ebd.]. Dieses Szenario erscheint jedoch unrealistisch, da Bürger in Deutschland, in den USA und in Frankreich ein Recht auf Meinungsfreiheit besitzen und höchstwahrscheinlich keine Deanonymisierungsangriff starten, um die Privatsphäre zum Beispiel von Whistleblowern zu schützen [vgl. Am23; Re24].

¹Es ist zwar möglich die IP-Adressen jeglicher *Relay Nodes* zu blockieren, jedoch ist dies durch Pluggable Transports umgänglich [vgl. Pa+16]

205 4 Dezentralisierung

Mit den vorgeschlagenen Konzepten ist der Messenger imstande anonym (durch das Tor-Netzwerk und Onion Services) und sicher (durch asymmetrische Verschlüsselung) zu kommunizieren, jedoch wurde die Infrastruktur des Messengers noch nicht behandelt. Dafür ist die Betrachtung und Abwägung eines zentralen bzw. dezentralen Netzwerkes notwendig.

Ein zentrales Netzwerk, zum Beispiel das Netzwerk von WhatsApp oder Signal, besteht aus einem Hauptserver, welcher Daten verarbeitet und mit welchem sich Clients verbinden können [vgl. La22; Si16; Ge21]. Der Client muss bei dieser Netzwerkstruktur dem Hauptserver „vertrauen“ und kann nicht überprüfen, ob der Server von einem Hacker kompromittiert wurde [vgl. Se19]. Dezentrale Netzwerke bestehen hingegen aus mehreren Servern, auf welche Rechenoperationen und oder Daten aufgeteilt werden [vgl. Li23].

4.1 Sicherheit

Im Beispiel eines Messengers bietet ein zentrales Netzwerk den Hauptserver als mögliche Angriffsfläche an, sodass diese entweder durch DDoS-Angriffe außer Betrieb gesetzt werden kann oder durch Kompromittierung des Servers sowohl der Empfänger als auch der Sender der Nachrichten ausgelesen werden kann (in Form von Onion-Adressen)[vgl. Bu24]. Ein dezentrales Netzwerk mit einer Peer-to-Peer-Architektur² hat hingegen eine größere Angriffsfläche, wodurch mehrere Knotenpunkte des Netzwerkes kompromittiert werden müssen, um das Netzwerk ausschalten zu können [vgl. Ge23a]. Am Beispiel des Messengers, sollten nur Gesprächsteilnehmer Teil des Netzwerkes sein, um zu verhindern, dass ein Angreifer durch simples Beitreten des Netzwerkes die Onion-Adressen der Gesprächsteilnehmer auslesen kann.

230 5 Umsetzung des Messengers

Für die Umsetzung des Messengers habe ich mich für die Programmiersprache Rust entschieden, da Rust Memory Safe ist und zusätzlich eine hohe Performance bietet [vgl. Ma23]. Ein weiterer Vorteil der Programmiersprache Rust ist, dass sie in eine

²Peer-to-Peer bedeutet, dass jeder Knotenpunkt im Netzwerk sowohl Client als auch Server sein kann, welche bidirektional kommunizieren [vgl. HD05]

über Tor – Die Lösung für sicheres Messaging?

ausführbare Datei kompiliert werden kann, sodass keine weiteren Binaries, wie zum
235 Beispiel bei Python, benötigt werden [vgl. Ru24]. Zudem benutze ich das Frame-
work Tauri, welches mir ermöglicht eine Benutzeroberfläche für den Messenger zu
erstellen [vgl. Ta24]. Tauri verbindet hierbei die Weboberfläche eines Browsers mit
einem Rust-Backend, wobei Weboberfläche und das Backend miteinander kommu-
nizieren können [vgl. ebd.]. Als Frontend des Messenger verwende ich React. Auf
240 den Quellcode des Frontends werde ich nicht eingehen, da es nur für die Benut-
zeroberfläche zuständig ist, somit zum Beispiel keine Verschlüsselung / Verbindung
zum Tor-Netzwerk etc. stattfindet.

Das Backend habe ich in 7 Bibliotheken aufgeteilt: *encryption* für die Verschlüsse-
lung der Nachrichten, *messaging* für die Kommunikation zwischen Knotenpunk-
245 ten, *payloads* für die verschiedenen Netzwerkpakete, welche zwischen Knoten-
punkten verschickt werden, *secure – storage* als eine generelle Bibliothek mit
Generics, sodass beliebiges Struct symmetrisch verschlüsselt / gespeichert werden
kann, *storage – internal* welches die Implementierung der *secure – storage* Bi-
bliothek enthält, *shared* für gemeinsame Funktionen und Konstanten, *tor – proxy*
250 für die Verbindung zum Tor-Netzwerk.

Da die Messenger mit einer Peer-to-Peer-Verbindung miteinander verbunden
sind, muss jeder Messenger in der Lage sein sowohl als Client als auch als Server
(in Form eines Onion Services) zu agieren.

5.1 Peer-to-Peer-Verbindung

255 Somit startet jeder Messenger einen HTTP-Server, welcher einen HTTP-Endpunkt
anbietet (in diesem Messenger `/ws/`), um eine WebSocket³-Verbindung aufzubau-
en. Der Server ist hierbei also in der Lage sowohl Packets zu empfangen als auch zu
senden.

```
HttpServer::new(|| {  
    return App::new()  
        // Return the default message to tell other clients that this server is a  
        .service(hello)  
        // The websocket endpoint  
        .route("/ws/", web::get().to(ws_index));
```

³Ein Protokoll für bidirektionale Kommunikation zwischen Server und Client über HTTP [vgl. Mi23]

```
})  
  
// Bind just to localhost and run  
.bind(("127.0.0.1", CONFIG.service_port()))?  
.run()  
.await?;
```

260 Analog dazu besitzt jeder Messenger auch einen Websocket-Client, welcher sich mit den anderen Messengern verbinden kann, sodass eine Peer-to-Peer-Verbindung entsteht. Der Client verbindet sich hierbei mit den anderen Messengern folgendermaßen:

```
/// `onion_hostname` is the onion address of the other messenger to connect to  
pub async fn new(onion_hostname: &str) -> Result<Self> {  
    // [...]  
    let connect_host = onion_hostname.to_string();  
  
    // [...]  
  
    // The address which is used to connect to the websocket  
    let onion_addr = format!("ws://{}.onion/ws/", connect_host);  
  
    debug!("[CLIENT] Creating proxy...");  
  
    // Creating the Socks5Proxy client which is used to connect to the tor network  
    let proxy = SocksProxy::new()?;  
    debug!("[CLIENT] Connecting Proxy...");  
    let mut onion_addr = Url::parse(&onion_addr)?;  
    onion_addr  
        .set_scheme("ws")  
        .or(Err(anyhow!("[CLIENT] Could not set scheme")))?;  
  
    // Connecting to the destination host using the proxy  
    let sock = proxy.connect(&onion_addr).await?;
```

über Tor – Die Lösung für sicheres Messaging?

```

    // [...]
    // Connecting to the websocket with the client
    let (ws_stream, _) = tokio_tungstenite::client_async(&onion_addr, sock).await?;

    // [...]
}

```

5.2 Tor-Netzwerk

Um den HTTP-Server nun als Onion Service in das Tor-Netzwerk einzubinden, benötigt der Messenger eine Verbindung zum Tor-Netzwerk. Zudem wird der Tor-Proxy gebraucht, um eine Verbindung zu den Onion Services anderen Messengern aufzubauen. Dies setze ich in der *tor-proxy* Bibliothek um. Um den Tor-Proxy zu konfigurieren, wird eine Tor-Konfigurationsdatei benötigt, welche unter anderem den Port des HTTP-Servers und des Tor-Proxys angibt:

```

/// Converts the configuration to a `torrc` file format
async fn to_text(&self) -> Result<String> {
    let data = PathBuf::from(self.data_dir());

    let geo_ip = data.clone().join("geoip");
    let geo_ip6 = data.clone().join("geoip6");

    #[allow(unused_mut)]
    let mut config = format!(
        "SocksPort {}
HiddenServiceDir \"{}\"
HiddenServicePort 80 {}
DataDirectory \"{}\"
GeoIPFile \"{}\"
GeoIPv6File \"{}\",
        self.get_socks_host(),
        self.service_dir().to_string_lossy().replace("\\\", "/"),
        self.get_hidden_service_host(),
    );
}

```

über Tor – Die Lösung für sicheres Messaging?

```
        self.data_dir().to_string_lossy().replace("\\", "/"),
        geo_ip.to_string_lossy().replace("\\", "/"),
        geo_ip6.to_string_lossy().replace("\\", "/"),
    );

    //[...]

    Ok(config)
}
```

270 Der Tor-Proxy wird folgendermaßen gestartet:

```
let mut child = Command::new(TOR_BINARY_PATH.clone());
child.args(["-f", &get_torrc().to_string_lossy()]);
child.current_dir(TOR_BINARY_PATH.parent().unwrap());
child.stdout(Stdio::piped());
child.stderr(Stdio::piped());
//[...]
let child = child.spawn()?;
```

Der Messenger ist nun mit dem Tor-Netzwerk verbunden und wartet auf eingehende Verbindungen von anderen Messengern unter der Adresse des Onion Services.

5.3 Nachrichtenaustausch

275 Grundsätzlich liegen folgende Phasen des Nachrichtenaustausches vor:

- **Server-Side-Identity verification:** Der Client übersendet seine Identität an den Server, welcher dieser nun überprüft, ob der Client tatsächlich der ist, für den er sich ausgibt. Danach übersendet der Server seine Identität an den Client.
- **Client-Side-Identity verification:** Die Identität des Servers wird von dem Client empfangen und anschließend überprüft.
- **Nachrichten versenden:** Jetzt, wo beide Seiten ihre Identität überprüft haben und sicher sind, dass keine möglichen Angreifer die Verbindung fälschen

280

über Tor – Die Lösung für sicheres Messaging?

könnten, ist der Client/Server bereit Nachrichten zu versenden

285 Generell gilt, dass der Messenger einen gemeinsamen Datenspeicher mit dem inneren Client und Onion Service teilt. In diesem werden die Chats zwischen den Gesprächsteilnehmern gespeichert. Der Datenspeicher besteht also aus einer *HashMap* an Chat-Datenstrukturen, wobei der Schlüssel der Empfänger-Onionadresse entspricht.

```
pub struct StorageChat {
    /// All messages sent to this receiver or received from this
    ↪ receiver
    // [...]
    pub messages: Vec<ChatMessage>,

    /// The public key which is used to encrypt messages when
    ↪ being sent to the receiver
    // [...]
    pub rec_pub_key: Option<PublicKey>,
    // [...]
    pub receiver_onion: String,
    /// Private key of ourselves used to decrypt the messages
    ↪ that are being received
    // [...]
    pub priv_key: PrivateKey,
}
```

290 Jeder Chat enthält dabei das „eigene“ Schlüsselpaar (*priv_key*), welches durch RSA generiert wird und den öffentlichen Schlüssel (*rec_pub_key*) des Empfängers, mit welchem später die Nachrichten an den Empfänger verschlüsselt werden.

5.3.1 Server-Side-Identity verification

295 Damit der Client seine eigene Identität bestätigen kann, sucht dieser zunächst in den gespeicherten Chats nach der Onion-Adresse des Empfängers. Sollte der Eintrag nicht vorhanden sein, wird ein neuer Chat generiert (somit auch ein neues Schlüsselpaar generiert). Das Identitätspaket besteht dabei aus dem Hostname

über Tor – Die Lösung für sicheres Messaging?

dieses Messengers, der Signatur des Hostnames (durch den privaten Schlüssel signiert), und den öffentlichen Schlüssel des Schlüsselpaars dieses Chats. Das Identitätspaket wird also folgendermaßen berechnet:

```
300 async fn identity(receiver: &str) -> Result<Self> {
    // Get the own hostname
    let own_hostname = get_service_hostname(true)
        .await?
        .ok_or(anyhow!("Could not get own hostname"))?;

    // Get the private key for the receiver (used to decrypt messages)
    let priv_key = StorageManager::get_or_create_private_key(receiver).await?;
    let pub_key = priv_key.clone().try_into()?;

    // Creating a signature for the receiver with the hostname
    let keypair = PKey::from_rsa(priv_key.0)?;
    let mut signer = Signer::new(*DIGEST, &keypair)?;

    signer.update(own_hostname.as_bytes())?;
    let signature = signer.sign_to_vec()?;

    // Return the identity packet
    Ok(C2SPacket::SetIdentity(Identity {
        hostname: own_hostname,
        signature,
        pub_key
    }))
}
```

Der Client übersendet dieses Identitätspaket an den Server, welcher dies durch den gespeicherten öffentlichen Schlüssel (*rec_pub_key*) des (aus seiner Sicht) Empfängers überprüft. Sollte die Signatur nicht valide sein, wird die Verbindung abgebrochen. Falls die Identität valide ist, übersendet der Server seine eigene Identität

305 an den Client.

6 Verbesserungsmöglichkeiten

7 Fazit

Literatur

- [Am23] Amnesty International. *Amnesty International Report 2022/23*. London WC1X 0DW, United Kingdom: International Amnesty Ltd, 2023, S. 307–312, 122–128, 196–201. ISBN: 978-0-86210-502-0. URL: <https://www.amnesty.org/en/wp-content/uploads/2023/04/WEBPOL1056702023ENGLISH-2.pdf> (besucht am 13. 01. 2024).
- [Au18] Autumn. „How does Tor *really* work?“ In: (Feb. 2018). URL: <https://hackernoon.com/how-does-tor-really-work-c3242844e11f> (besucht am 23. 01. 2024).
- [BSW15b] Albrecht Beutelspacher, Jörg Schwenk und Klaus-Dieter Wolfenstetter. „Ziele der Kryptographie“. In: *Moderne Verfahren der Kryptographie: Von RSA zu Zero-Knowledge*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 1–7. ISBN: 978-3-8348-2322-9. DOI: 10.1007/978-3-8348-2322-9_1. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2322-9_1.
- [Bh23] Jasdeep Bhatia. *Understanding System Design Whatsapp & Architecture*. Mai 2023. URL: https://pwwskills.com/blog/system-design-whatsapp/#Client-Server_Architecture (besucht am 22. 01. 2024).
- [Bu24] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. *DoS- und DDoS-Attacken*. Feb. 2024. URL: https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Verbraucherinnen-und-Verbraucher/Cyber-Sicherheitslage/Methoden-der-Cyber-Kriminalitaet/DoS-Denial-of-Service/dos-denial-of-service_node.html (besucht am 08. 02. 2024).
- [Ch+11] Sambuddho Chakravarty, Georgios Portokalidis, Michalis Polychronakis und Angelos D. Keromytis. „Detecting Traffic Snooping in Tor Using Decoys“. In: *Recent Advances in Intrusion Detection*. Hrsg. von Robin Sommer, Davide Balzarotti und Gregor Maier. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 222–241. ISBN: 978-3-642-23644-0.

über Tor – Die Lösung für sicheres Messaging?

- [DMS04] Roger Dingledine, Nick Mathewson und Paul Syverson. „Tor: The Second-Generation Onion Router“. In: *13th USENIX Security Symposium (USENIX Security 04)*. San Diego, CA: USENIX Association, Aug. 2004. URL: <https://www.usenix.org/conference/13th-usenix-security-symposium/tor-second-generation-onion-router>.
- [Du24] DuckDuckGo. *duckduckgo onion at DuckDuckGo*. Feb. 2024. URL: <https://duckduckgo.com/?q=duckduckgo+onion&atb=v160-7&ia=web> (besucht am 02. 02. 2024).
- [El16] Elektronik Kompendium. *TCP/IP*. Nov. 2016. URL: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/net/0606251.htm> (besucht am 23. 01. 2024).
- [Fä23] Jan Fährmann. „Rechtliche Rahmenbedingungen der Nutzung von Positionsdaten durch die Polizei und deren mögliche Umsetzung in die Praxis–zwischen Strafverfolgung und Hilfe zur Wiedererlangung des Diebesguts“. In: *Private Positionsdaten und polizeiliche Aufklärung von Diebstählen*. Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG. 2023, S. 141–176. ISBN: 978-3-8487-5905-7.
- [Ge23a] GeeksforGeeks. *Comparison Centralized Decentralized and Distributed Systems*. Sep. 2023. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/comparison-centralized-decentralized-and-distributed-systems> (besucht am 09. 02. 2024).
- [Ge23b] GeeksforGeeks. *What are onion services in Tor Browser*. Okt. 2023. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/what-are-onion-services-in-tor-browser> (besucht am 04. 02. 2024).
- [Ge21] Gemini. *Networks: Decentralized, Distributed, & Centralized | Gemini*. Juli 2021. URL: <https://www.gemini.com/cryptopedia/blockchain-network-decentralized-distributed-centralized#section-what-is-a-centralized-network> (besucht am 08. 02. 2024).
- [Gr14] Andy Greenberg. „Hacker Lexicon: What Is End-to-End Encryption?“ In: *WIRED* (Nov. 2014). URL: <https://www.wired.com/2014/11/hacker-lexicon-end-to-end-encryption> (besucht am 16. 01. 2024).

über Tor – Die Lösung für sicheres Messaging?

- [HK20] Aljaafari Hamza und Basant Kumar. „A Review Paper on DES, AES, RSA Encryption Standards“. In: *2020 9th International Conference System Modeling and Advancement in Research Trends (SMART)*. 2020, S. 333–338. DOI: 10.1109/SMART50582.2020.9336800.
- [HD05] Manfred Hauswirth und Schahram Dustdar. „Peer-to-peer: Grundlagen und Architektur“. In: *Datenbank-Spektrum* 13.2005 (2005), S. 5–13.
- [IBM21] *IBM Documentation*. März 2021. URL: <https://www.ibm.com/docs/en/ztpf/2020?topic=concepts-symmetric-cryptography> (besucht am 23. 01. 2024).
- [Is16] Ni Made Satvika Iswari. „Key generation algorithm design combination of RSA and ElGamal algorithm“. In: *2016 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*. 2016, S. 1–5. DOI: 10.1109/ICITEED.2016.7863255.
- [K 23] Arun K. L. „Detailed Anatomy of the Tor Network | Structure of the Tor Network“. In: *Sec Master* (Okt. 2023). URL: <https://thesecmaster.com/detailed-anatomy-of-the-tor-network-structure-of-the-tor-network> (besucht am 23. 01. 2024).
- [Kr16a] N. Krzyworzeka. „Asymmetric cryptography and trapdoor one-way functions“. In: *Automatyka / Automatics* 20.2 (2016), S. 39–51. ISSN: 1429-3447. DOI: 10.7494/automat.2016.20.2.39.
- [La22] Lakhwinder. *Understanding WhatsApp Architecture*. Aug. 2022. URL: <https://hackernoon.com/understanding-whatsapp-architecture> (besucht am 08. 02. 2024).
- [Li23] Max (Chong) Li. „What A Decentralized Infrastructure Is And How It Actually Works“. In: *Forbes* (Mai 2023). URL: <https://www.forbes.com/sites/digital-assets/2023/05/07/what-a-decentralized-infrastructure-is-and-how-it-actually-works> (besucht am 08. 02. 2024).
- [LSS10] Tomáš Liška, Tomáš Sochor und Hana Sochorová. „Comparison between normal and TOR-Anonymized Web Client Traffic“. In: *Procedia*

- *Social and Behavioral Sciences* 9 (2010). World Conference on Learning, Teaching and Administration Papers, S. 542–546. ISSN: 1877-0428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.12.194>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042810022998>.
- [Lo+24] Daniela Lopes, Jin-Dong Dong, Pedro Medeiros, Daniel Castro, Diogo Barradas, Bernardo Portela, João Vinagre, Bernardo Ferreira, Nicolas Christin und Nuno Santos. „Flow Correlation Attacks on Tor Onion Service Sessions with Sliding Subset Sum“. In: *Network and Distributed System Security Symposium*. Internet Society, Feb. 2024. ISBN: 1-891562-93-2. URL: <https://www.ndss-symposium.org/ndss-paper/flow-correlation-attacks-on-tor-onion-service-sessions-with-sliding-subset-sum/> (besucht am 08. 02. 2024).
- [LB21] Ben Lutkevich und Madelyn Bacon. „end-to-end encryption (E2EE)“. In: *Security* (Juni 2021). URL: <https://www.techtarget.com/searchsecurity/definition/end-to-end-encryption-E2EE> (besucht am 16. 01. 2024).
- [MS13] Prerna Mahajan und Abhishek Sachdeva. „A study of encryption algorithms AES, DES and RSA for security“. In: *Global Journal of Computer Science and Technology* 13.15 (2013), S. 15–22.
- [Ma23] Giorgio Martinez. „Rust: Exploring Memory Safety and Performance - Giorgio Martinez - Medium“. In: *Medium* (Okt. 2023). ISSN: 9598-0120. URL: <https://medium.com/@giorgio.martinez1926/unlocking-the-power-of-rust-exploring-memory-safety-and-performance-9afd5980c120> (besucht am 11. 02. 2024).
- [Mi23] Microsoft. *WebSockets - UWP applications*. Juli 2023. URL: <https://learn.microsoft.com/de-de/windows/uwp/networking/websockets> (besucht am 13. 02. 2024).
- [Op24] OpenSSL Foundation, Inc. */docs/man3.1/man3/RSA_public_encrypt.html*. Jan. 2024. URL: https://www.openssl.org/docs/man3.1/man3/RSA_public_encrypt.html (besucht am 04. 02. 2024).

über Tor – Die Lösung für sicheres Messaging?

- [Pa+16] Ioana-Cristina Panait, Cristian Pop, Alexandru Sirbu, Adelina Vidovici und Emil Simion. „TOR - Didactic Pluggable Transport“. In: *Innovative Security Solutions for Information Technology and Communications*. Hrsg. von Ion Bica und Reza Reyhanitabar. Cham: Springer International Publishing, 2016, S. 225–239. ISBN: 978-3-319-47238-6.
- [Re24] Reporter ohne Grenzen, e. V. USA | *Reporter ohne Grenzen für Informationsfreiheit*. Feb. 2024. URL: <https://www.reporter-ohne-grenzen.de/usa> (besucht am 08. 02. 2024).
- [Ru24] Rust Foundation. *cargo build - The Cargo Book*. Feb. 2024. URL: <https://doc.rust-lang.org/cargo/commands/cargo-build.html> (besucht am 11. 02. 2024).
- [Se19] Session. *Centralisation vs decentralisation in private messaging - Session Private Messenger*. Dez. 2019. URL: <https://getsession.org/blog/centralisation-vs-decentralisation-in-private-messaging> (besucht am 08. 02. 2024).
- [Si23] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. *BSI TR-02102-1 Kryptographische Verfahren: Empfehlungen und Schlüssellängen*. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Jan. 2023, S. 39–41. URL: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/TechnischeRichtlinien/TR02102/BSI-TR-02102.pdf?__blob=publicationFile&v=9 (besucht am 21. 01. 2024).
- [Si16] Signal Messenger. *Reflections: The ecosystem is moving*. Mai 2016. URL: <https://signal.org/blog/the-ecosystem-is-moving> (besucht am 08. 02. 2024).
- [Ta96] D. Taipale. „Implementing the Rivest, Shamir, Adleman cryptographic algorithm on the Motorola 56300 family of digital signal processors“. In: *Southcon/96 Conference Record*. Juni 1996, S. 10–17. DOI: 10.1109/SOUTH96.535035.

über Tor – Die Lösung für sicheres Messaging?

- [Ta13] Marius Tarnauceanu. *A generalization of the Euler's totient function*. 2013. DOI: 10.48550/arXiv.1312.1428. arXiv: 1312.1428 [math.GR]. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1312.1428>.
- [Ta24] Tauri Programme. *tauri - Rust*. Feb. 2024. URL: <https://docs.rs/tauri/1.5.4/tauri> (besucht am 11. 02. 2024).
- [To24a] Tor Project. *Deriving blinded keys and subcredentials [SUBCRED] - Tor Specifications*. Jan. 2024. URL: <https://spec.torproject.org/rend-spec/deriving-keys.html> (besucht am 04. 02. 2024).
- [To24b] Tor Project. *directory authority | Tor Project | Support*. Feb. 2024. URL: <https://support.torproject.org/glossary/directory-authority> (besucht am 02. 02. 2024).
- [To24c] Tor Project. *How can we help? | Tor Project | Support*. Feb. 2024. URL: <https://support.torproject.org/#ChangePaths> (besucht am 04. 02. 2024).
- [To24d] Tor Project. *Kanal | Tor Project | Hilfe*. Jan. 2024. URL: <https://support.torproject.org/de/glossary/circuit> (besucht am 31. 01. 2024).
- [To24e] Tor Project. *src/core/or · main · The Tor Project / Core / Tor · GitLab*. Feb. 2024. URL: https://gitlab.torproject.org/tpo/core/tor/-/blob/main/src/feature/hs/hs_descriptor.c?ref_type=heads (besucht am 04. 02. 2024).
- [To23a] Tor Project. *The introduction protocol [INTRO-PROTOCOL] - Tor Specifications*. Dez. 2023. URL: <https://spec.torproject.org/rend-spec/introduction-protocol.html> (besucht am 04. 02. 2024).
- [To23b] Tor Project. *The rendezvous protocol - Tor Specifications*. Nov. 2023. URL: <https://spec.torproject.org/rend-spec/rendezvous-protocol.html> (besucht am 04. 02. 2024).
- [To24f] Tor Project. *Tor Project | How do Onion Services work? [Online; accessed 2. Feb. 2024]*. Jan. 2024. URL: <https://community.torproject.org/onion-services/overview>.

über Tor – Die Lösung für sicheres Messaging?

- [To24g] Tor Project. *Tor Project | Talk about onions*. Jan. 2024. URL: <https://community.torproject.org/onion-services/talk> (besucht am 31. 01. 2024).
- [Tu08] Clay S Turner. „Euler’s totient function and public key cryptography“. In: *Nov 7* (2008), S. 138.
- [Un22] United Nations. *World Population Prospects - Population Division*. Jan. 2022. URL: [https://population.un.org/wpp/Download/Files/1_Indicators%20\(Standard\)/EXCEL_FILES/1_General/WPP2022_GEN_F01_DEMOGRAPHIC_INDICATORS_COMPACT_REV1.xlsx](https://population.un.org/wpp/Download/Files/1_Indicators%20(Standard)/EXCEL_FILES/1_General/WPP2022_GEN_F01_DEMOGRAPHIC_INDICATORS_COMPACT_REV1.xlsx) (besucht am 13. 01. 2024).
- [Wa+13] Hongjun Wang, Zhiwen Song, Xiaoyu Niu und Qun Ding. „Key generation research of RSA public cryptosystem and Matlab implement“. In: *PROCEEDINGS OF 2013 International Conference on Sensor Network Security Technology and Privacy Communication System*. 2013, S. 125–129. DOI: 10.1109/SNS-PCS.2013.6553849.
- [Wi+22b] Sandra Wittmer, Florian Platzer, Martin Steinebach und York Yannikos. „Deanonymisierung im Tor-Netzwerk – Technische Möglichkeiten und rechtliche Rahmenbedingungen“. In: *Selbstbestimmung, Privatheit und Datenschutz : Gestaltungsoptionen für einen europäischen Weg*. Hrsg. von Michael Friedewald, Michael Kreutzer und Marit Hansen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022, S. 151–169. ISBN: 978-3-658-33306-5. DOI: 10.1007/978-3-658-33306-5_8. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-658-33306-5_8.
- [Wu+23] Mingshi Wu, Jackson Sippe, Danesh Sivakumar, Jack Burg, Peter Anderson, Xiaokang Wang, Kevin Bock, Amir Houmansadr, Dave Levin und Eric Wustrow. „How the Great Firewall of China Detects and Blocks Fully Encrypted Traffic“. In: *32nd USENIX Security Symposium (USENIX Security 23)*. Anaheim, CA: USENIX Association, Aug. 2023, S. 2653–2670. ISBN: 978-1-939133-37-3. URL: <https://www.usenix.org/conference/usenixsecurity23/presentation/wu-mingshi> (besucht am 14. 01. 2024).

Anhang

- [BSW15a] Albrecht Beutelspacher, Jörg Schwenk und Klaus-Dieter Wolfenstetter. „Kryptologische Grundlagen“. In: *Moderne Verfahren der Kryptographie: Von RSA zu Zero-Knowledge*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 9–30. ISBN: 978-3-8348-2322-9. DOI: 10.1007/978-3-8348-2322-9_2. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2322-9_2.
- [Kr16b] N. Krzyworzeka. „Asymmetric cryptography and trapdoor one-way functions“. In: *Automatyka / Automatics* 20.2 (2016), S. 39–51. ISSN: 1429-3447. DOI: 10.7494/automat.2016.20.2.39.
- [Wi+22a] Sandra Wittmer, Florian Platzer, Martin Steinebach und York Yannikos. „Deanonymisierung im Tor-Netzwerk – Technische Möglichkeiten und rechtliche Rahmenbedingungen“. In: *Selbstbestimmung, Privatheit und Datenschutz : Gestaltungsoptionen für einen europäischen Weg*. Hrsg. von Michael Friedewald, Michael Kreutzer und Marit Hansen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022, S. 151–169. ISBN: 978-3-658-33306-5. DOI: 10.1007/978-3-658-33306-5_8. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-658-33306-5_8.

Quellcode: <https://github.com/sshcrack/enkrypton>