

# Übungen - Angewandte Kryptologie

Alexander Weigl      Timmie Yuen      Daniel Wahlscheid  
Thomas Schrader

May 26, 2011

## Contents

|   |          |
|---|----------|
| <b>1. Übung 1</b>   | <b>5</b> |
| 1.1. Aufgabe 1 . . . . .  | 5        |
| 1.2. Aufgabe 2 . . . . .  | 5        |
| a. Beweis: Äquivalenzrelation: $\equiv_n$ . . . . .                         | 5        |
| b. . . . .  | 5        |
| 1.3. . . . .  | 6        |
| a. . . . .  | 6        |
| b. . . . .  | 6        |
| 1.4. . . . .  | 7        |
| <b>2. Übung 2</b>   | <b>9</b> |
| 2.1. Aufgabe 1 . . . . .  | 9        |
| a. Verschiebechiffren . . . . .   | 9        |
| b. Multiplikative Chiffren . . . . .  | 9        |
| c. Tauschchiffren . . . . .   | 9        |
| 2.2. Aufgabe 2 . . . . .  | 10       |
| 2.3. Aufgabe 3 . . . . .  | 11       |
| 2.4. Aufgabe 4 . . . . .  | 12       |
| a. . . . .  | 12       |
| 2.5. Aufgabe 5 . . . . .  | 12       |
| 2.6. Aufgabe 6 . . . . .  | 13       |
| a. Warum gilt für zufällige Texte $I_r = \frac{1}{26} = 0.0385$ ? . . . . . | 13       |
| b. . . . .  | 14       |
| c. . . . .  | 14       |
| 2.7. Übungsaufgabe: One-Time-Pad . . . . .                                  | 14       |
| a. . . . .  | 14       |
| b. . . . .  | 14       |
| c. . . . .  | 14       |

|   |           |
|---|-----------|
| d.  | 15        |
| 2.8. Skytale  | 15        |
| a.  | 15        |
| <b>3. Moderne Symmetrische Chiffren</b>   | <b>16</b> |
| 3.1. Lineare Abbildungen  | 16        |
| 3.2. Feistel-Cipher   | 16        |
| a.  | 16        |
| b.  | 16        |
| 3.3. DES-Details  | 17        |
| a. Zeigen Sie, dass die DES-Expansionspermutation eine lineare Abbildung ist.   | 17        |
| b. Zeigen Sie, dass die DES S-Boxen keine lineare Abbildung sind.   | 18        |
| c. Geben Sie für die DES-Permutation die Zykelschreibweise an.  | 18        |
| d. Zeigen Sie, dass für den DES Schlüssel $K = 0xE0E0E0E0F1F1F1F1$ (inklusive Parity-Bits) alle Rundenschlüssel identisch sind. Warum gilt in diesem Fall $DES(K, DES(K, M)) = M$ (d.h. Ver- und Entschlüsselung sind identisch)?   | 18        |
| 3.4. Meet-in-the-Middle-Angriff auf 3DES  | 18        |
| 3.5. Übungsaufgabe: Rechnen in $GF(2^3)$  | 18        |
| a. Berechnen Sie das Produkt der Elemente $5 * 3$ sowie die Summe der Elemente $5 + 3$ für das Modularpolynom $M(x) = x^3 + x + 1$ .  | 18        |
| b. Der erweiterte Euklidische Algorithmus kann benutzt werden, um auch für Elemente in einem Erweiterungskörper $GF(2^r)$ multiplikativ inverse Elemente zu berechnen. Das Modularpolynom sei $M(x) = \{100011011\}$ vom Grad $r = 8$ . Dieses Modularpolynom wird auch von AES benutzt. Berechnen Sie zu $a(x) = \{00001101\}$ das multiplikativ inverse Element $a^{-1}(x)$ . | 19        |
| 3.6. Übungsaufgabe: $GF(2^3)$   | 20        |
| a. Finden Sie alle irreduziblen Polynome vom Grad 3 mit Koeffizienten aus $GF(2)$ .   | 20        |
| b. Definieren Sie den Körper mit 8 Elementen, indem Sie ein passendes irreduzibles Polynom und die Verknüpfungstabellen für Addition und Multiplikation angeben.  | 20        |
| 3.7. AES-MixColumns-Beispiel  | 20        |
| a. Berechnen Sie, in was die Spalte $(d4, bf, 4d, 30)$ durch MixColumns transformiert wird.   | 20        |
| b. Überprüfen Sie das Ergebnis, indem das Ergebnis mit der Inversen Matrix multiplizieren und wieder die Ausgangsspalte erhalten. Hinweis: Die inverse Matrix finden Sie in FIPS 197.   | 20        |
| 3.8. Multiplikation mit $x$ in AES  | 20        |
| 3.9. A5/1   | 20        |
| a.  | 20        |
| b.  | 20        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.10. RC4 . . . . .  | 23        |
| a. Listen Sie die Permutation $S$ nach der Initialisierung auf. . . . .  | 25        |
| b. Generieren Sie 100 Schlüsselbytes. . . . .  | 26        |
| c. Listen Sie die Permutation $S$ erneut auf. . . . .  | 26        |
| <b>4. Hashfunktionen und MACs</b>  | <b>27</b> |
| 4.1. Funktionsweise von Hash-Funktionen . . . . .  | 27        |
| 4.2. Kollisionen und Preimage-Angriffe . . . . .   | 27        |
| a. Berechnen Sie $H(X)$ für die Nachricht "FHT4ever". Interpretieren Sie dabei jeden Buchstaben als seinen 8 Bit ASCII-Wert. . . . .   | 27        |
| b. Finden Sie eine andere (sinnvolle) Nachricht, die den gleichen Hashwert wie "FHT4ever" hat. . . . .   | 27        |
| c. Gegeben sei $h(X) = 42$ , wobei $X = (X_0, X_1, X_2)$ . Finden Sie ein $Y = (Y_0, Y_1, Y_2)$ mit $X \neq Y \wedge h(Y) = h(X)$ . . . . .  | 27        |
| d. Finden Sie eine weitere Kollision. . . . .  | 27        |
| 4.3. Das Online-Auktionshaus . . . . .   | 28        |
| a. Denken Sie sich ein möglichst einfaches Verfahren aus, das auf einer Hash-Funktion beruht. . . . .  | 28        |
| b. Welche Angriffe gibt es trotzdem noch auf das Verfahren? . . . . .  | 29        |
| 4.4. Datenbankschutz durch Verschlüsselung und Hash-Funktionen . . . . .   | 29        |
| 4.5. kryptologische Absicherung der Prüfungsvorleistung . . . . .  | 30        |
| a. Das Verfahren ist bisher kryptologisch nicht gesichert. Welche Angriffe sind denkbar? . . . . .   | 30        |
| b. Sichern Sie das Verfahren kryptologisch ab. Der Professor soll die "Echtheit" der Bescheinigung möglichst einfach prüfen können. . .  | 31        |
| <b>5. Übungsaufgaben: Asymmetrische Kryptologie</b>  | <b>32</b> |
| 5.1. Rucksack . . . . .  | 32        |
| a. Geben sie den öffentlichen Schlüssel an . . . . .   | 32        |
| b. Verschlüsseln Sie $P = [111000000010]_2$ (Binärdarstellung) im ECB-Modus. . . . .   | 32        |
| c. Finden Sie den Plaintext zum Ciphertext $C = (67, 64)$ . . . . .  | 32        |
| 5.2. RSA auf Nachricht in Blöcken . . . . .  | 32        |
| 5.3. Chinesischer Restsatz . . . . .   | 33        |
| a. Es sei $m = 11, n = 12, a = 3$ und $b = 4$ . Geben Sie ein $x$ an, für das gilt: $x \bmod m = a$ und $x \bmod n = b$ . . . . .  | 33        |
| b. Es sei $m = 11, n = 12, l = 12, a = 3, b = 4$ und $c = 5$ . Geben Sie ein $x$ an, für das gilt: $x \bmod m = a$ und $x \bmod n = b$ und $x \bmod l = c$ . . . . .                             | 33        |
| c. Verallgemeinern Sie den Chinesischer Restsatz: Gesucht ist $x$ mit $(x \bmod m_i) = x_i$ und die passende Berechnungsvorschrift. Wie groß ist die Laufzeit zur Berechnung von $x$ ? . . . . . | 34        |

|  |           |
|--|-----------|
| 5.4. RSA-Low-Exponent-Attack . . . . .   | 34        |
| a. Gg. seien die drei öffentlichen RSA-Schlüssel $(n_1 = 35, e = 3), (n_1 = 35, e = 3), (n_1 = 35, e = 3)$ . Außerdem bekannt ist: $C_{123} = (22, 12, 216)$ . . . . . | 34        |
| b. . . . .   | 36        |
| 5.5. Quadratwurzeln mod $n$ . . . . .  | 36        |
| a. mit chin. Restsatz . . . . .  | 36        |
| b. . . . .   | 36        |
| 5.6. Rabin . . . . .   | 37        |
| a. Wie lauten die möglichen Klartexte? . . . . .   | 37        |
| b. Sie wissen, dass der Klartext in seiner 7-Bit-Binärdarstellung im höchsten Bit eine "1" hat. Welches ist der gesuchte Klartext? . . .                               | 37        |
| 5.7. Elgamal . . . . .   | 37        |
| a. Führen Sie die Verschlüsselung durch. . . . .   | 37        |
| b. Führen Sie die Entschlüsselung des Ciphertexts durch und überprüfen Sie, ob Sie wieder $m$ erhalten. . . . .  | 38        |
| 5.8. Diskrete Exponential-Funktion . . . . .   | 38        |
| 5.9. Primfaktorzerlegung . . . . .   | 39        |
| 5.10. Fermatscher Primzahltest . . . . .   | 39        |
| 5.11. Inverses zu $(n - 1) \bmod n$ . . . . .  | 39        |
| 5.12. $a(n - 1) \bmod n$ . . . . .   | 39        |
| 5.13. $\phi(n)$ für $n < 500$ . . . . .  | 39        |
| a. Berechnen Sie $\phi(n)$ für $n < 500$ und tragen Sie die Werte in einem Graphen . . . . .   | 39        |
| b. Geben Sie eine möglichst genaue obere Schranke für $\phi(n)$ an. . . .  | 39        |
| <b>6. Digitale Signatur und Zertifikate</b> . . . . .  | <b>40</b> |
| 6.1. Keine Signatur mit dem Rucksack . . . . .   | 40        |
| 6.2. RSA-Signatur . . . . .  | 40        |
| a. Berechnen Sie die digitale Unterschrift nach dem RSA-Verfahren. .   | 40        |
| b. Was überträgt der Sender zum Empfänger, wenn er die Nachricht $M$ signiert übertragen will? . . . . .   | 40        |
| c. Verifizieren Sie die Unterschrift. . . . .  | 40        |
| 6.3. Elgamal-Signatur . . . . .  | 40        |
| a. Berechnen Sie die digitale Unterschrift nach dem Elgamal-Verfahren.   | 40        |
| b. Was überträgt der Sender zum Empfänger, wenn er die Nachricht $M$ signiert übertragen will? . . . . .   | 41        |
| c. Verifizieren Sie die Unterschrift. . . . .  | 41        |
| d. Länge der Passphrase für digitale Signatur . . . . .  | 41        |
| 6.4. GPG . . . . .   | 41        |
| 6.5. Signierung eines Java-Applets . . . . .   | 41        |
| 6.6. PDF-Signatur . . . . .  | 41        |

# 1. Übung 1

## 1.1. Aufgabe 1

| Chiffre | Alphabet          | Geheimtext        | Schlüsselraum             | Länge    |
|---------|-------------------|-------------------|---------------------------|----------|
| Caesar  | $\{A, \dots, Z\}$ | $\{A, \dots, Z\}$ | $\{3\}, \{1, \dots, 25\}$ | 4,64     |
| OTP     | $\{0, 1\}$        | $\{0, 1\}$        | $\{0, 1\}^*$              | $\infty$ |
| DES     | $\{0, 1\}$        | $\{0, 1\}$        | $\{0, 1\}^{56}$           | 56       |

## 1.2. Aufgabe 2

### a. Beweis: Äquivalenzrelation: $\equiv_n$

**Reflexivität**  $\forall x : x \equiv_n x$

$$x \bmod n \equiv r = x \bmod n \Rightarrow x \equiv_n x \quad (1)$$

#

**Symmetrie**  $\forall x, y : x \equiv_n y \Rightarrow y \equiv_n x$

$$\begin{aligned} x \equiv_n y \bmod n \Rightarrow x \bmod n = r = y \bmod n \\ \Rightarrow y \bmod n = x \bmod n \Rightarrow y \equiv_n x \end{aligned}$$

#

**Transitivität**  $\forall x, y, z : x \equiv_n y, y \equiv_n z \Rightarrow x \equiv_n z$

$$\begin{aligned} n.V. x \bmod n = r_x, \\ y \bmod n = r_y \\ z \bmod n = r_z \wedge r_x = r_y, r_y = r_z \Rightarrow \\ r_x = r_z \Rightarrow x \equiv_n z \bmod n \end{aligned}$$

#

### b.

**z. Z.**  $[i]_n + [j]_n = [i + j]_n$

$$\text{Sei } a, b \in \mathbb{Z} \Rightarrow a = q_a n + r_a, b = q_b n + r_b$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow a &\in [r_a]_n, b \in [r_b]_n \\ \Rightarrow [r_a]_n + [r_b]_n &= \{\forall i : in(r_a + r_b)\} \\ \Rightarrow a + b &= q_a n + r_a + q_b n + r_b \\ &\equiv_n n(q_a + q_b) + r_a + r_b \\ &\equiv_n r_a + r_b \Rightarrow [r_a + r_b]_n \end{aligned}$$

$$\mathbf{z. Z.} \quad [i]_n \cdot [j]_n = [i \cdot j]_n$$

$$\text{Sei } a, b \in \mathbb{Z} \Rightarrow a = q_a n + r_a, b = q_b n + r_b$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow a &\in [r_a]_n, b \in [r_b]_n \\ \Rightarrow [r_a]_n * [r_b]_n &= \{\forall i : in(r_a * r_b)\} \\ \Rightarrow a * b &\equiv_n (q_a n + r_a) * (q_b n + r_b) \\ &\equiv_n q_a q_b n + q_a n r_b + q_b n r_a + r_a * r_b \\ &\equiv_n n(q_a q_b + q_a r_b + q_b r_a) + r_a * r_b \\ &\equiv_n r_a * r_b = [r_a * r_b]_n \end{aligned}$$

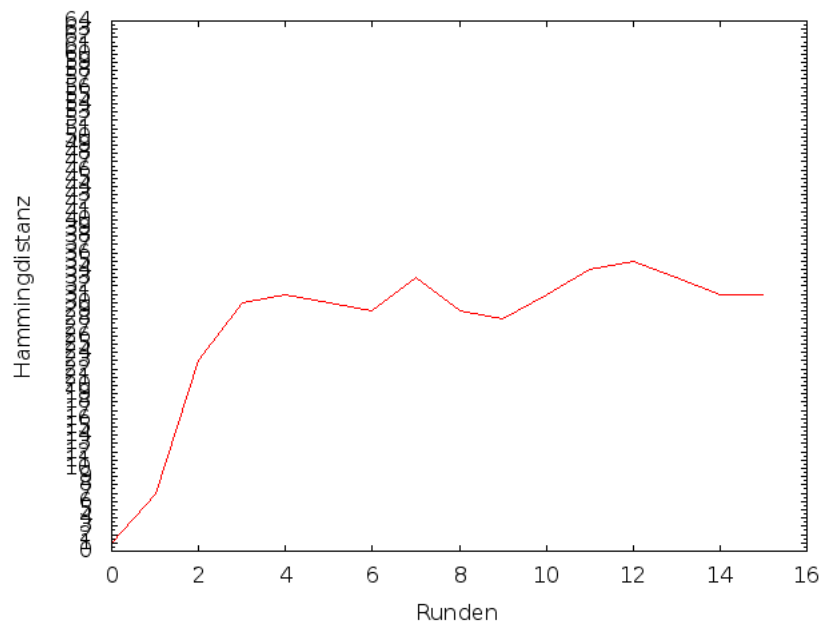
### 1.3.

a.

$$\begin{aligned} (23.145 \cdot 12.479 + 14.543) \cdot 5 &\equiv_9 3 \\ (6 \cdot 5 + 8) \cdot 5 &\equiv_9 3 \\ 8 \cdot 5 &\equiv_9 3 \\ 2 \cdot 5 &\equiv_9 10 = 1 \pmod{9} \end{aligned}$$

b.

$$\begin{aligned} 123 \cdot (123.983 \cdot 789.345 + 676.345) &\equiv_{11} 11 \\ 2 \cdot (2 \cdot 7 + 10) &\equiv_{11} 11 \\ 2 \cdot (14 + 10) &\equiv_{11} 4 \pmod{11} \end{aligned}$$

**1.4.**

| Round $k$ | $HD(M_k, M_k)$ | $HD(M_{1_k}, M_{1_k})$ | $HD(M_{1_k}, M_{1_k})$ |
|-----------|----------------|------------------------|------------------------|
| 0         | 1              | 39                     | 35                     |
| 1         | 7              | 35                     | 31                     |
| 2         | 23             | 32                     | 33                     |
| 3         | 30             | 36                     | 35                     |
| 4         | 31             | 37                     | 34                     |
| 5         | 30             | 31                     | 34                     |
| 6         | 29             | 26                     | 30                     |
| 7         | 33             | 26                     | 26                     |
| 8         | 29             | 29                     | 26                     |
| 9         | 28             | 29                     | 34                     |
| 10        | 31             | 25                     | 36                     |
| 11        | 34             | 28                     | 35                     |
| 12        | 35             | 30                     | 38                     |
| 13        | 33             | 29                     | 37                     |
| 14        | 31             | 32                     | 38                     |
| 15        | 31             |                        |                        |



## 2. Übung 2

### 2.1. Aufgabe 1

#### a. Verschiebechiffren

$$E_1 : z \mapsto (z + k_1) \mod n \quad (2)$$

$$E_2 : z \mapsto (z + k_2) \mod n \quad (3)$$

Dann wäre die Verkettung  $E_2 \circ E_1$  :

$$E_2 \circ E_1 = E_2(E_1(z)) = (((z + k_1) \mod n) + k_2) \mod n \quad (4)$$

$$= z + \underbrace{k_1 + k_2}_{k_3} \mod n \quad (5)$$

$$= z + k_3 \mod n = E_3(z) \quad (6)$$

Wir folgern daraus, dass eine Verkettung von zwei Verschiebechiffren keine zusätzlichen Gewinn bringt.

#### b. Multiplikative Chiffren

$$E_1 : z \mapsto (z \cdot t_1) \mod n \quad (7)$$

$$E_2 : z \mapsto (z \cdot t_2) \mod n \quad (8)$$

Dann wäre die Verkettung  $E_2 \circ E_1$  :

$$E_2 \circ E_1 = E_2(E_1(z)) = (((z \cdot t_1) \mod n) \cdot t_2) \mod n \quad (9)$$

$$= z \cdot \underbrace{t_1 \cdot t_2}_{t_3} \mod n \quad (10)$$

$$= z \cdot t_3 \mod n = E_3(z) \quad (11)$$

Wir folgern daraus, dass eine Verkettung von zwei Multiplikativen Chiffren keine zusätzlichen Gewinn bringt.

#### c. Tauschchiffren

$$E_1 : z \mapsto (z \cdot t_1 + k_1) \mod n \quad (12)$$

$$E_2 : z \mapsto (z \cdot t_2 + k_2) \mod n \quad (13)$$

Dann wäre die Verkettung  $E_2 \circ E_1$  :

$$E_2 \circ E_1 = E_2(E_1(z)) = ((z \cdot t_1 + k_1) \mod n) \cdot t_2 + k_2 \mod n \quad (14)$$

$$= z \cdot \underbrace{t_1 \cdot t_2}_{t_3} + \underbrace{k_1 \cdot t_2 + k_2}_{k_3} \mod n \quad (15)$$

$$= z \cdot t_3 + k_3 \mod n = E_3(z) \quad (16)$$

Wir folgern daraus, dass eine Verkettung von zwei Tauschchiffren keine zusätzlichen Gewinn bringt.

## 2.2. Aufgabe 2

**Berechnen Sie die multiplikativen Inverse zu 3, 5 und 22 in  $Z_{23}$ .**

$$23 = 7 \cdot 3 + 2$$

$$3 = 1 \cdot 2 + 1$$

$$2 = 2 \cdot 1 + 0$$

$$1 = 3 - 2$$

$$1 = 3 - (23 - 7 \cdot 3) =$$

$$1 = \underline{8} \cdot -1 \cdot 23$$

$$23 = 1 \cdot 15 + 8$$

$$15 = 1 \cdot 8 + 7$$

$$8 = 1 \cdot 7 + 1$$

$$7 = 7 \cdot 1 + 0$$

$$1 = 8 - 7$$

$$1 = (23 - 15) - (15 - 8)$$

$$1 = (23 - 15) - (15 - (23 - 15))$$

$$1 = 23 - 15 - 15 + 23 - 15$$

$$1 = \underbrace{-3}_{20} \cdot 15 + 2 \cdot 23$$

$$23 = 1 \cdot 22 + 1$$

$$22 = 22 \cdot 1 + 0$$

$$1 = 1 \cdot 23 \underbrace{-1}_{22} \cdot 22$$

**Berechnen Sie die multiplikativen Inversen zu 3, 15 und 22 in  $Z_{24}$ .**

$$\begin{aligned} 24 &= 3 \cdot 8 + 0 \\ \Rightarrow \neg \exists \text{ multiplikatives Inverses} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 24 &= 1 \cdot 15 + 9 \\ 15 &= 1 \cdot 9 + 6 \\ 9 &= 1 \cdot 6 + 3 \\ 6 &= 2 \cdot 3 + 0 \\ \Rightarrow \neg \exists \text{ multiplikatives Inverses} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 24 &= 1 \cdot 22 + 2 \\ 22 &= 11 \cdot 2 + 0 \\ \Rightarrow \neg \exists \text{ multiplikatives Inverses} \end{aligned}$$

**Zeigen Sie, dass  $(n-1)$  in  $Z_n$  bzgl. der Multiplikation zu sich selbst invers ist.**

$$(n-1) \cdot (n-1) \equiv_n n^2 - 2n + 1 \quad (17)$$

$$\equiv_n 1 \pmod{n} \quad (18)$$

### 2.3. Aufgabe 3

Alphabet: ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ Alphabet: UEBRDNWOLKMSIFHTACGJPQVXYZ

Wind Nord-Ost, Startbahn null-drei,  
 Bis hier hör ich die Motoren.  
 Wie ein Pfeil zieht sie vorbei,  
 Und es dröhnt in meinen Ohren.  
 Und der nasse Asphalt bebt,  
 Wie ein Schleier staubt der Regen,  
 Bis sie abhebt und sie schwebt  
 Der Sonne entgegen.  
 Über den Wolken

Muß die Freiheit wohl grenzenlos sein.  
 Alle Ängste, alle Sorgen, sagt man,  
 Blieben darunter verborgen und dann  
 Würde, was hier gross und wichtig erscheint,  
 Plötzlich nichtig und klein.

## 2.4. Aufgabe 4

a.

Die Playfair-Verschlüsselung stellt eine Substitution für Buchstaben-Paare dar. Es handelt sich um eine bigraphische monoalphabetische Methode. Ähnlich wie bei der einfachen (monographischen) Buchstabensubstitution, beruhen Methoden zur Entzifferung von Playfair im Wesentlichen auf einer Analyse der Häufigkeitsverteilung hier der Buchstabenpaare (Bigramme). In der deutschen Sprache beispielsweise sind die Bigramme "er", "en" und "ch" sehr häufig. Im Beispieltext fallen die "Doppler" (also Bigramm-Wiederholungen) ME...ME, IK...IK, QC...QC und TE...TE sowie die "Reversen" (Wiederholung eines umgedrehten Bigramms) CQ...CQ auf, die sich in gleicher Weise im englischen Klartext wiederfinden. Da kein Buchstabe mit sich selbst gepaart wird, gibt es nur 600 ( $25 \times 24$ ) mögliche Buchstabenkombinationen, die substituiert werden. Überdies gibt es eine Reihe von Symmetrien, die teilweise schon am obigen Beispieltext erkannt werden können. So hilft der erwähnte Klartext-Geheimtext-Zusammenhang  $EL \leftrightarrow CQ$  und  $LE \leftrightarrow QC$  beim Bruch des Textes. Ist nämlich ein Bigramm geknackt, dann ist auch sofort das reverse (umgedrehte) Bigramm bekannt. In den Fällen des Überkreuz-Schrittes gibt es darüber hinaus noch weitere Beziehungen zwischen den vier auftretenden Buchstaben in der Art (vgl. beispielsweise obere linke Ecke des Quadrats)  $DC \leftrightarrow EB$ ,  $CD \leftrightarrow BE$ ,  $EB \leftrightarrow DC$  sowie  $BE \leftrightarrow CD$ , die der Angreifer zur Entzifferung ausnutzen kann. Ferner hat auch die geschilderte Methode zur Erzeugung des Playfair-Quadrats Schwächen, denn es endet häufig – wie auch im Beispiel – auf "XYZ". Die Playfair-Verschlüsselung ist somit weit entfernt von einer allgemeinen bigraphischen Methode mit völlig willkürlicher Zuordnung der Buchstabenpaare und stellt in der heutigen Zeit kein sicheres Verschlüsselungsverfahren mehr dar. So lassen sich mit modernen Mitteln auch relativ kurze Playfair-Texte in sehr kurzer Zeit brechen.

## 2.5. Aufgabe 5

Herleitung des Gleichungssystems:

$$Hx_1 + Ix_2 = \ddot{A} \qquad Lx_1 + Lx_2 = U \qquad (19)$$

$$Hx_3 + Ix_4 = U \qquad Lx_3 + Lx_4 = K \qquad (20)$$

$$(21)$$

$$\begin{pmatrix} 7 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7 & 8 \\ 11 & 11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 11 & 11 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 26 \\ 20 \\ 20 \\ 10 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 7 & 8 & 0 & 0 & 26 \\ 0 & 0 & 7 & 8 & 20 \\ 11 & 11 & 0 & 0 & 20 \\ 0 & 0 & 11 & 11 & 10 \end{pmatrix} \begin{matrix} \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{matrix} \begin{pmatrix} 7 & 8 & 0 & 0 & 26 \\ 11 & 11 & 0 & 0 & 20 \\ 0 & 0 & 7 & 8 & 20 \\ 0 & 0 & 11 & 11 & 10 \end{pmatrix} \begin{matrix} | \cdot 7^{-1} = 25 \\ | \cdot 11^{-1} = 8 \\ | \cdot 7^{-1} = 25 \\ | \cdot 7^{-1} = 8 \end{matrix} \quad (22)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 26 & 0 & 0 & 12 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 15 \\ 0 & 0 & 1 & 26 & 7 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 22 \end{pmatrix} \begin{matrix} \leftarrow \cdot -1 \\ \leftarrow + \\ \leftarrow \cdot -1 \\ \leftarrow + \end{matrix} \begin{pmatrix} 1 & 26 & 0 & 0 & 12 \\ 0 & 4 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 26 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 22 \end{pmatrix} \begin{matrix} \\ | \cdot 4^{-1} = 22 \\ \\ | \cdot 4^{-1} = 22 \end{matrix} \quad (23)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 26 & 0 & 0 & 12 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 1 & 26 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 11 \end{pmatrix} \begin{matrix} \leftarrow + \\ \leftarrow \cdot -26 \\ \leftarrow + \\ \leftarrow \cdot -26 \end{matrix} \begin{pmatrix} 7 \\ 8 \\ 11 \\ 11 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H \\ I \\ L \\ L \end{pmatrix} \quad (24)$$

**Bildung der Inversen  $K^{-1}$**

$$\begin{pmatrix} 7 & 8 & 1 & 0 \\ 11 & 11 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} | \cdot 7^{-1} = 25 \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{pmatrix} 1 & 26 & 25 & 0 \\ 11 & 11 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \leftarrow \cdot 11^{-1} \\ \leftarrow + \\ \\ \end{matrix} \\ \begin{pmatrix} 1 & 26 & 25 & 0 \\ 0 & 15 & 15 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \leftarrow \cdot 15^{-1} = 2 \\ \leftarrow + \end{matrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 28 & 6 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \end{pmatrix} \\ K^{-1} = \begin{pmatrix} 28 & 6 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \quad (25)$$

**Lösung: HILLSTEINFACHZUKNACKEN**

## 2.6. Aufgabe 6

**a. Warum gilt für zufällige Texte  $I_r = \frac{1}{26} = 0.0385$ ?**

Wirklicher Zufall würde bedeuten dass jeder Buchstaben  $a \in A$  gleich oft im Text vorkommt. Folglich handelt es sich um einen Laplace-Raum (wie beim Würfel) und die Wahrscheinlichkeit für  $P(X = a) = \frac{1}{|A|}$ . In unseren Fall ist  $|A| = 26$ .

b.

c.

**2.7. Übungsaufgabe: One-Time-Pad**

$$P_1 = hike = 001\ 010\ 011\ 000 \quad (26)$$

$$P_2 = rike = 101\ 010\ 011\ 000 \quad (27)$$

$$C = eier = 000\ 010\ 000\ 101 \quad (28)$$

$$K = klet = 011\ 100\ 000\ 111 \quad (29)$$

$$(30)$$

a.

$$001\ 010\ 011\ 000 \text{ xor} \quad (31)$$

$$000\ 010\ 000\ 101 = \quad (32)$$

$$001\ 000\ 011\ 101 = hekr \quad (33)$$

$$101\ 010\ 011\ 000 \text{ xor} \quad (34)$$

$$000\ 010\ 000\ 101 = \quad (35)$$

$$101\ 000\ 011\ 101 = rekr \quad (36)$$

b.

$$001\ 010\ 011\ 000 \text{ xor} \quad (37)$$

$$011\ 100\ 000\ 111 = \quad (38)$$

$$010\ 110\ 011\ 111 = iskt \quad (39)$$

$$101\ 010\ 011\ 000 \text{ xor} \quad (40)$$

$$011\ 100\ 000\ 111 = \quad (41)$$

$$110\ 110\ 011\ 010 = sski \quad (42)$$

c.

wenn  $C_{1_i} = C_{2_i} \Rightarrow P_{1_i} = P_{2_i}$ 

$$C_1 \text{ xor } C_2 = (P_1 \text{ xor } K) \text{ xor } (P_2 \text{ xor } K) = P_1 \text{ xor } P_2 \quad (43)$$

d.

$$K = C_1 \text{ xor } P_1 \quad (44)$$

$$C_2 \text{ xor } K = P_2 \quad (45)$$

## 2.8. Skytale

a.

$$E(k, x_1, \dots, x_{km}) = \quad (46)$$

$$x_1 x_{m+1} x_{2m+1} \dots x_{(k-1)m+1} x_2 x_{m+2} x_{2m+2} \dots x_{(k-1)m+2} \dots x_m x_{2m} x_{3m} \dots x_{km} \quad (47)$$

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_m \\ x_{m+1} & x_{m+2} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{(k-1)m+1} & x_{(k-1)m+2} & \cdots & x_{km} \end{pmatrix} \quad (48)$$

Ist die Klartextlänge kein Vielfaches von  $k$ , so kann der Klartext durch das Ein- bzw. Anfügen von sogenannten Blendern (Füllzeichen) verlängert werden. Damit der Empfänger diese Füllzeichen nach der Entschlüsselung wieder entfernen kann, ist lediglich darauf zu achten, dass sie im Klartext leicht als solche erkennbar sind.

### 3. Moderne Symmetrische Chiffren

#### 3.1. Lineare Abbildungen

#### 3.2. Feistel-Cipher

a.

$F : \{0, 1\}^4 \times \{0, 1\}^4 \rightarrow \{0, 1\}^4$  mit  $F(X, Y) = X \text{ xor } Y$

die Rundenzahl  $n = 2$ ,

der Plaintext  $P = 10011100$  und

die Rundenschlüssel  $K_1 = 0101$  und  $K_2 = 1100$ .

**Berechnen Sie den Ciphertext  $C$ .**

$$L_i = R_{i-1} \quad (49)$$

$$R_i = L_{i-1} \text{ xor } F(R_{i-1}, K_i) \quad (50)$$

| Rnd | $K_i$ | $L_i$ | $R_i$ |
|-----|-------|-------|-------|
| 0   | —     | 1001  | 1100  |
| 1   | 0101  | 1100  | 0000  |
| 2   | 1100  | 0000  | 0000  |

**Berechnen Sie aus  $C$  wieder den Plaintext  $P$ .**

$$R_i = L_{i+1} \quad (51)$$

$$L_i = R_{i+1} \text{ xor } F(R_i, K_{i+1}) \quad (52)$$

| Rnd | $K_i$ | $L_i$ | $R_i$ |
|-----|-------|-------|-------|
| 2   | 1100  | 0000  | 0000  |
| 1   | 0101  | 1100  | 0000  |
| 0   | —     | 1001  | 1100  |

b.

Eine Feistel-Funktion ist definiert durch  $F(X, Y) = X$ . Berechnen Sie den Ciphertext  $C$  in Abhängigkeit von einer beliebigen Rundenzahl  $n$  und dem Plaintext  $P = (L_0, R_0)$

Wie gut ist die dadurch erreichte Verschlüsselung?

| Rnd | $K_i$ | $L_i$              | $R_i$              |
|-----|-------|--------------------|--------------------|
| 0   | —     | $a$                | $b$                |
| 1   | —     | $b$                | $b \text{ xor } a$ |
| 2   | —     | $b \text{ xor } a$ | $a$                |
| 3   | —     | $a$                | $b$                |



$$f(n, (a, b)) = \begin{cases} (a, b), & n \bmod 3 = 0 \\ (b, b \text{ xor } a), & n \bmod 3 = 1 \\ (b \text{ xor } a, a), & n \bmod 3 = 2 \end{cases} \quad (53)$$

### 3.3. DES-Details

a. Zeigen Sie, dass die DES-Expansionspermutation eine lineare Abbildung ist.

$$A = \begin{pmatrix} 31 & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 \\ 15 & 16 & 17 & 18 & 19 & 20 & 19 & 20 & 21 & 22 & 23 & 24 \\ 23 & 24 & 25 & 26 & 27 & 28 & 27 & 28 & 29 & 30 & 31 & 0 \end{pmatrix} \quad (54)$$

Sei  $P \in \mathbb{N}^{32 \times 48}$  die entsprechende Permutationsmatrix für  $A$  und  $f : A^{32} \rightarrow A^{48}$ ,  $x \mapsto P \cdot x$  die Permutationsfunktion.

**zZ: f ist linear**

Sei  $x, y \in A^{32}$  mit  $x = (x_0, x_1, \dots, x_{31})$  und  $y = (y_0, y_1, \dots, y_{31})$  dann ist

$$f(\alpha x) = \begin{pmatrix} \alpha x_{31} & \alpha x_0 & \cdots & \alpha x_8 \\ \alpha x_7 & \alpha x_8 & \cdots & \alpha x_{16} \\ \alpha x_{15} & \alpha x_{16} & \ddots & \vdots \\ \alpha x_{23} & \alpha x_{24} & \cdots & \alpha x_0 \end{pmatrix} \quad (55)$$

$$= \alpha \begin{pmatrix} x_{31} & x_0 & \cdots & x_8 \\ x_7 & x_8 & \cdots & x_{16} \\ x_{15} & x_{16} & \ddots & \vdots \\ x_{23} & x_{24} & \cdots & x_0 \end{pmatrix} \quad (56)$$

$$= \alpha f(x) \quad (57)$$

$$f(x + y) = \begin{pmatrix} x_{31} + y_{31} & x_0 + y_0 & \cdots & x_8 + y_8 \\ x_7 + y_7 & x_8 + y_8 & \cdots & x_{16} + y_{16} \\ x_{15} + y_{15} & x_{16} + y_{16} & \ddots & \vdots \\ x_{23} + y_{23} & x_{24} + y_{24} & \cdots & x_0 + y_0 \end{pmatrix} \quad (58)$$

$$= \begin{pmatrix} x_{31} & x_0 & \cdots & x_8 \\ x_7 & x_8 & \cdots & x_{16} \\ x_{15} & x_{16} & \ddots & \vdots \\ x_{23} & x_{24} & \cdots & x_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_{31} & y_0 & \cdots & y_8 \\ y_7 & y_8 & \cdots & y_{16} \\ y_{15} & y_{16} & \ddots & \vdots \\ y_{23} & y_{24} & \cdots & y_0 \end{pmatrix} \quad (59)$$

$$= f(x) + f(y) \quad (60)$$

#

**b. Zeigen Sie, dass die DES S-Boxen keine lineare Abbildung sind.**

**zZ.**  $S_i$  ist nicht linear. Wir nehmen die S1-Box und sei  $x = 0 \wedge \alpha = 2$

$$S1(\alpha x) = S1(000000_2) \quad (61)$$

$$= 1110_2 = 14_{10} \quad (62)$$

$$\alpha S1(x) = 2 S1(000000_2) \quad (63)$$

$$= 2_{10} * 1110_2 = 28_{10} \quad (64)$$

$$\Rightarrow S1(\alpha x) \neq \alpha S1(x) \quad (65)$$

#

**c. Geben Sie für die DES-Permutation die Zykelschreibweise an.**

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 & 22 \\ 15 & 6 & 19 & 20 & 28 & 11 & 27 & 16 & 0 & 14 & 22 & 25 & 4 & 17 & 30 & 9 & 1 & 7 & 23 & 13 & 31 & 26 & 2 \end{pmatrix} \quad (66)$$

$$\text{Zyklen: } (0\ 15\ 9\ 14\ 30\ 3\ 20\ 31\ 24\ 18\ 23\ 8)(1\ 6\ 27\ 5\ 11\ 25\ 12\ 4\ 28\ 21\ 26\ 29\ 10\ 22\ 2\ 19\ 13\ 17\ 7\ 16) \quad (67)$$

**d. Zeigen Sie, dass für den DES Schlüssel  $K = 0xE0E0E0E0F1F1F1F1$  (inklusive Parity-Bits) alle Rundenschlüssel identisch sind. Warum gilt in diesem Fall  $DES(K, DES(K, M)) = M$  (d.h. Ver- und Entschlüsselung sind identisch)?**

$$K = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{PC1} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (68)$$

Da alle in den folgenden Runden lediglich zu Spaltentransposition kommt und jede Spalte gleich sind, sind alle  $C_i, D_i$  für alle  $1 \leq i \leq 16$ .

### 3.4. Meet-in-the-Middle-Angriff auf 3DES

### 3.5. Übungsaufgabe: Rechnen in $GF(2^3)$

**a. Berechnen Sie das Produkt der Elemente  $5 * 3$  sowie die Summe der Elemente  $5 + 3$  für das Modularpolynom  $M(x) = x^3 + x + 1$ .**

$$5 = 101, \quad 3 = 011$$

**Summe:**  $101 \text{ xor } 011 = 110 = 6$

**Produkt:**

$$101 \cdot 011 = 1111 \quad (69)$$

$$1111 \text{ xor } 1011 = 100 = 4 \quad (70)$$

- b. Der erweiterte Euklidische Algorithmus kann benutzt werden, um auch für Elemente in einem Erweiterungskörper  $GF(2^r)$  multiplikativ inverse Elemente zu berechnen. Das Modularpolynom sei  $M(x) = \{100011011\}$  vom Grad  $r = 8$ . Dieses Modularpolynom wird auch von AES benutzt. Berechnen Sie zu  $a(x) = \{00001101\}$  das multiplikativ inverse Element  $a^{-1}(x)$ .**

$$M(x) = 111000 \cdot a(x) + 11$$

$$a(x) = 100 \cdot 11 + 1$$

$$1 = a(x) + 100 \cdot 11 \quad (71)$$

$$= a(x) + 100 \cdot (M(x) + 111000 \cdot a(x)) \quad (72)$$

$$= a(x) + 100 \cdot M(x) + 111000 \cdot 100 \cdot a(x) \quad (73)$$

$$= a(x) + 11100000 \cdot a(x) \quad (74)$$

$$= 11100001 \cdot a(x) \quad (75)$$

$$\rightarrow a^{-1}(x) = 11100001 = x^7 + x^6 + x^5 + 1 = 225 \quad (76)$$

**Nebenrechnungen:**

*1.Reihe*

100011011

1101

1011

1101

1101

1101

000

$$r = 11 \quad q = 111000$$

$$110100000 + 11010000 + 1101000 = 1101 * (x^5 + x^4 + x^3) = 1101 * 111000$$

*2.Reihe*

1101

11

$$r = 1 \quad q = 100$$

### 3.6. Übungsaufgabe: $GF(2^3)$

- Finden Sie alle irreduziblen Polynome vom Grad 3 mit Koeffizienten aus  $GF(2)$ .
- Definieren Sie den Körper mit 8 Elementen, indem Sie ein passendes irreduzibles Polynom und die Verknüpfungstabellen für Addition und Multiplikation angeben.

### 3.7. AES-MixColumns-Beispiel

- Berechnen Sie, in was die Spalte  $(d4, bf, 4d, 30)$  durch MixColumns transformiert wird.
- Überprüfen Sie das Ergebnis, indem das Ergebnis mit der Inversen Matrix multiplizieren und wieder die Ausgangsspalte erhalten. Hinweis: Die inverse Matrix finden Sie in FIPS 197.

### 3.8. Multiplikation mit $x$ in AES

### 3.9. A5/1

$$X = (x_0, x_1, \dots, x_{18}) = (1010101010101010101) \quad (77)$$

$$Y = (y_0, y_1, \dots, y_{21}) = (1100110011001100110011) \quad (78)$$

$$Z = (z_0, z_1, \dots, z_{22}) = (11100001111000011110000) \quad (79)$$

---

```

while True do
    m = maj(x8, y10, z10);
    if x8 = m then
        t = x13 xor x16 xor x17 xor x18;
        shift t into X;
    if y10 = m then
        t = y20 xor y21;
        shift t into Y;
    if z10 = m then
        t = z7 xor z20 xor z21 xor z22;
        shift t into Y;
    ki = x18 xor y21 xor z22;

```

---

a.

| Rnd | $x_8$ | $y_{10}$ | $z_{10}$ | m | $X'$                 | $Y'$                    | $Z'$                     | Bit |
|-----|-------|----------|----------|---|----------------------|-------------------------|--------------------------|-----|
| 1   | 1     | 0        | 1        | 1 | 01010101010101010101 | 1100110011001100110011  | 011100001111000011110000 | 1   |
| 2   | 0     | 0        | 1        | 0 | 00101010101010101010 | 01100110011001100110011 | 011100001111000011110000 | 0   |
| 3   | 1     | 1        | 1        | 1 | 10010101010101010101 | 00110011001100110011001 | 101110000111100001111000 | 0   |

b.

```

package ueb4;

public class A51 {
    ShiftRegister x, y, z;

    public A51() {
        x = new ShiftRegister(19, 349525);
        y = new ShiftRegister(22, 3355443);
        z = new ShiftRegister(23, 7401712);
    }

    public int maj(int i, int j, int k) {
        if ((i == 0 && j == 0) || (j == 0 && k == 0) || (i == 0 && k == 0))
            return 0;
        return 1;
    }

    public int next() {
        System.out.format("\t%d_%d_%d\n", x.get(8), y.get(10), z.get(10));
        int m = maj(x.get(8), y.get(10), z.get(10));

        System.out.println("M:" + m);

        if (m == x.get(8)) {
            int t = x.get(13) ^ x.get(16) ^ x.get(17) ^ x.get(18);
            x.push(t);
        }
        if (m == y.get(10)) {
            int t = y.get(20) ^ y.get(21);
            y.push(t);
        }

        if (m == z.get(10)) {
            int t = z.get(7) ^ z.get(20) ^ x.get(21) ^ x.get(22);
            z.push(t);
        }
        return (x.get(18) ^ y.get(21) ^ z.get(22));
    }

    @Override
    public String toString() {
        return "x:_ " + x + "\ny:_ " + y + "\nz:_ " + z;
    }
}

```

```
public static void main(String[] args) {
    A51 c = new A51();

    System.out.println(c);

    for (int i = 0; i < 3; i++) {
        System.out.println(c.next());
        System.out.println(c);
    }
    System.out.println();
}

private static void checkBin(int i) {
    if (i != 0 && i != 1)
        throw new IllegalArgumentException();
}

class ShiftRegister {
    int reg;
    final int size;

    public ShiftRegister(int size, int content) {
        if (size >= 64)
            throw new IllegalArgumentException();
        this.size = size;
        reg = content;
    }

    public void push(int t) {
        checkBin(t);
        reg = (reg << 1) + t;
    }

    public int get(int i) {
        return (int) ((reg >> i) & 1);
    }

    @Override
    public String toString() {
        StringBuilder b = new StringBuilder();
        for (int i = 0; i < size; i++) {
            b.append(get(i));
        }
        return b.toString();
    }
}
```

```

    }
  }
}

```

### 3.10. RC4

```

package ueb4;

import java.util.Arrays;

import com.panayotis.gnuplot.*;
import com.panayotis.gnuplot.plot.*;
import com.panayotis.gnuplot.style.*;
import com.panayotis.gnuplot.terminal.*;

public class RC4 {
    int[] k, s = new int[256];
    byte L;

    public RC4(int[] k2) {
        this.k = k2;
        L = (byte) k2.length;
        init();
    }

    private void init() {
        for (int i = 0; i < s.length; i++) {
            s[i] = (i % 256);
            assert s[i] >= 0;
        }
        int j = 0;
        for (int i = 0; i < s.length; i++) {
            j = (j + s[i] + k[i % L]) % 256;
            swap(s, j, i);
        }
    }

    private void swap(int[] b, int j, int i) {
        int t = b[i] % 256;
        b[i] = b[j];
        b[j] = t;
    }

    public void next(int[] ciph) {

```

```

        int i = 0, j = 0;
        for (int n = 0; n < ciph.length; n++) {
            i = (i + 1) % 256;
            j = (j + s[i]) % 256;
            swap(s, i, j);
            int rand = s[(s[i] + s[j]) % 256];
            ciph[n] = rand;
        }
    }

    @Override
    public String toString() {
        return Arrays.toString(s);
    }

    private static void plot(String file, int k[]) {
        JavaPlot plot = new JavaPlot();
        double[][] data = new double[k.length][2];
        for (int i = 0; i < k.length; i++) {
            data[i][0] = i;
            data[i][1] = k[i];
        }

        plot.setTitle("Chaos_of_Perumation");
        plot.setTerminal(new FileTerminal("pdf", file));

        DataSetPlot dataP = new DataSetPlot(data);
        PlotStyle ps = new PlotStyle(Style.POINTS);
        ps.setLineType(NamedPlotColor.DARKRED);
        dataP.setPlotStyle(ps);
        dataP.setTitle("");
        plot.addPlot(dataP);

        FunctionPlot dataL = new FunctionPlot("x");
        PlotStyle rp = new PlotStyle(Style.LINES);
        rp.setLineType(NamedPlotColor.GRAY);
        rp.setLineWidth(3);
        dataL.setPlotStyle(rp);
        dataL.setTitle("");
        plot.addPlot(dataL);

        plot.getAxis("x").setLabel("array_position");
        plot.getAxis("x").setBoundaries(0, k.length);
        plot.getAxis("y").setLabel("array_value");
    }

```



```

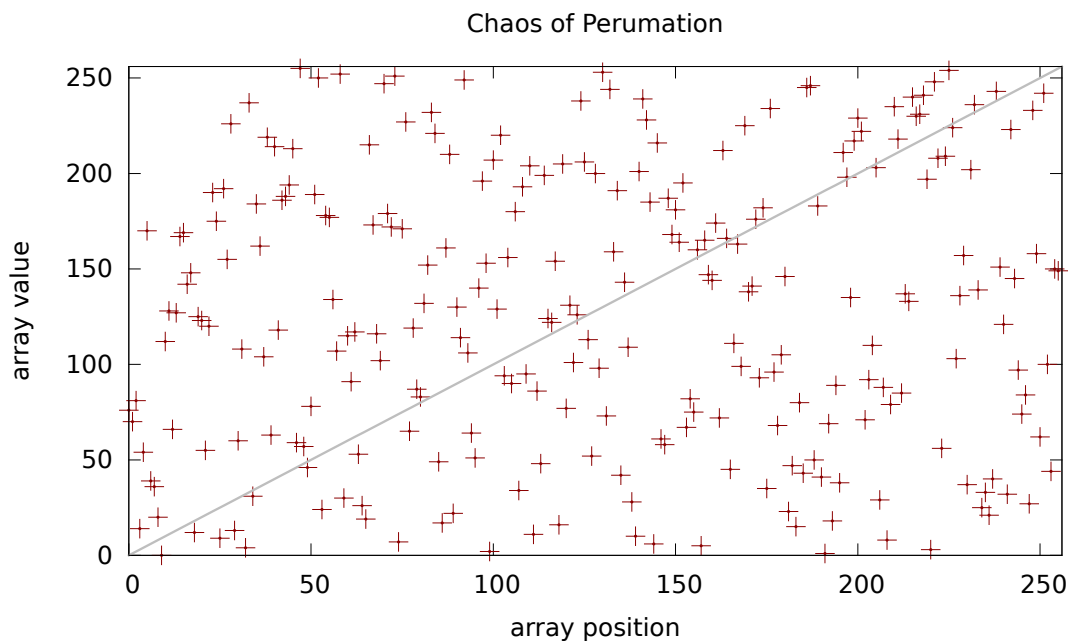
        plot.getAxis("y").setBoundaries(0, k.length);

        // GNUPlot.getDebugger().setLevel(Debug.VERBOSE);
        plot.plot();
    }

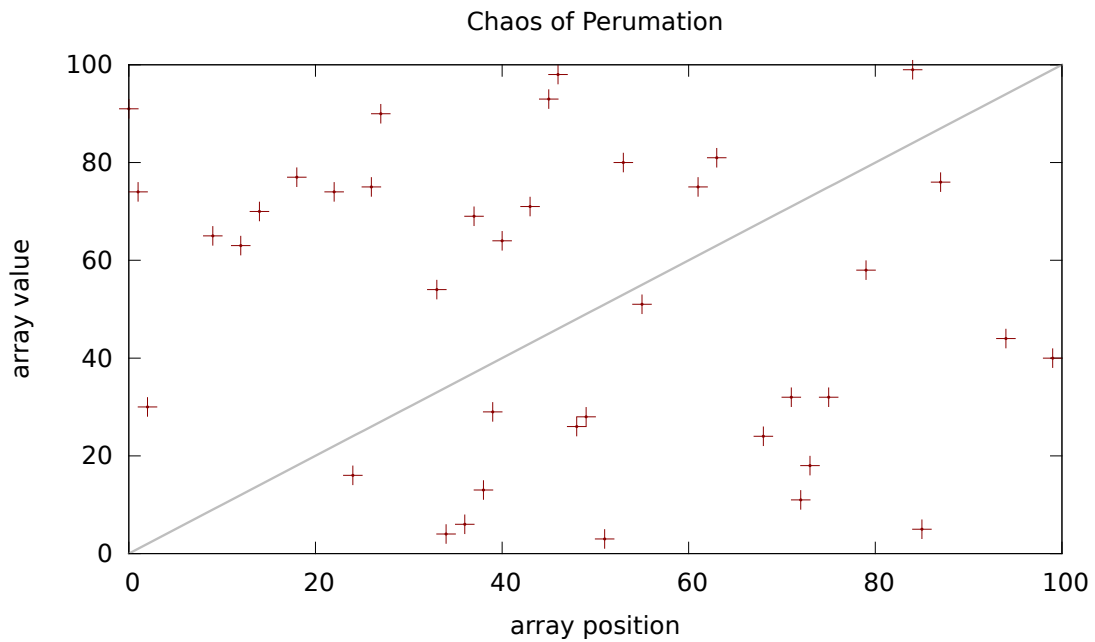
    public static void main(String[] args) {
        int k[] = { 0x1A, 0x2B, 0x3C, 0x4D, 0x5E, 0x6F, 0x77 };
        RC4 rc4 = new RC4(k);
        System.out.println("S:"+rc4);
        // plot("before rc4.pdf", rc4.s);
        int b[] = new int[100];
        rc4.next(b);
        plot("rc4-key-seq.pdf", b);
        System.out.println("S:" +rc4);
        // plot("after rc4.pdf", rc4.s);
        System.out.println(Arrays.toString(b));
    }
}

```

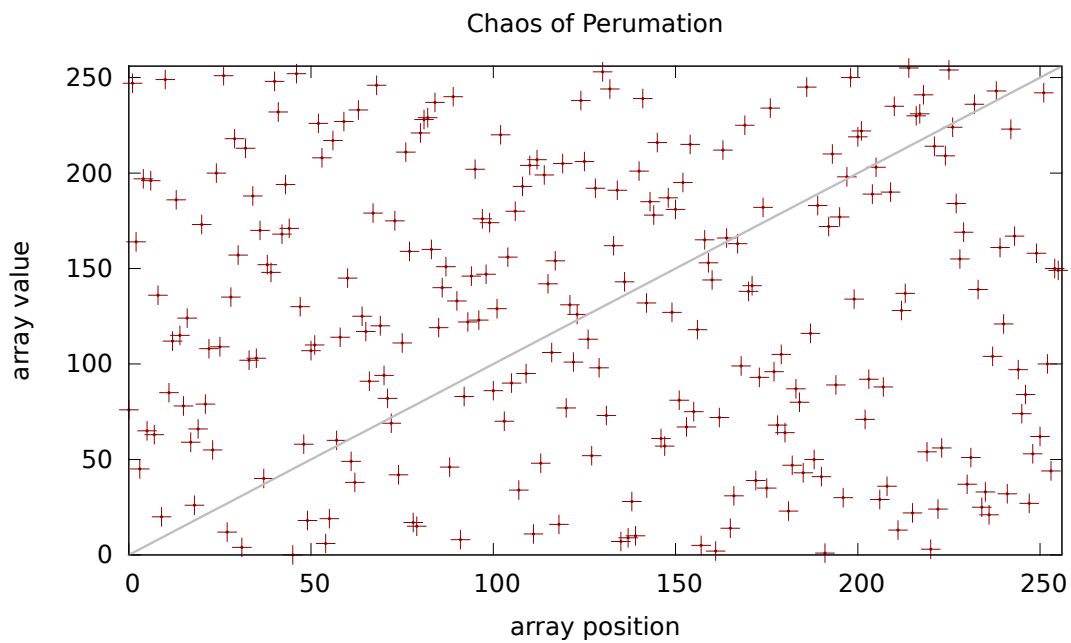
a. Listen Sie die Permutation  $S$  nach der Initialisierung auf.



b. Generieren Sie 100 Schlüsselbytes.



c. Listen Sie die Permutation  $S$  erneut auf.



## 4. Hashfunktionen und MACs

### 4.1. Funktionsweise von Hash-Funktionen

$$Y = 11110 \quad (80)$$

$$F : \{0, 1\}^4 \rightarrow \{0, 1\}^2, \quad (81)$$

$$(x_1, x_2, x_3, x_4) \mapsto (x_1 \text{ xor } x_4, x_2 \text{ xor } x_3) \quad (82)$$

| $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $F(x_1, x_2, x_3, x_4)$ |
|-------|-------|-------|-------|-------------------------|
| 1     | 0     | 1     | 1     | 10                      |
| 1     | 0     | 1     | 1     | 10                      |
| 0     | 1     | 0     | 0     | 01                      |

### 4.2. Kollisionen und Preimage-Angriffe

$$X = (X_0, X_1, X_2, \dots, X_{n-1})$$

$$H(X) = nX_0 + (n-1)X_1 + (n-2)X_2 + \dots + 2X_{n-2} + X_{n-1} \mod 256 = \sum_{i \geq 0}^n (n-i)X_i \mod 256$$

- a. Berechnen Sie  $H(X)$  für die Nachricht "FHT4ever". Interpretieren Sie dabei jeden Buchstaben als seinen 8 Bit ASCII-Wert.

$$X = (70, 72, 84, 52, 101, 118, 101, 114) \quad (83)$$

$$H(X) = 8 \cdot 70 + 7 \cdot 72 + 6 \cdot 84 + 5 \cdot 52 + 4 \cdot 101 + 3 \cdot 118 + 2 \cdot 101 + 114 \quad (84)$$

$$= 560 + 504 + 504 + 260 + 404 + 354 + 202 + 114 \quad (85)$$

$$= 48 + 248 + 248 + 4 + 148 + 98 + 202 + 114 \quad (86)$$

$$= 86 \quad (87)$$

$$H = \text{lambda } x: \text{sum}([(len(x)-i)*ord(e)\%256 \text{ for } i, e \text{ in enumerate}(x)])\%256$$

- b. Finden Sie eine andere (sinnvolle) Nachricht, die den gleichen Hashwert wie "FHT4ever" hat.

$$H(Uni4ever) = 86$$

- c. Gegeben sei  $h(X) = 42$ , wobei  $X = (X_0, X_1, X_2)$ . Finden Sie ein  $Y = (Y_0, Y_1, Y_2)$  mit  $X \neq Y \wedge h(Y) = h(X)$ .

- d. Finden Sie eine weitere Kollision.

$$H(X) = 42 = (3X_1 + 2X_2 + X_1) \mod 256 \quad (88)$$

Folgende Tabelle gibt Tupeln  $X = (X_0, X_1, X_2)$  mit  $H(X) = 42$  an. Insgesamt existieren 65536 Kollision (ExhaustedSearch).

```

c = [ (x,y,z) for x in range(256)
        for y in range(256)
        for z in range(256)
        if (3*x+2*y+z) % 256==42 ]
print len(c)

```

| $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ |
|-------|-------|-------|
| 96    | 166   | 190   |
| 96    | 167   | 188   |
| 96    | 168   | 186   |

### 4.3. Das Online-Auktionshaus

#### a. Denken Sie sich ein möglichst einfaches Verfahren aus, das auf einer Hash-Funktion beruht.

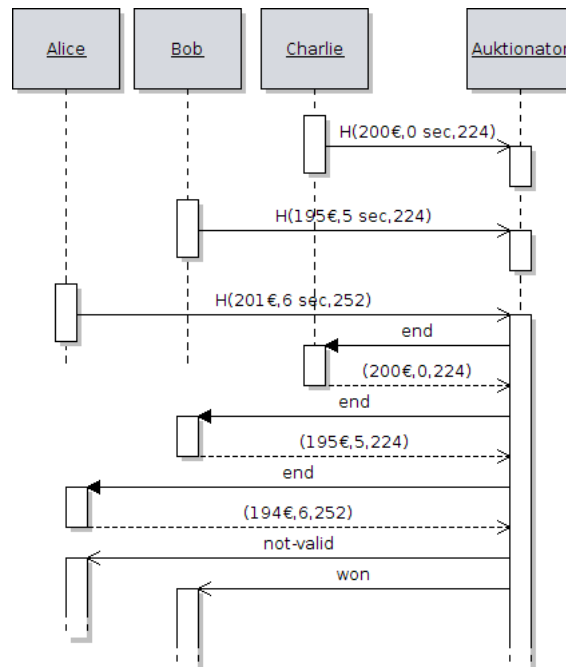
Ein Gebot ist ein Hashwert bestehend aus: Betrage, Timestamp und Nonce

$$H((bid \circ time \circ salt)) = Y$$

Die anderen Bieter können nicht errechnen welchen Betrag ein Bieter geboten hat, da die Umkehrung von  $H$  nicht möglich ist.

Sobald die Bieterrunde geschlossen wird, schickt jeder Bieter sein Gebot, Timestamp und Nonce zum Auktionator. Dieser kann nun die Hashwerte der Gebote überprüfen und den günstigen Bieter ermitteln.

Folgendes Bild zeigt ein Beispielablauf einer Auktion.



Im Beispiel sehen, dass Alices Gebot abgelehnt wird da

$$H(201 \circ \dots) = H(196 \circ \dots)$$

Sowie das Bob gewinnt, da er das günstigste Gebot abgeben hat.

#### b. Welche Angriffe gibt es trotzdem noch auf das Verfahren?

- Man-in-the-Middle Attake aufgrund fehlender Authentizität.
- Störungen des Übertragungskanals
- ohne Timetamp wäre Replayangriffe möglich
- ohne Salt wäre die Authentifizierung komplett ausgehebelt
- Brute-Force-Attake ausprobieren von Beträgen,...
- Zeit muss synkron sein.

**Wambach:**  $H(\text{Name} \circ \text{Betrag})$  kann jeder berechnen.

**Münze werfen Internet:** X,Y wählen eine große Zahl. Austausch der Hashwert der Zahlen. X,Y austauschen. X+Y ist die Zufallszahl.

#### 4.4. Datenbankschutz durch Verschlüsselung und Hash-Funktionen

— *Alexander Weigl <weigla@fh-trier.de>*

— *Date: 2011-05-02*

— *Simple membership management with crypto functions on mysql*

— *call: mysql -u <user> -p<password> < member.db.sql*

— *for creation*

```
drop database if exists krypt;
```

```
create database krypt;
```

```
use krypt;
```

```
CREATE TABLE members (
```

```
  idx varchar(40) not null primary key comment 'sha1_key_of_lastname',
```

```
  data varchar(1000) not null unique comment 'crypted_data_from_person'
```

```
);
```

```
DELIMITER //
```

```
CREATE FUNCTION getMember (lastname varchar(40) )
```

```
RETURNS varchar(256)
```

```
BEGIN
```

```

    DECLARE tmp VARCHAR(1000);
    SELECT data FROM members
    WHERE idx = SHA1(lastname) INTO tmp;
    RETURN AES.DECRYPT(tmp, lastname);
END;//

CREATE PROCEDURE saveMember(IN lastname varchar(40)
                           , IN data varchar(256)    )
BEGIN
    DECLARE k VARCHAR(40);
    DECLARE v VARCHAR(1000);

    SET v= AES.ENCRYPT(data , lastname);
    SET k= SHA1(lastname);

    INSERT INTO members VALUES (k, v);
END;//

delimiter ;

CALL saveMember(" Weigl" , " Alexander _ Weigl _ _ Hornstr _ 11 _ _ 54294 _ Trier" );
CALL saveMember(" Wambach" , " Tim _ Wambach _ _ Somewhere _ ..." );
CALL saveMember(" Kuenkler" , " Andreas _ Kuenkler _ _ Somewhere _ ..." );
CALL saveMember(" Knor" , " Konstantin _ Knor _ _ Somewhere _ ..." );
CALL saveMember(" Yuen" , " Timmy _ Wai _ Hong _ Yuen _ _ Am _ Bahnhof , im _ schlimmen _ Vier

SELECT * FROM members;

SELECT getMember(" Weigl" );
SELECT getMember(" Yuen" );

```

#### 4.5. kryptologische Absicherung der Prüfungsvorleistung

a. Das Verfahren ist bisher kryptologisch nicht gesichert. Welche Angriffe sind denkbar?

- Identitätsdiebstahl, man verwendet den Zettel eines anderen
- Replikation des eigenen Scheines mit Fälschung des Ergebnisses
- Replikation eines anderen Scheines Fälschung der persönlichen Angaben

**b. Sichern Sie das Verfahren kryptologisch ab. Der Professor soll die "Echtheit" der Bescheinigung möglichst einfach prüfen können.**

(1) Auf dem Schein wird ein QR-Code abgedruckt der einen Hash mit den Angaben auf dem Schein und einen geheimen Saltwert beinhaltet. Dies kann mit einem Handy leicht geprüft. Überprüfung der Identität ist weiterhin erforderlich.

(2) Verfahren (1) kann auch als Hex-Zeichen aufgedruckt werden.

(3)  $H(\textit{Matrikel}, \textit{Bestanden}, \textit{Salt}) = (\textit{Matrikel} + \textit{Bestanden} + \textit{Salt} \bmod N)$

## 5. Übungsaufgaben: Asymmetrische Kryptologie

### 5.1. Rucksack

PrivateKey:  $(3, 5, 10, 23), m = 8, n = 47$

a. Geben sie den öffentlichen Schlüssel an

$$3 \cdot 8 \mod 47 = 24 \quad (89)$$

$$5 \cdot 8 \mod 47 = 40 \quad (90)$$

$$10 \cdot 8 \mod 47 = 33 \quad (91)$$

$$23 \cdot 8 \mod 47 = 43 \quad (92)$$

PublicKey:  $(24, 40, 33, 43)$

b. Verschlüsseln Sie  $P = [111000000010]_2$  (Binärdarstellung) im ECB-Modus.

$$C_1 = 1 \cdot 24 + 1 \cdot 40 + 1 \cdot 33 + 0 \cdot 43 = 97 \quad (93)$$

$$C_2 = 0 \cdot 24 + 0 \cdot 40 + 0 \cdot 33 + 0 \cdot 43 = 0 \quad (94)$$

$$C_3 = 0 \cdot 24 + 0 \cdot 40 + 0 \cdot 33 + 0 \cdot 43 = 33 \quad (95)$$

c. Finden Sie den Plaintext zum Ciphertext  $C = (67, 64)$

$m^{-1} = 6$ :

$$C_1 = 67 * 6 \mod 47 = 26$$

| $S_i$ | $Cm^{-1}$ | $P$ |
|-------|-----------|-----|
| 23    | 26        | 1   |
| 10    | 3         | 0   |
| 5     | 3         | 0   |
| 3     | 0         | 1   |

$$P_1 = 1001$$

$$C_2 = 64 * 6 \mod 47 = 8$$

| $S_i$ | $Cm^{-1}$ | $P$ |
|-------|-----------|-----|
| 23    | 8         | 0   |
| 10    | 8         | 0   |
| 5     | 3         | 1   |
| 3     | 0         | 1   |

$$P_2 = 0011$$

### 5.2. RSA auf Nachricht in Blöcken

$$P = \text{'FHT4EVER'} \quad n = 13 \cdot 17 = 221 \quad e = 3 \quad (96)$$



**Beachten:**  $ggT(e, \phi(221)) \neq 1$ . Entschlüsselung damit unmöglich.

$$E(x) = x^3 \mod 221 \quad (97)$$

$$E(P) = E('F') \circ E('H') \circ E('T') \circ E('4') \circ E('E') \circ E('V') \circ E('E') \circ E('R') \quad (98)$$

$$= \text{apply}(x^3 \mod 221, [70, 72, 84, 52, 69, 86, 69, 82]) \quad (99)$$

$$= [8, 200, 203, 52, 103, 18, 103, 194] \quad (100)$$

### 5.3. Chinesischer Restsatz

**a. Es sei  $m = 11, n = 12, a = 3$  und  $b = 4$ . Geben Sie ein  $x$  an, für das gilt:  $x \mod m = a$  und  $x \mod n = b$**

$$x = anN + bmM = 3 \cdot 12 \cdot N + 4 \cdot 11M \quad (101)$$

$$ggT(12, 11) = 1 \text{ mit } a^{-1} = -1 = N$$

$$ggT(11, 12) = 1 \text{ mit } a^{-1} = 1 = M$$

$$X = 3 \cdot 12 \cdot 1 + 4 \cdot 11 \cdot -1 \quad (102)$$

$$= 36 - 44 = -8 \quad (103)$$

**Probe:**

$$-8 \mod m = a \quad -8 \mod n = b \quad (104)$$

$$-8 \mod 11 = 3 \quad -8 \mod 12 = 4 \quad (105)$$

$$(106)$$

**b. Es sei  $m = 11, n = 12, l = 12, a = 3, b = 4$  und  $c = 5$ . Geben Sie ein  $x$  an, für das gilt:  $x \mod m = a$  und  $x \mod n = b$  und  $x \mod l = c$ .**

$$X = a \cdot n \cdot l(nl)^{-1} + b \cdot m \cdot l(ml)^{-1} + c \cdot n \cdot m(nm)^{-1} \quad (107)$$

$$x \mod 11 = 3 \quad (108)$$

$$x \mod 12 = 4 \quad (109)$$

$$x \mod 11 = 5 \quad (110)$$

$$(111)$$

**Vorraussetzung für Chin. Restsatz nicht erfüllt.**  $ggT(n, l) = 12$  damit nicht relativ prim.

c. **Verallgemeinern Sie den Chinesischer Restsatz: Gesucht ist  $x$  mit  $(x \bmod m_i) = x_i$  und die passende Berechnungsvorschrift. Wie groß ist die Laufzeit zur Berechnung von  $x$ ?**

**Eingabe:**  $m_i$  die Module (paarweise relativ prim),  $x_i$  die gesuchten Ergebnisse mit  $1 \leq i \leq n$ .

Sei  $N_j$  das Produkt von  $\prod_{i>0 \wedge i \neq j}^n m_i = m_1 \cdots m_{j-1} \cdot m_{j+1} \cdots m_n$  Sei  $M_i$  multiplikative Inverse von  $N_i$  zu  $m_i$ .

$$X = \sum_i^n x_i \underbrace{N_i M_i}_{\equiv_{m_i} 1} \quad (112)$$

$$= x_1 m_2 \cdots m_n M_1 + \dots + x_n m_1 \cdots m_{n-1} M_n \quad (113)$$

Kosten:  $T = n \cdot T_{\text{egcd}} + n(n+1)T_{\text{mult}} + nT_{\text{add}} \in \mathcal{O}(n^2)$ .

#### 5.4. RSA-Low-Exponent-Attack

a. **Gg. seien die drei öffentlichen RSA-Schlüssel**

$(n_1 = 35, e = 3), (n_1 = 35, e = 3), (n_1 = 35, e = 3)$ . **Außerdem bekannt ist:**

$C_{123} = (22, 12, 216)$

Voraussetzungen:

$$C_{123} = P^3 \bmod n_{123}$$

und  $n_{123}$  sind paarweise relativ prim.

Gesucht  $x$ :

$$x \bmod n_1 = C_1 \wedge x \bmod n_2 = C_2 \wedge x \bmod n_3 = C_3 \wedge$$

$$x = \underbrace{C_1 n_2 n_3 N_{23}}_{\equiv 1 \bmod n_1} + \underbrace{C_1 n_1 n_3 N_{13}}_{\equiv 1 \bmod n_2} + \underbrace{C_1 n_1 n_2 N_{12}}_{\equiv 1 \bmod n_3} \quad (114)$$

Suche der multiplikativen Inversen  $N_{123}$  zum Modul  $n_{123}$  mit erweiterter euklidischer Algorithmus:

$$ggT(n_2 n_3, n_1) = ggT(24, 35) :$$

$$35 = 1 \cdot 24 + 11 \quad (115)$$

$$24 = 2 \cdot 11 + 2 \quad (116)$$

$$11 = 5 \cdot 2 + 1 \quad (117)$$

$$1 = 11 - 5 \cdot 2 \quad (118)$$

$$1 = 35 - 24 - 5 \cdot (24 - 2 \cdot 11) \quad (119)$$

$$1 = -24 - 5 \cdot (24 - 2 \cdot (35 - 24)) \quad (120)$$

$$1 = -24 - 5 \cdot (24 + 2 \cdot 24) \quad (121)$$

$$1 = -16 \cdot 24 \quad (122)$$

$$1 = 19 \cdot 24 \quad (123)$$

$$N_{23} = 19$$

$$ggT(n_1 n_3, n_2) = ggT(8, 143) :$$

$$134 = 17 \cdot 8 + 7 \quad (124)$$

$$8 = 7 + 1 \quad (125)$$

$$1 = 8 - 7 \quad (126)$$

$$1 = 8 - (143 - 17 \cdot 8) \quad (127)$$

$$1 = 8 + 17 \cdot 8 \quad (128)$$

$$1 = 18 \cdot 8 \quad (129)$$

$$N_{13} = 18$$

$$ggT(n_1 n_2, n_3) = ggT(160, 323) :$$

$$323 = 2 \cdot 160 + 3 \quad (130)$$

$$160 = 53 \cdot 3 + 1 \quad (131)$$

$$(132)$$

$$1 = 160 - 53 \cdot 3 \quad (133)$$

$$1 = 160 - 53 \cdot (323 - 2 \cdot 160) \quad (134)$$

$$1 = 107 \cdot 160 \quad (135)$$

$$N_{12} = 107$$

$$x = P^3 = 137.424.442 = 12.167 \pmod{n_1 n_2 n_3} \quad (136)$$

$$P = \sqrt[3]{x} = \sqrt[3]{12167} = 23 \quad (137)$$

**Probe:**

$$23^3 \pmod{n_{123}} = C_{123} \quad (138)$$

b.

**5.5. Quadratwurzeln mod n**

$$16 \pmod{35}$$

**a. mit chin. Restsatz**

Zerlegung in  $pq = n$  mit  $7 \cdot 5 = 35$ .

Lösung von  $16 \equiv 2 \pmod{7}$  mit Folgerung (2.5).

$$\frac{7+1}{2 \cdot 4} \Rightarrow x_1 = 4 \wedge x_2 = 7 - 4 = 3$$

Lösung von  $16 \equiv 1 \pmod{5}$ :

$$x_3 = 1 \text{ und } x_4 = 4$$

$$x = 1 \pmod{5} \tag{139}$$

$$x = 3 \pmod{7} \tag{140}$$

$$x = 4 \pmod{7} \tag{141}$$

$$x = 4 \pmod{5} \tag{142}$$

Betrachtung für (139) mit (140) und (141) reicht:

$$X = x_1pP + x_2qQ = 1 \cdot 7P + 3 \cdot 5Q \tag{143}$$

$$ggT(7, 5) = 1a^{-1} = 3 \quad ggT(5, 7) = 1a^{-1} = 10$$

$$X_1 = 4$$

$$X = x_3pP + x_4qQ = 4 \cdot 7P + 4 \cdot 5Q \tag{144}$$

$$ggT(7, 5) = 1a^{-1} = 3 \quad ggT(5, 7) = 1a^{-1} = 10$$

$$X_2 = 9$$

Weitere

$$X_3 = 35 - X_1 = 31 \text{ und } X_4 = 35 - X_2$$

b.

[0, 1, 4, 9, 16, 25, 1, 14, 29, 11, 30, 16, 4, 29, 21, 15, 11, 9, 9, 11, 15, 21, 29, 4, 16, 30, 11, 29, 14, 1, 25, 16, 9, 4, 1]

### 5.6. Rabin

Sei der öffentliche Schlüssel  $n = 77$ , der geheime Schlüssel  $p = 7$  und  $q = 11$ . Gegeben sei der Ciphertext  $C = 23$ .

#### a. Wie lauten die möglichen Klartexte?

Lösung für  $x^2 \equiv_p C$  (2.5):

$$C \cdot \frac{7+1}{4} \equiv_7 4 \quad (145)$$

$$x_{12} = 4, 3$$

Lösung für  $x^2 \equiv_q C$  (2.5):

$$C \cdot \frac{11+1}{4} \equiv_1 11 \quad (146)$$

$$x_{34} = 1, 10$$

Mit dem Restsatz:

$$X = (32, 45, 10, 67)$$

#### b. Sie wissen, dass der Klartext in seiner 7-Bit-Binärdarstellung im höchsten Bit eine "1" hat. Welches ist der gesuchte Klartext?

$$P = 67$$

### 5.7. Elgamal

Öffentlicher Schlüssel:  $p = 2579$ , Primitivwurzel  $g = 2, y = 2765 = 949 \mod 2579$

Geheimer Schlüssel:  $x = 765$

Nachricht:  $m = 1299, k = 853$

#### a. Führen Sie die Verschlüsselung durch.

$$a = g^k \mod p = 2^{853} \mod 2579 = 435 \quad (147)$$

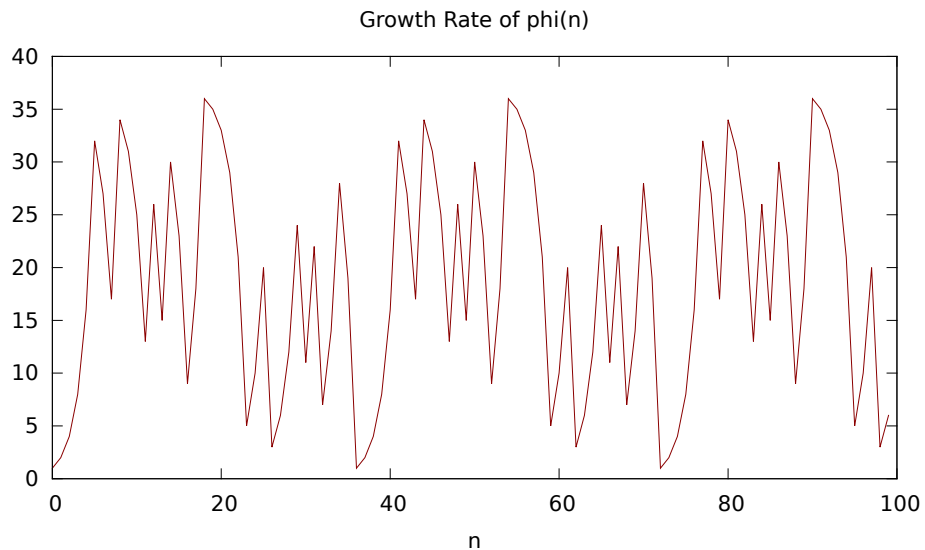
$$b = y^k m \mod p = 949^{853} \cdot 1299 \mod 2579 = 2396 \quad (148)$$

$$C = (435, 2396)$$

**b. Führen Sie die Entschlüsselung des Ciphertexts durch und überprüfen Sie, ob Sie wieder m erhalten.**

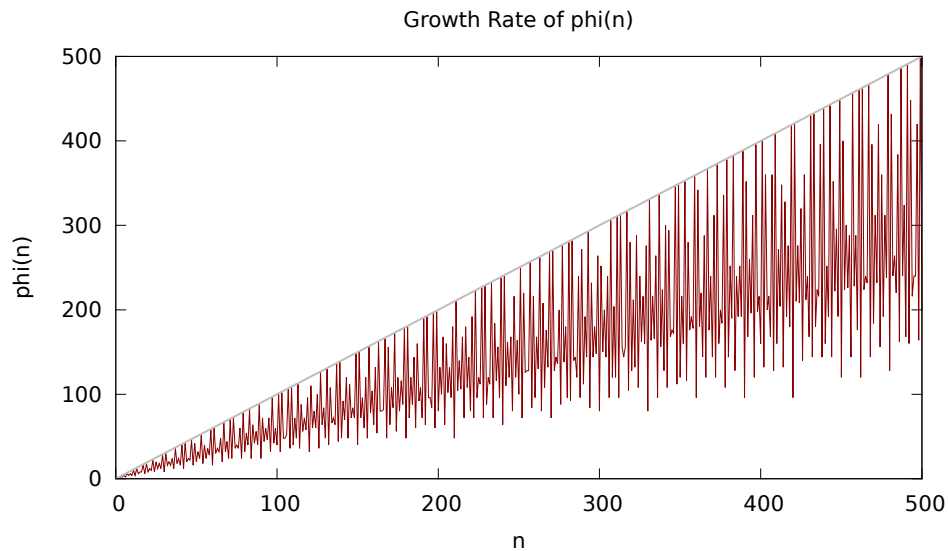
$$P = \frac{b}{a^x} \mod 2579 = \frac{2396}{436^{765}} \mod p = \frac{2396}{2424} \mod p = 2396 * 2424^{-1} \mod p = 1299 \quad (149)$$

### 5.8. Diskrete Exponential-Funktion



**5.9. Primfaktorzerlegung****5.10. Fermatscher Primzahltest****5.11. Inverses zu  $(n-1) \bmod n$** **5.12.  $a(n-1) \bmod n$** **5.13.  $\phi(n)$  für  $n < 500$** 

a. Berechnen Sie  $\phi(n)$  für  $n < 500$  und tragen Sie die Werte in einem Graphen



b. Geben Sie eine möglichst genaue obere Schranke für  $\phi(n)$  an.

$$\phi(n) \leq n - 1 \quad (150)$$

$$\in \mathcal{O}(n) \quad (151)$$

## 6. Digitale Signatur und Zertifikate

### 6.1. Keine Signatur mit dem Rucksack

### 6.2. RSA-Signatur

$$n = 3 * 5 = 15, e = 3, M = 7$$

$$d = 3 \Rightarrow 3 \cdot 3 \equiv 1 \pmod{8}$$

a. Berechnen Sie die digitale Unterschrift nach dem RSA-Verfahren.

$$D_{SK}(M) = 7^3 \pmod{15} = 13 \quad (152)$$

b. Was überträgt der Sender zum Empfänger, wenn er die Nachricht M signiert übertragen will?

$$(M, D_{SK}) = (7, 13)$$

c. Verifizieren Sie die Unterschrift.

$$E_K = 13^3 \pmod{15} = 7 = M$$

### 6.3. Elgamal-Signatur

$$p = 467, g = 2, x = 127, y = 2127 = 132 \pmod{467}$$

Die Nachricht  $M = 100$  soll unterschrieben werden. Es wird  $k = 213$  verwendet.

a. Berechnen Sie die digitale Unterschrift nach dem Elgamal-Verfahren.

$$a = g^k \pmod{p} = 2^{213} \pmod{467} = 29$$

$$M = (xa + kb) \pmod{(p-1)} \quad (153)$$

$$M = ((127 \cdot 29 \pmod{(467-1)}) + (213 \cdot b \pmod{(467-1)})) \pmod{(467-1)} \quad (154)$$

$$M - 421 = 213 \cdot b \pmod{(467-1)} \quad (155)$$

$$\frac{M - 421}{213} = b \pmod{466} \quad (156)$$

$$(100 - 421) \cdot 213^{-1} \Rightarrow b = -321 \cdot 213^{-1} \pmod{466} \quad (157)$$

$$\Rightarrow b = -321 \cdot -35 \pmod{466} = 51 \quad (158)$$



**b. Was überträgt der Sender zum Empfänger, wenn er die Nachricht M signiert übertragen will?**

$$(M, (a, b)) = (100, (29, 51))$$

**c. Verifizieren Sie die Unterschrift.**

$$g^M \equiv y^a a^b \pmod{p} \quad (159)$$

$$2^{100} \equiv 132^{29} \cdot 29^{51} \pmod{467} \quad (160)$$

$$189 \equiv 189 \quad (161)$$

**d. Länge der Passphrase für digitale Signatur**

Sie haben einen 1024 Bit (2048 Bit) RSA-Schlüssel. Wie lang sollte die Passphrase zum Schutz des auf Ihrer Festplatte gespeicherten Schlüssels mindestens sein? Hinweis: Nehmen Sie an, dass die Sicherheit eines 1024 Bit RSA-Schlüssels einem 128 Bit symmetrischen Schlüssel entspricht.

*Angenommen:* Passwort  $w \in \Sigma^*$  besteht aus den Terminalsymbolen aus ASCII.

$$|\Sigma| = 256 - 32 = 224$$

*Frage:* Welche Länge muss mein Passwort haben, damit  $2^{128}$  Möglichkeiten habe.

$$|\{w \in \Sigma^* \mid |w| = x\}| = 2^{128}$$

$$|\Sigma|^{|w|} = 2^{128} \quad (162)$$

$$224^x = 2^{128} \quad (163)$$

$$|w| \log_2(224) = 128 \quad (164)$$

$$|w| = 16,395 \quad (165)$$

$$\text{für } |\Sigma| = 64 \Rightarrow |w| = 21,3$$

## 6.4. GPG

## 6.5. Signierung eines Java-Applets

## 6.6. PDF-Signatur