

Grundlagen der Kryptologie

Kryptographie, Kryptoanalyse, klassische und moderne Verfahren

Tom Gries



Dokumenten URL:

<http://docs.tx7.de/TT-TK6>

Autor:

Tom Gries <TT-TK6@tx7.de>
@tomo@chaos.social

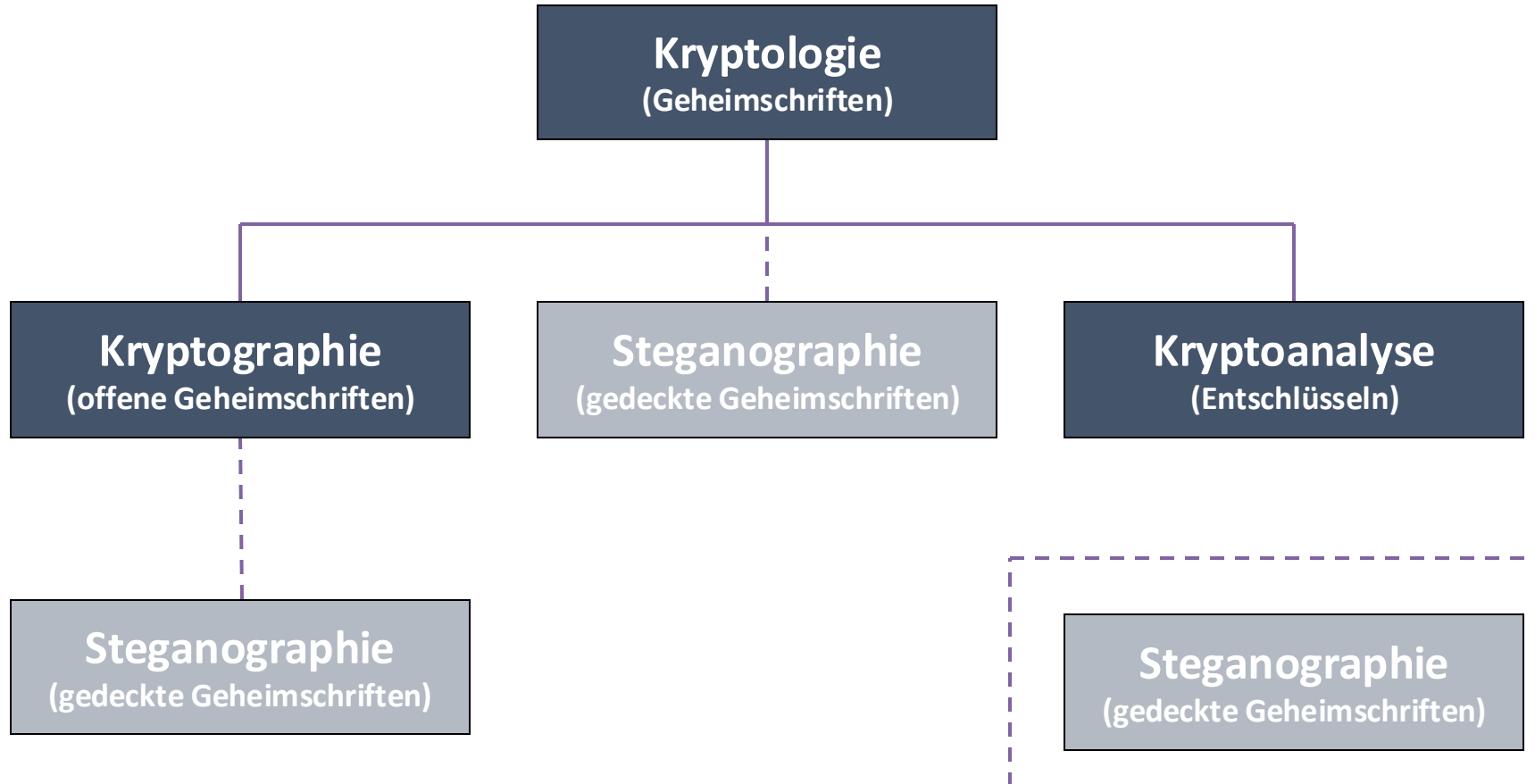
Lizenz:

Creative Commons BY-NC-ND

Version:

7.2.1 vom 16.01.2025





Die Kryptologie ist die Wissenschaft der Verschlüsselung und Entschlüsselung von Informationen.



Hauptziele der Kryptographie

Die Kryptographie hat 4 Hauptziele:

1. Confidentiality (Wahrung der Vertraulichkeit)
2. Integrity (Sicherstellung der Datenintegrität)
3. Authenticity (Sicherstellung der Echtheit)
4. Non Repudiation (Nichtabstreitbarkeit)

Die allgemeine IT-Security hat darüber hinaus noch das Ziel der Availability (Sicherstellung der Verfügbarkeit). Der Geheimschutz kennt nur [1] und [2]. Bei Confidentiality, Integrity und Availability spricht man von der **CIA-Triade**.



Eine kleine Aufgabe

Entschlüssele den Text auf der folgenden Seite. Erkläre anschließend, wie Du auf die Lösung gekommen bist und um welche Chiffre es sich handelt.

Text unter <http://docs.tx7.de/TT-TUV> abrufbar



FIMWTMIP GEIWEV GLMJJVI

HMI OVCTXSKVETLMI MWX HIV DAIMK HIV OVCTXSPSKMI, HIV WMGL QMX HIQ
ZIVWGLPYIWWIPR ZSR MRJSVQEXMSRIR FIJEWWX.

HMI OVCTXSEREPCWI MWX HMI AMWWIRWGLEJX, MRJSVQEXMSRIR EYW
ZIVWGLPYIWWIPXIR XIBXIR DY KIAMRRIR. HMIWI MRJSVQEXMSRIR OSIRIR WSASLP
HIV ZIVAIRHIXI WGLPYIWWIP EPW EYGL HIV SVMKMREPXIBX WIMR. AIWIRXPMGLI
DMIPI HIV OVCTXSEREPCWI WMRH HEW EYJLIFIR HIV WGLYXDJYROXMSR, HEW
YQKILIR HIV WGLYXDJYROXMSR WSAMI HIV REGLAIMW YRH UYERXMJMDMIVYRK
HIV WMGLIVLIMX IMRIW ZIVJELVIRW.

Text unter <http://docs.tx7.de/TT-TUV> abrufbar



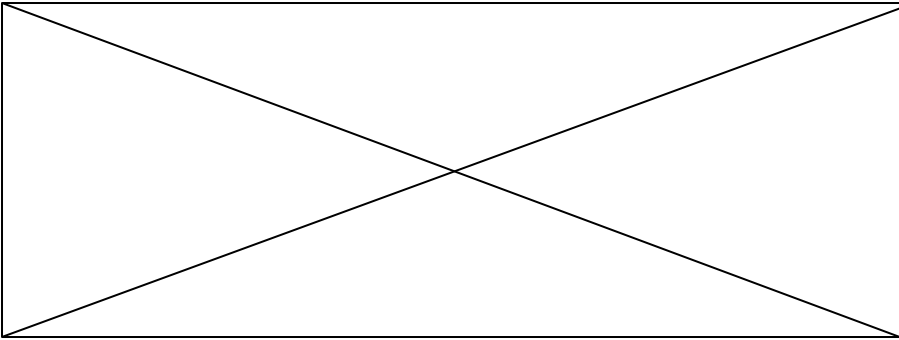
BEISPIEL CAESAR CHIFFRE

DIE KRYPTOGRAPHIE IST DER ZWEIG DER KRYPTOLOGIE, DER SICH MIT DEM VERSCHLUESSELN VON INFORMATIONEN BEFASST.

DIE KRYPTOANALYSE IST DIE WISSENSCHAFT, INFORMATIONEN AUS VERSCHLUESSELTEN TEXTEN ZU GEWINNEN. DIESE INFORMATIONEN KOENNEN SOWOHL DER VERWENDETE SCHLUESSEL ALS AUCH DER ORIGINALTEXT SEIN. WESENTLICHE ZIELE DER KRYPTOANALYSE SIND DAS AUFHEBEN DER SCHUTZFUNKTION, DAS UMGEHEN DER SCHUTZFUNKTION SOWIE DER NACHWEIS UND QUANTIFIZIERUNG DER SICHERHEIT EINES VERFAHRENS.



Verfahren der Kryptographie

| | Symmetrische Chiffre | Asymmetrische Chiffre |
|-------------|---|---|
| Klassisch | <ul style="list-style-type: none">⇒ Transposition (Anagramm/vertauschen)⇒ Substitution (ersetzen)<ul style="list-style-type: none">▪ Monoalphabetische Substitution▪ Polyalphabetische Substitution |  |
| Modern (IT) | <ul style="list-style-type: none">⇒ Blockchiffre⇒ Stromchiffre <p>Schlüssel ≤ 512 Bit</p> | <ul style="list-style-type: none">⇒ Public-Key Verfahren <p>Schlüssel ≥ 1.024 Bit</p> |



Verfahren der Kryptographie

Klassische Verfahren

Transpositionsverfahren:

- ⇒ Skytale
- ⇒ Fleißnersche Schablone

Substitutionsverfahren (monoalphabetisch):

- ⇒ Caesar

Substitutionsverfahren (polyalphabetisch):

- ⇒ Vigenère-Verschlüsselung
- ⇒ ENIGMA

Spezialfall: Homophone Verschlüsselung

Moderne Verfahren

Symmetrische Blockchiffren:

- ⇒ AES
- ⇒ Twofish

Symmetrische Stromchiffren:

- ⇒ ChaCha20 (Alternative zu AES)

Publik-Key Verfahren (asymmetrisch):

- ⇒ RSA
- ⇒ Ed25519



Klassische Verfahren der Kryptographie: Transpositionsverfahren

Bei den Transpositionsverfahren werden die Buchstaben des Klartextes vertauscht (permutiert). Die Zeichen selber und die Anzahl jedes einzelnen Zeichens werden nicht verändert.

Beispiel:

| | |
|-------------|-------------|
| Klartext: | FRIKADELLE |
| Geheimtext: | LEKADEFRIIL |

Frage:

Wie viele Permutationen und mögliche Geheimtexte gibt es bei den Klartextworten TOR, ZOO und MONOTON?



Klassische Verfahren der Kryptographie: Transpositionsverfahren

TOR:

6 Permutationen: TOR - TRO - ROT - RTO - OTR - ORT

$$3! = 6$$

ZOO:

3 Permutationen: ZO₁O₂ - ZO₂O₁ - O₁ZO₂ - O₂ZO₁ - O₁O₂Z - O₂O₁Z
ZOO - OZO - OOZ

$$\frac{3!}{2!} = \frac{6}{2} = 3$$

MONOTON:

420 Permutationen: MO₁N₁O₂TO₃N₂ - MO₁N₂O₂TO₃N₁ - ...
MONOTON - MONOTNO - ...

$$\frac{7!}{2! \times 3!} = \frac{5040}{2 \times 6} = 420$$

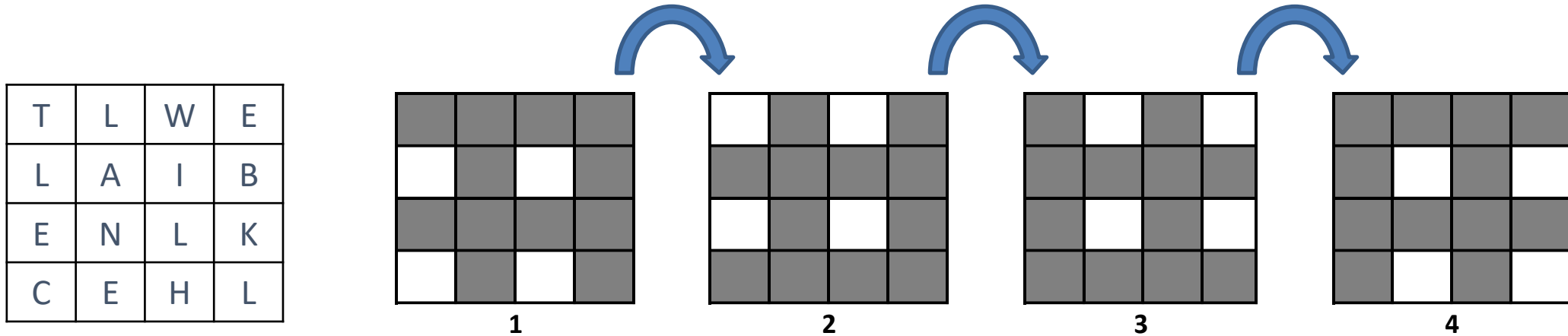


Die Skytale:





Die Fleißnersche Schablone:





Klassische Verfahren der Kryptographie: Substitutionsverfahren

Die monoalphabetische Substitution:

| Caesar - Verschiebung um 5 | |
|----------------------------|---|
| Klartextalphabet | a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z |
| Geheimtextalphabet | F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z A B C D E |

| ROT 13 | |
|--------------------|---|
| Klartextalphabet | a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z |
| Geheimtextalphabet | N O P Q R S T U V W X Y Z A B C D E F G H I J K L M |

| Atbash | |
|--------------------|---|
| Klartextalphabet | a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z |
| Geheimtextalphabet | Z Y X W V U T S R Q P O N M L K J I H G F E D C B A |

| Allgemein | |
|--------------------|---|
| Klartextalphabet | a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z |
| Geheimtextalphabet | W U E G H J M B X D N S Q A Y K R V L C Z O P I T F |



Klassische Verfahren der Kryptographie: Substitutionsverfahren

Die monoalphabetische Substitution:

Bei der Substitution können anstatt Buchstaben natürlich auch Zahlen verwendet werden.

| Substitution durch Zahlen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Klartextalphabet | | a | b | c | d | e | f | g | h | i | j | k | l | m | n | o | p | q | r | s | t | u | v | w | x | y | z |
| Geheimtextalphabet | | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |

Es können auch beliebig andere Zeichen verwendet werden. Zum Beispiel selbstausgedachte Zeichen.

| Substitution durch Zeichen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Klartextalphabet | | a | b | c | d | e | f | g | h | i | j | k | l | m | n | o | p | q | r | s | t | u | v | w | x | y | z |
| Geheimtextalphabet | | ☪ | ♂ | ♂ | ♂ | ☺ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ | ♂ |



Klassische Verfahren der Kryptographie: Substitutionsverfahren

Die polyalphabetische Substitution:

Vigenère-Verschlüsselung

| | | | | | | | | | |
|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Klartext: | R | H | A | B | A | R | B | E | R |
| Schlüssel: | B | E | R | L | I | N | B | E | R |
| Geheimtext: | S | L | R | M | I | E | C | I | I |

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z |
| B | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A |
| C | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B |
| D | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C |
| E | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D |
| F | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E |
| G | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F |
| H | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G |
| I | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H |
| J | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
| K | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
| L | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K |
| M | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L |
| N | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M |
| O | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N |
| P | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O |
| Q | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P |
| R | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q |
| S | S | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R |
| T | T | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S |
| U | U | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T |
| V | V | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U |
| W | W | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V |
| X | X | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W |
| Y | Y | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X |
| Z | Z | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y |



Klassische Verfahren der Kryptographie: Substitutionsverfahren



Die ENIGMA



Die ENIGMA: polyalphabetisches Substitutionsverfahren

Die ENIGMA (griechisch αἴνιγμα ainigma "Rätsel") ist eine Rotor-Schlüsselmachine, die im Zweiten Weltkrieg zur Verschlüsselung des Nachrichtenverkehrs des deutschen Militärs verwendet wurde.

Trotz vieler Verbesserungen der Verschlüsselungsqualität der Maschine vor und während des Krieges gelang es den Alliierten mit hohem personellem und maschinellem Aufwand, die deutschen Funksprüche nahezu kontinuierlich zu entziffern (Polnische Kryptographen knackten die frühe Enigma 1932. Alan Turing entwickelte in Bletchley Park Maschinen zur systematischen Entzifferung.).



Klassische Verfahren der Kryptographie: Spezialfall

Homophone Verschlüsselung:

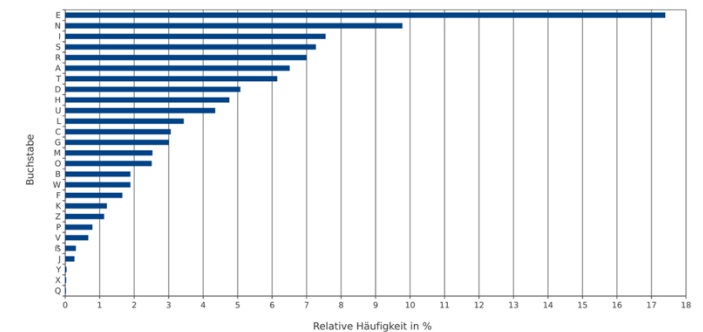
| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 23 | 27 | 54 | 02 | 06 | 17 | 31 | 01 | 05 | 84 | 92 | 04 | 34 | 11 | 47 | 28 | 03 | 18 | 09 | 14 | 00 | 51 | 77 | 70 | 19 | 67 |
| 26 | 65 | 90 | 07 | 10 | 78 | 38 | 08 | 16 | | | 46 | 96 | 24 | 79 | | | 30 | 22 | 35 | 20 | | | | | |
| 36 | | | 41 | 12 | | 64 | 13 | 21 | | | 87 | | 29 | | | | 45 | 32 | 43 | 57 | | | | | |
| 56 | | | 58 | 15 | | | 52 | 25 | | | | | 40 | | | | 60 | 50 | 55 | 98 | | | | | |
| 82 | | | 88 | 33 | | | 62 | 44 | | | | | 49 | | | | 68 | 66 | 75 | | | | | | |
| 93 | | | | 37 | | | | 59 | | | | | 61 | | | | 74 | 80 | 83 | | | | | | |
| | | | | 39 | | | | 81 | | | | | 69 | | | | 99 | 94 | | | | | | | |
| | | | | 42 | | | | 89 | | | | | 73 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 48 | | | | | | | | | 85 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 53 | | | | | | | | | 91 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 63 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 71 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 72 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 76 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 86 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 95 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 97 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6 | 2 | 2 | 5 | 17 | 2 | 3 | 5 | 8 | 1 | 1 | 3 | 2 | 10 | 2 | 1 | 1 | 7 | 7 | 6 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
|---|---|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

 = 100

| Platz | Buchstabe | Relative Häufigkeit | Platz | Buchstabe | Relative Häufigkeit |
|-------|-----------|---------------------|-------|-----------|---------------------|
| 1. | E | 17,40 % | 15. | O | 2,51 % |
| 2. | N | 9,78 % | 16. | B | 1,89 % |
| 3. | I | 7,55 % | 17. | W | 1,89 % |
| 4. | S | 7,27 % | 18. | F | 1,66 % |
| 5. | R | 7,00 % | 19. | K | 1,21 % |
| 6. | A | 6,51 % | 20. | Z | 1,13 % |
| 7. | T | 6,15 % | 21. | P | 0,79 % |
| 8. | D | 5,08 % | 22. | V | 0,67 % |
| 9. | H | 4,76 % | 23. | ß | 0,31 % |
| 10. | U | 4,35 % | 24. | J | 0,27 % |
| 11. | L | 3,44 % | 25. | Y | 0,04 % |
| 12. | C | 3,06 % | 26. | X | 0,03 % |
| 13. | G | 3,01 % | 27. | Q | 0,02 % |
| 14. | M | 2,53 % | | | |

Buchstabenhäufigkeiten in deutschsprachigen Texten





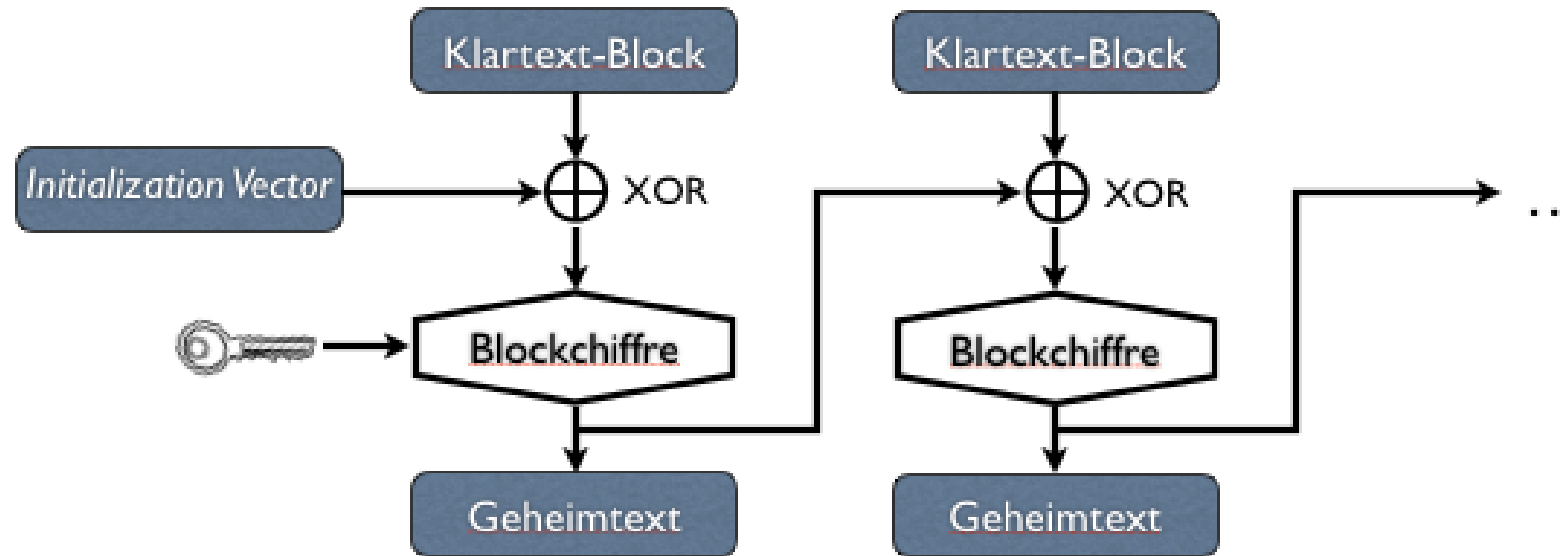
Blockchiffre:

Bei einer Blockchiffre werden nicht einzelne Zeichen verschlüsselt, sondern Blöcke. Die Blockgröße kann variieren - meistens beträgt sie aber 64 Bit.

In der Praxis bedeutet dies, dass ein Klartext zunächst binär umgewandelt werden muss. Diese Binärdarstellung wird dann in 64 Bit Blöcke aufgeteilt.



Blockchiffre (Beispiel Cypher Block Chaining = CBC):



00110001
00110010
00110011
00110100
01100001
01100010
01100011
01100100

Lokale Dateien verschlüsseln



Verschlüsselung einzelner Dateien mit zum Beispiel:

- ZIP (7-Zip)
- GnuPGP (gpg)
- Conpal LAN Crypt 2Go (<https://conpal.de/2Go>)
- Hat.sh - auch nur im Browser (<https://hat.sh>)

Nur einzelne Dateien werden verschlüsselt. Außer bei GPG ist ein Schlüsselaustausch für den Austausch mit Anderen notwendig. Keine Installation bei Crypt 2Go und Hat.sh erforderlich.



Verschlüsselung von Emails und Dateien mit zum Beispiel:

- Alle zur Dateiverschlüsselung geeigneten Tools (als Anhang)
- OpenPGP
- S/MIME

Wenn nur der Anhang verschlüsselt werden soll, reichen die Tools aus der vorherigen Kategorie (Dateiverschlüsselung) aus. Ansonsten kommt es drauf an, was der Mail-Client (MUA) unterstützt. Thunderbird zum Beispiel unterstützt OpenPGP und S/MIME. Im Firmen und Behördenumfeld wird eher S/MIME eingesetzt, im privaten Umfeld eher OpenPGP.



Verschlüsselung eines Containers mit zum Beispiel:

- VeraCrypt
- Cryptomator
- BitLocker
- LUKS (nur Linux)

Ein Container ist eine Datei, die sich als Laufwerk oder Verzeichnis darstellt. Alle Dateien, die in diesen Container kopiert oder verschoben werden, werden automatisch verschlüsselt. Microsofts Virtual Hard Disk (VHD/VHDX) und Mac OS Images (.dmg) sind nur Container, die aber mit anderen Tools verschlüsselt werden können, zum Beispiel BitLocker (bei VHD/VHDX). Bei den Mac OS Images kann beim erstellen optional eine Verschlüsselung auswählen.



Verschlüsselung einer Partition oder Festplatte mit zum Beispiel:

- Bitlocker
- Mac OS FileVault
- LUKS (nur Linux)
- VeraCrypt

Um ganze Partitionen oder Festplatten zu verschlüsseln, bringen viele Betriebssystemvarianten bereits die entsprechenden Tools mit, Windows allerdings nur in den Pro und Enterprise Versionen. Alternativ können Tools von Drittanbietern verwendet werden, wie zum Beispiel das kostenlose VeraCrypt. Zur Erhöhung der Sicherheit sollte in der Pre-Boot Authentication Phase (PBA) ein Passwort oder eine PIN abgefragt werden.

Anmerkungen oder Fragen?