

Übungen - Angewandte Kryptologie

Alexander Weigl Timmie Yuen Daniel Wahlscheid
Thomas Schrader

June 4, 2011

Contents

1. Übung 1	5
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
2. Übung 2	9
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
3. Moderne Symmetrische Chiffren	16
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
4. Hashfunktionen und MACs	27
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
5. Übungsaufgaben: Asymmetrische Kryptologie	32
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
6. Digitale Signatur und Zertifikate	40
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
6.4. Länge der Passphrase für digitale Signatur	41
6.5. GPG	41
6.6. Signierung eines Java-Applets	41
6.7. PDF-Signatur	41

7. Kryptologische Anwendungen und Protokolle	42
7.1. Münzwurf am Telefon	42
a. Alice sendet $r = 16980$ an Bob. Kann Bob n faktorisieren? Wenn ja, geben Sie die Faktorisierung an.	42
b. Alice sendet 23474 an Bob. Kann Bob n faktorisieren? Wenn ja, geben Sie die Faktorisierung an.	42
c. Berechnen Sie die vier Quadratwurzeln von $17209 \bmod n$	42
7.2. Altersvergleich	42
7.3. Karten kryptologisch mischen und austeilen	42
7.4. Knobeln über E-Mail	42
7.5. Chaffing and Winnowing	43
a. Welche Tripel (Seriennummer, Paket, MAC) übertragen Sie nach dem "Chaffing and Winnowing"-Verfahren, wenn die Nachricht "FHT" lautet und die Paketlänge einen Buchstaben lang ist? . . .	43
b. Welche Tripel (Seriennummer, Paket, MAC) übertragen Sie nach dem "Chaffing and Winnowing"-Verfahren, wenn die Nachricht "F" lautet und die Paketlänge ein Bit lang ist? Verwenden Sie die 8-Bit ASCII-Codierung.	43

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	$\{0, 1\}$	$\{0, 1\}$	$\{0, 1\}^*$	∞
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. $[i]_n + [j]_n = [i + j]_n$

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

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

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

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

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

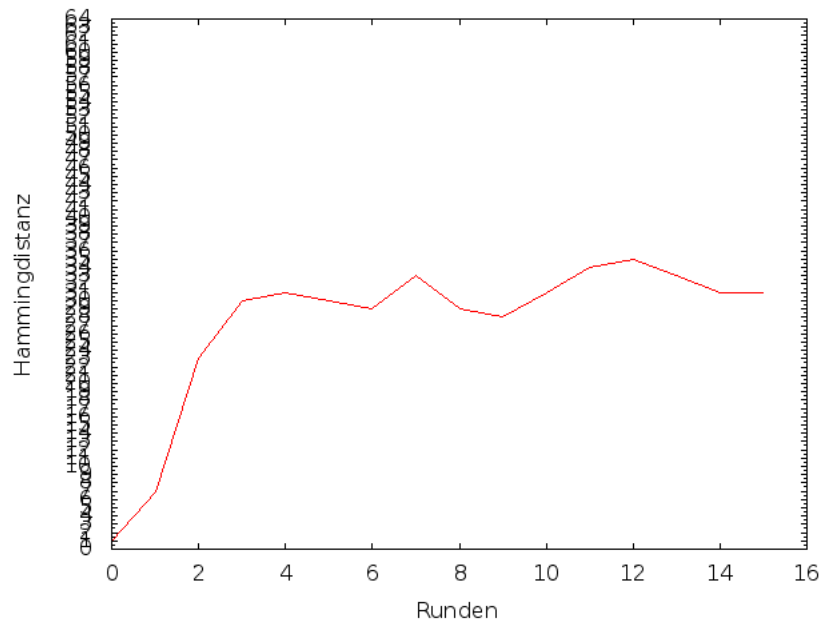
1.3.

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.

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

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 $E_2 \circ E_1$:

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

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

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

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 (25×24) 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	1011100001111000011110000	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");
}

```

```

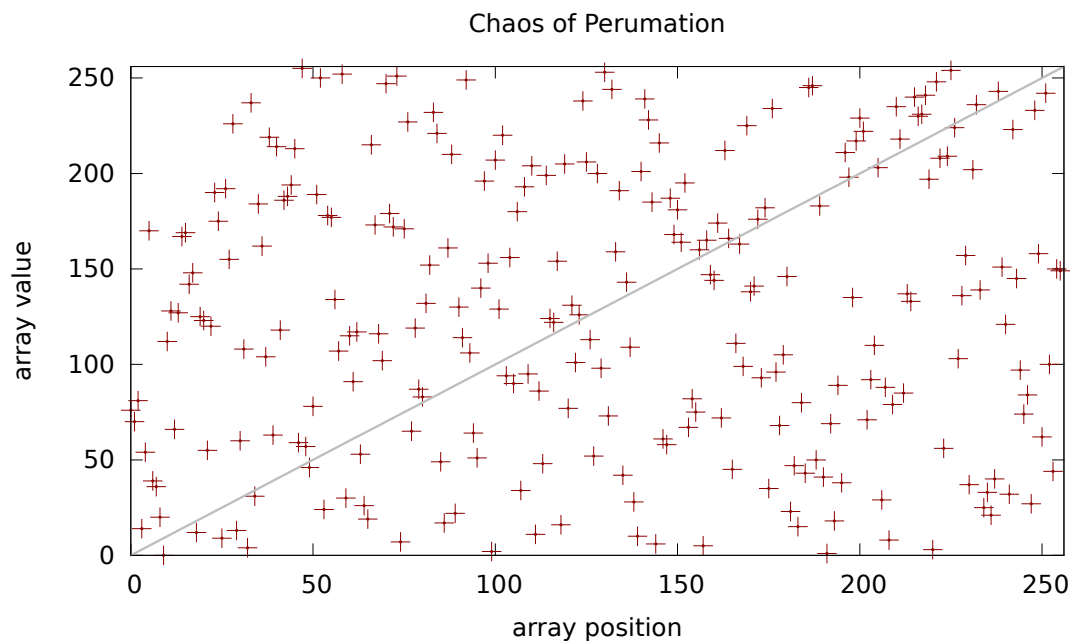
        plot.getAxis("y").setBoundaries(0, k.length);

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

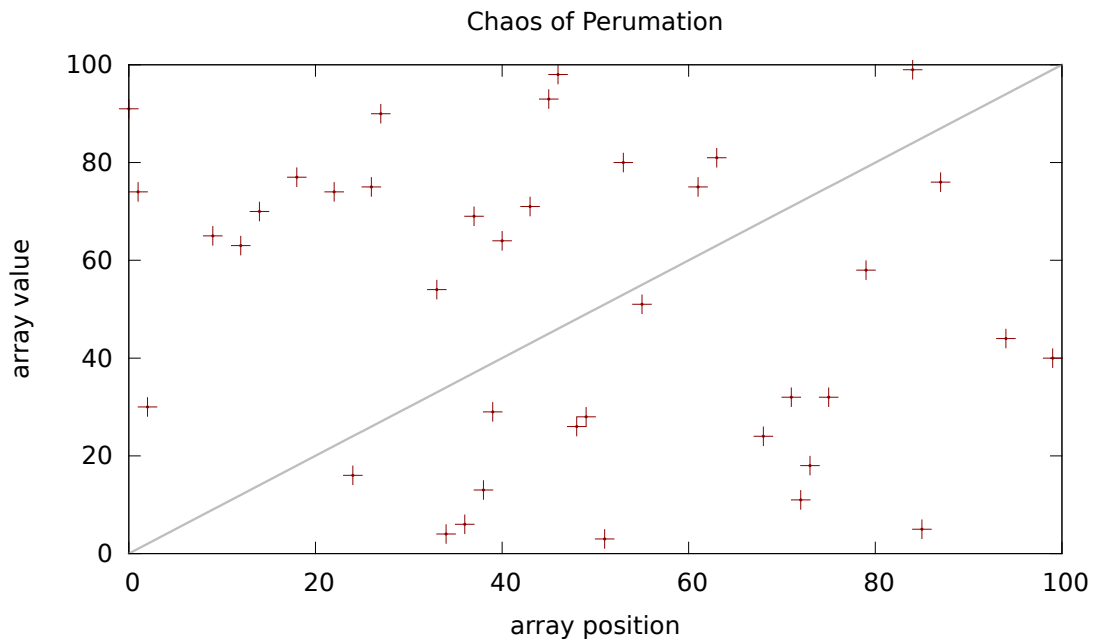
    public static void main(String[] args) {
        int k[] = { 0x1A, 0x2B, 0x3C, 0x4D, 0x5E, 0x6F, 0x77 };
        RC4 rc4 = new RC4(k);
        System.out.println("S:"+rc4);
        // plot("before_rc4.pdf", rc4.s);
        int b[] = new int[100];
        rc4.next(b);
        plot("rc4-key-seq.pdf", b);
        System.out.println("S:" +rc4);
        // plot("after_rc4.pdf", rc4.s);
        System.out.println(Arrays.toString(b));
    }
}

```

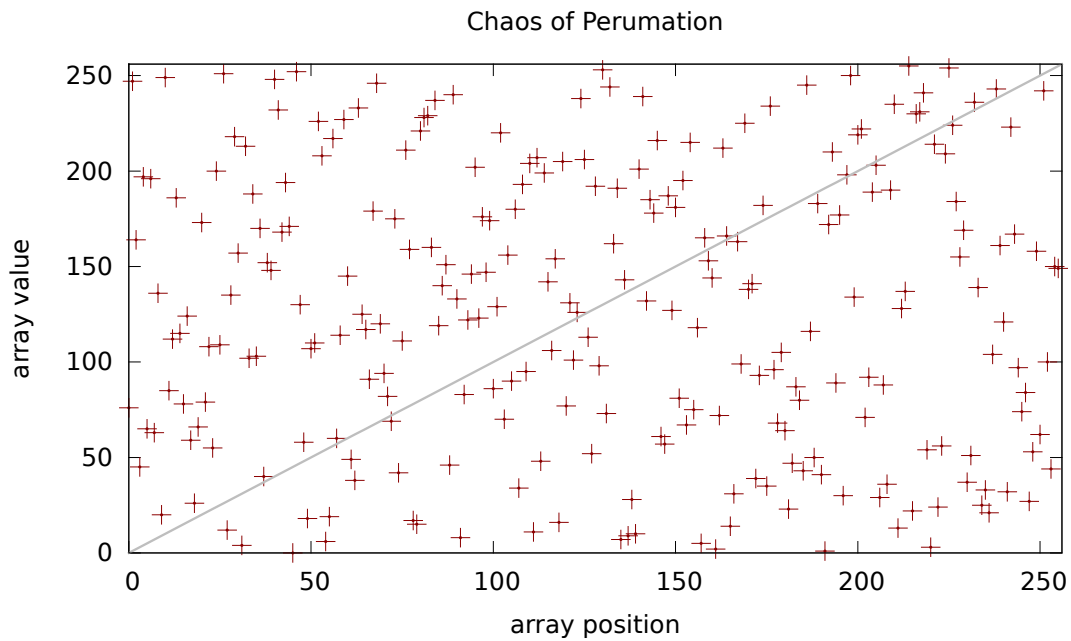
a. Listen Sie die Permutation S nach der Initialisierung auf.



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.

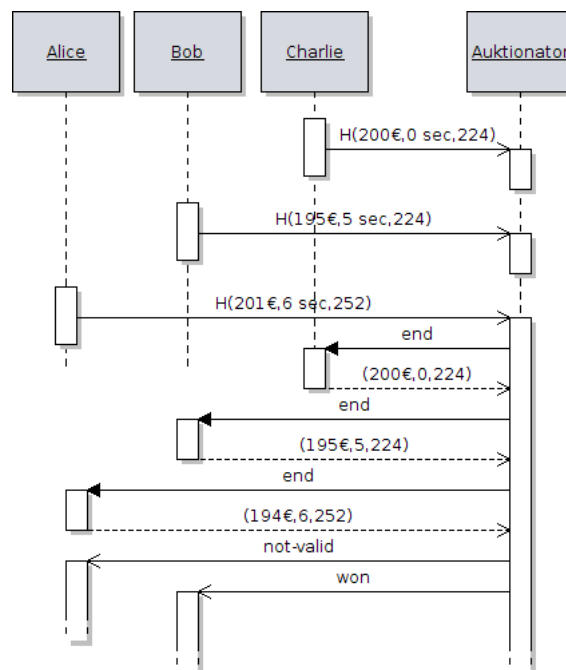
Ein Gebot ist ein Hashwert bestehend aus: Betrage, Timestamp und Nonce

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

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.

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

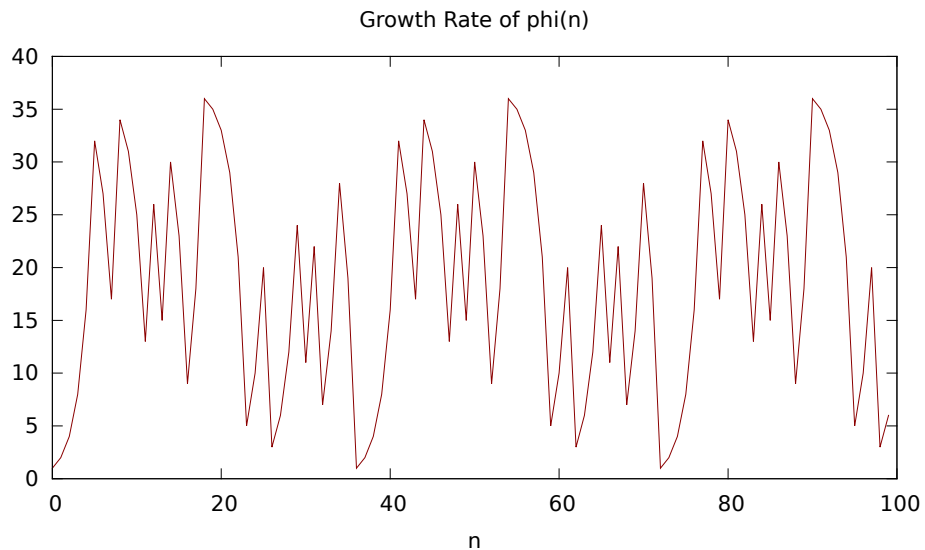
$$b = y^k m \mod p = 949^{853} \cdot 1299 \mod 2579 = 2396 \quad (148)$$

$$C = (435, 2396)$$

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

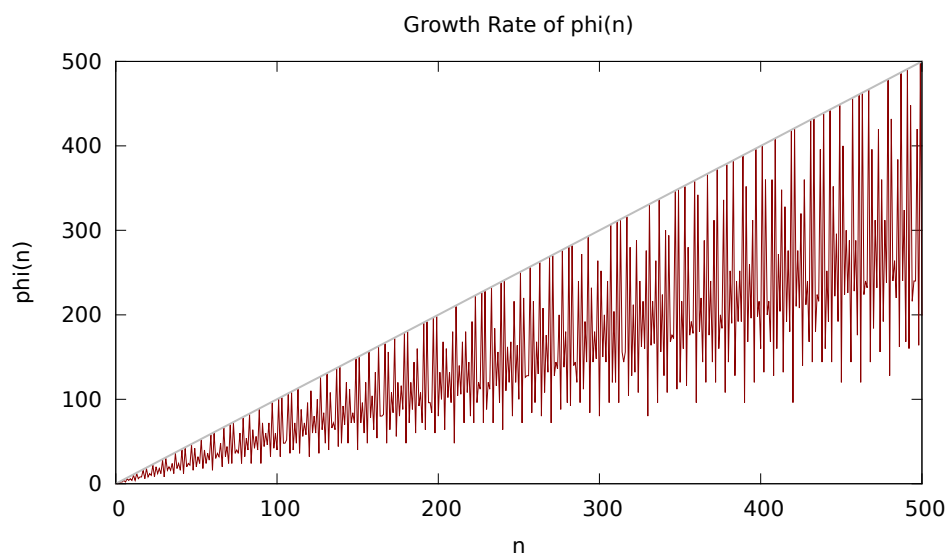
$$P = \frac{b}{a^x} \mod 2579 = \frac{2396}{436^{765}} \mod p = \frac{2396}{2424} \mod p = 2396 * 2424^{-1} \mod p = 1299 \quad (149)$$

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

$$p = 467 \quad g = 2 \quad x = 127 \quad y = 2127 = 132 \pmod{467} \quad (153)$$

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

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

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

$$M = (xa + kb) \pmod{(p-1)} \quad (154)$$

$$M = ((127 \cdot 29 \pmod{(467-1)}) + (213 \cdot b \pmod{(467-1)})) \pmod{(467-1)} \quad (155)$$

$$M - 421 = 213 \cdot b \pmod{(467-1)} \quad (156)$$

$$\frac{M - 421}{213} = b \pmod{466} \quad (157)$$

$$(100 - 421) \cdot 213^{-1} \Rightarrow b = -321 \cdot 213^{-1} \pmod{466} \quad (158)$$

$$\Rightarrow b = -321 \cdot -35 \pmod{466} = 51 \quad (159)$$

- 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.**

$$g^M \equiv y^a a^b \pmod{p} \quad (160)$$

$$2^{100} \equiv 132^{29} \cdot 29^{51} \pmod{467} \quad (161)$$

$$189 \equiv 189 \quad (162)$$

6.4. 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 Schlüssels 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.

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

$$|\Sigma|^{|w|} = 2^{128} \quad (163)$$

$$224^x = 2^{128} \quad (164)$$

$$|w| \log_2(224) = 128 \quad (165)$$

$$|w| = 16,395 \quad (166)$$

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

6.5. GPG

6.6. Signierung eines Java-Applets

6.7. PDF-Signatur

7. Kryptologische Anwendungen und Protokolle

7.1. Münzwurf am Telefon

Alice sendet $n = 34189$ an Bob. Bob wählt $x = 17209$ und sendet 4563 an Alice.

a. Alice sendet $r = 16980$ an Bob. Kann Bob n faktorisieren? Wenn ja, geben Sie die Faktorisierung an.

Ist $r = n - x$: $n - r = x = 17209$. Faktorisierung nicht möglich, Alice gewinnt

b. Alice sendet 23474 an Bob. Kann Bob n faktorisieren? Wenn ja, geben Sie die Faktorisierung an.

$$ggT(x + y, n) = ggT(23474 + 17209, 34189) = 191$$

o. B. d. A.: $q = \frac{n}{p} = 179, p = 191$

c. Berechnen Sie die vier Quadratwurzeln von $17209 \pmod n$.

Es gibt kein x , sodass $x^2 \equiv 17209 \pmod{34189}$

7.2. Altersvergleich

7.3. Karten kryptologisch mischen und austeilen

Gegeben seien die folgenden vier Spielkarten und Ihre Codierung:

$$x_1 = \text{"HerzAss"} = 2 \qquad x_2 = \text{"PikAss"} = 3 \qquad (167)$$

$$x_3 = \text{"KaroAss"} = 4 \qquad x_4 = \text{"KreuzAss"} = 7 \qquad (168)$$

Mischen und verteilen Sie die Karten nach der in der Vorlesung beim Skat-Protokoll vorgestellten Methode an die vier Spieler A, B, C, D . Verwenden Sie folgende Permutationen in Zykelschreibweise: Ferner sei $p = 11, a = 3, b = 7, c = 9, d = 7$.

7.4. Knobeln über E-Mail

Entwerfen Sie ein (dezentrales) Protokoll zum Knobeln (Schere, Stein, Papier) per E-Mail. Hinweis: Es gibt verschiedene Lösungen. Sie können z.B. Shamirs No-Key-Protokoll oder Hashfunktionen verwenden.

7.5. Chaffing and Winnowing

- a. Welche Tripel (Seriennummer, Paket, MAC) übertragen Sie nach dem "Chaffing and Winnowing"-Verfahren, wenn die Nachricht "FHT" lautet und die Paketlänge einen Buchstaben lang ist?
- b. Welche Tripel (Seriennummer, Paket, MAC) übertragen Sie nach dem "Chaffing and Winnowing"-Verfahren, wenn die Nachricht "F" lautet und die Paketlänge ein Bit lang ist? Verwenden Sie die 8-Bit ASCII-Codierung.

Vorgaben: Schlüssel k zur Berechnung des MAC = "geheim" Hash-Verfahren = MD5
MAC-Verfahren = $H(k, H(k, M))$ Hinweis: Sie können zur Generierung der MACs das CrypTool verwenden (Einzelverfahren = Hashverfahren = Generieren von MACs)