

Dezentralisierte asymmetrische Verschlüsselung über Tor

Die Lösung für sicheres Messaging?

Hendrik Lind

Facharbeit

Windthorst-Gymnasium Meppen

Seminarfach Informatik

31. Januar 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	4
3	Anonymität mit dem Tor-Netzwerk	5
3.1	Onion-Services	6
4	Dezentralisierung	6
4.1	Sicherheit	6
5	Vor- und Nachteile	6
5.1	Kriminalität	6
5.2	freie Meinungsäußerung	6
6	programmatische Umsetzung	6
7	Fazit	6

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; 23].

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]. 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 Fazit gezogen.

35 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]. Dazwischenliegende Akteure, wie zum Beispiel Server oder mögliche Angreifer, können demzufolge
40 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.]. Für diese Arbeit werde ich die gängigste asymmetrische Verschlüsselung, das RSA-Verfahren, verwenden.

2.1 Grundlagen

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

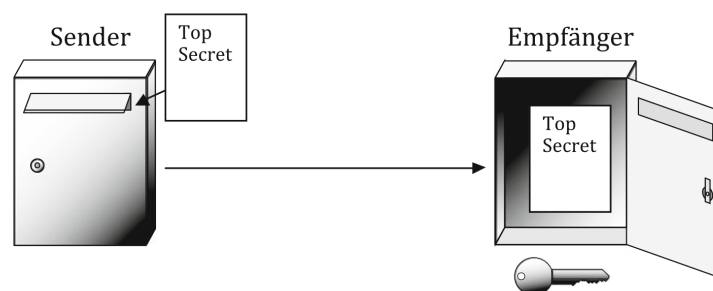


Abbildung 1: Jeder Sender kann mit dem öffentlichen Schlüssel die Nachricht „verschlüsseln“ (also in den Briefkasten eine Nachricht werfen), aber nur der Empfänger kann den Briefkasten mit seinem privaten Schlüssel öffnen [vgl. BSW15a]

2.2 Mathematische Betrachtung

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

Für die Generierung des Schlüsselpaares benötigen wir zuerst zwei große zufällige

55 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].

2.2.1 Eulersche Phi-Funktion

60 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 (wo also der größte gemeinsame Teiler (gcd) 1 ist) [vgl. Ta13]. Somit ergibt $\phi(6) = 2$ oder bei einer Primzahl $\phi(7) = 7 - 1 = 6$ somit $\phi(x) = x - 1$, wenn x eine Primzahl ist, da jede Zahl kleiner als x teilerfremd sein muss [vgl. Tu08].

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

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

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

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

65 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 , welche zur Verschlüsselung einer Nachricht benötigt wird [vgl. ebd.]. e ist hierbei eine zufällige Zahl, bei welcher folgende Bedingungen 70 gelten [vgl. ebd.]:

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

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-

über Tor – Die Lösung für sicheres Messaging?

che zur Entschlüsselung verwendet wird [vgl. MS13].

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

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

75 2.3 Sicherheit

Das RSA-Verfahren macht sich die Trapdoor-Einwegfunktion zu Nutze [vgl. Kr16].

Das bedeutet, dass eine Funktion mit modernen Computern unmöglich ist, zu invertieren, wenn eine Komponente fehlt (in diesem Fall d). Wenn diese jedoch gegeben ist, ist die Umkehroperation leicht [vgl. ebd.]. Zu sehen ist dies bei der Ver-

80 /Entschlüsselung von Nachrichten mit dem öffentlichen und privaten Schlüssel [vgl. ebd.].

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

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

Um die verschlüsselte Nachricht c zu entschlüsseln, bräuchte ein möglicher Angreifer die Komponente des privaten Schlüssels d . Diese ist allerdings schwer zu berechnen, da, wie schon vorher bereits gezeigt, dafür $\phi(n)$ benötigt wird. Auch $\phi(n)$

85 ist rechenaufwendig, da dafür eine Primfaktorzerlegung von n benötigt wird [vgl. Ta13]. Wichtig hierbei ist aber, dass die Länge von n (Schlüssellänge) mindestens 3000 Bit betragen sollte, da sonst die Primfaktorzerlegung von n mit modernen Computern möglich sein könnte [vgl. BSI23].

2.4 Vergleich zur symmetrischen Verschlüsselung

90 Im Gegensatz zu der asymmetrischen Verschlüsselung, bei welcher sowohl der privaten als auch der öffentlichen Schlüssel verwendet werden, wird bei der symmetrischen Verschlüsselung nur ein Schlüssel verwendet, um Nachrichten zu verschlüsseln [vgl. IBM21]. Mit dem selben Schlüssel können Nachrichten auch wieder entschlüsselt werden [vgl. ebd.]. Im Vergleich zu der symmetrischen Verschlüsselung

95 ist die asymmetrische Verschlüsselung langsamer, jedoch muss kein Schlüssel zur Entschlüsselung der Nachricht übermittelt werden [vgl. HK20].

3 Anonymität mit dem Tor-Netzwerk

Der zweite zentrale Aspekt dieser Arbeit ist die Anonymität über das Internet. Bei normalen Routing, wie wir es tagtäglich nutzen, kommuniziert der Client direkt mit dem Zielservers. Der Zielservers kann hierbei die IP-Adresse des Clients sehen, somit ist eine Rückverfolgung möglich [vgl. Fä23; El16]. Und genau bei diesem Problem setzt das Tor-Netzwerk an. Das Tor-Netzwerk besteht aus vielen Servern, genannt *Nodes* [vgl. K 23]. Damit ein Client eine Anfrage über das Netzwerk verschicken kann, sucht er sich zunächst einen Pfad durch das Netzwerk, genannt *Circuit* [vgl. 24a]. Dieser *Circuit* besteht dabei meist aus drei *Nodes*. Der *Entry Node*, einer *Relay Node* und einer *Exit Node*, worüber später Anfragen an die Zielservers 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 Zielservers weiter [vgl. K 23]. Anfangs wird die *Onion* von dem Tor-Client an die *Entry Node* geschickt [vgl. ebd.]. Bei jeder *Node*, also auch der *Entry Node*, wird eine Schale der *Onion* „geschält“ (die Nachricht also einmal entschlüsselt), welche Informationen zu dem nächsten Knotenpunkt enthält, somit schickt jene *Node*, die Anfrage an den nächsten Knotenpunkt weiter [vgl. Au18]. Sobald die Anfrage bei der *Exit Node* angekommen ist, entfernt diese die letzte „Schale“ der Anfrage, welche nun vollständig entschlüsselt ist (wenn die eigentliche Anfrage nicht mit HTTPS verschlüsselt wurde), und schickt diese an den Zielservers [vgl. ebd.]. Nur die *Entry Node* weiß somit die reale IP-Adresse des Clients und **nur** die letzte *Node* (*Exit Node*) weiß, an welchen Zielservers die Anfrage geschickt wurde [vgl. ebd.]. Wichtig hierbei ist allerdings, dass die *Entry Node* nicht weiß, was der Zielservers der Anfrage ist [vgl. ebd.]. Die *Exit Node* weiß im Gegenzug die reale IP-Adresse des Clients nicht. Allerdings könnte die *Exit Node* die IP-Adressen der Zielservers sehen oder möglicherweise Informationen der Nutzer auslesen (wenn die Anfrage nicht mit HTTPS verschlüsselt wurde) [vgl. Ch+11]. Hier herrscht also eine Schwachstelle des Tor-Netzwerkes, welche Onion-Services (größtenteils) gelöst wird, da diese nicht auf die *Exit Node* angewiesen sind [vgl. 24b].

über Tor – Die Lösung für sicheres Messaging?

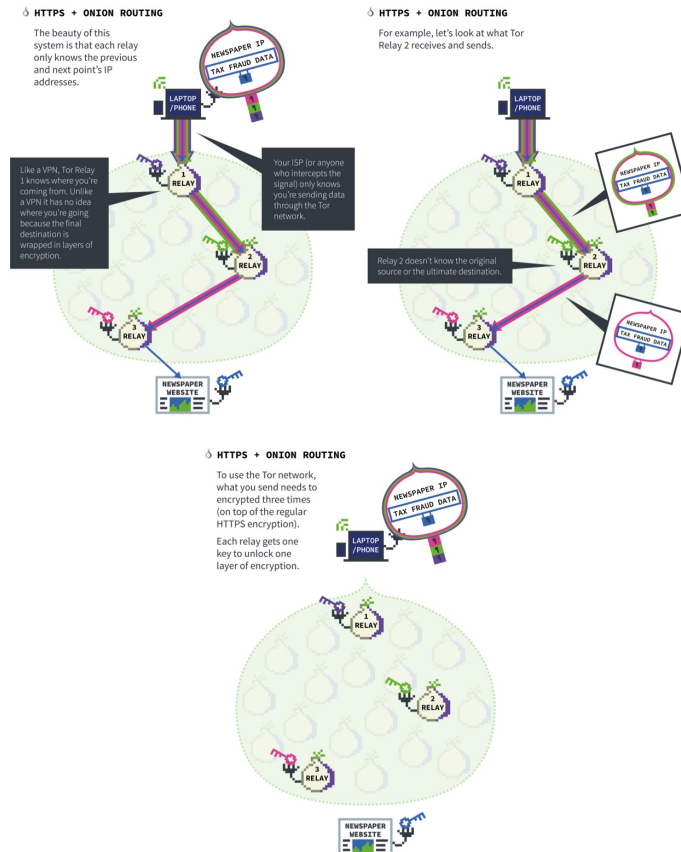


Abbildung 2: Tor Struktur und so [vgl. Tor22]

3.1 Onion-Services

4 Dezentralisierung

4.1 Sicherheit

130 5 Vor- und Nachteile

5.1 Kriminalität

5.2 freie Meinungsäußerung

6 programmatische Umsetzung

7 Fazit

Literatur

- [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/SOUTHC.1996.535035.
- [Tu08] Clay S Turner. „Euler’s totient function and public key cryptography“. In: *Nov 7* (2008), S. 138.
- [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.
- [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.
- [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>.
- [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.
- [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).
- [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-

über Tor – Die Lösung für sicheres Messaging?

8348-2322-9_1. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2322-9_1.

- [El16] Elektronik Kompendium. *TCP/IP*. Nov. 2016. URL: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/net/0606251.htm> (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.
- [Kr16] 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.
- [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).
- [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.
- [IBM21] *IBM Documentation*. März 2021. URL: <https://www.ibm.com/docs/en/ztpf/2020?topic=concepts-symmetric-cryptography> (besucht am 23. 01. 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).
- [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).

über Tor – Die Lösung für sicheres Messaging?

- [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).
- [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.
- [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).
- [BSI23] 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).
- [23] *Understanding System Design Whatsapp & Architecture*. Mai 2023. URL: https://pwskills.com/blog/system-design-whatsapp/#Client-Server_Architecture (besucht am 22. 01. 2024).
- [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).

[24a] *Kanal | Tor Project | Hilfe*. Jan. 2024. URL: <https://support.torproject.org/de/glossary/circuit> (besucht am 31. 01. 2024).

[24b] *Tor Project | Talk about onions*. Jan. 2024. URL: <https://community.torproject.org/onion-services/talk> (besucht am 31. 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.

[Tor22] Tor Project. *Tor Project | All About Tor*. Aug. 2022. URL: <https://community.torproject.org/training/resources/all-about-tor/#/0/7> (besucht am 23. 01. 2024).

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