

Vorlesungsskript  
Kryptologie 2  
Sommersemester 2006

Prof. Dr. Johannes Köbler  
Humboldt-Universität zu Berlin  
Lehrstuhl Komplexität und Kryptografie

*21. 07. 2006*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kryptografische Hashverfahren</b>	<b>1</b>
1.1	Einführung . . . . .	1
1.1.1	Klassifikation von Hashverfahren . . . . .	2
1.1.2	Schlüssellose Hashfunktionen . . . . .	3

# 1 Kryptografische Hashverfahren

## 1.1 Einführung

Durch kryptographische Verfahren lassen sich unter anderem die folgenden **Schutzziele** realisieren.

- *Vertraulichkeit*
  - Geheimhaltung
  - Anonymität (z.B. Mobiltelefon)
  - Unbeobachtbarkeit (von Transaktionen)
- *Integrität*
  - von Nachrichten und Daten
- *Zurechenbarkeit*
  - Authentikation
  - Unabstreitbarkeit
  - Identifizierung
- *Verfügbarkeit*
  - von Daten
  - von Rechenressourcen
  - von Informationsdienstleistungen

Kryptografische Hashverfahren sind ein wirksames Werkzeug zur Sicherstellung der Integrität von Nachrichten oder generell von digitalisierten Daten. In der Tat nehmen kryptografische Hashverfahren beim Schutz der Datenintegrität eine ähnlich herausragende Stellung ein wie sie Kryptosystemen bei der Wahrung der Vertraulichkeit zukommt. Daneben finden kryptografische Hashfunktionen aber auch vielfach als Bausteine von komplexeren Systemen Verwendung. Wie wir noch sehen werden, sind kryptografische Hashfunktionen etwa bei der Bildung von digitalen Signaturen sehr nützlich. Auf weitere Anwendungsmöglichkeiten werden wir später eingehen.

Den überaus meisten Anwendungen von kryptografischen Hashfunktionen  $h$  liegt die Idee zugrunde, dass sie zu einem vorgegebenen Text  $x$  eine zwar kompakte aber dennoch repräsentative Darstellung  $h(x)$  liefern, die unter praktischen Gesichtspunkten als eine eindeutige Identifikationsnummer von  $x$  fungieren kann. Die Berechnungsvorschrift für  $h$  muss daher gewissermaßen darauf abzielen, „charakteristische Merkmale“ von  $x$  in den Hashwert  $h(x)$  einfließen zu lassen. Da der Fingerabdruck eines Menschen ganz ähnliche Eigenschaften besitzt (was ihn für Kriminalisten bekanntlich so wertvoll macht), wird der Hashwert  $h(x)$  auch oft als ein **digitaler Fingerabdruck** von  $x$  bezeichnet. Gebräuchlich sind auch die Bezeichnungen **kryptografische Prüfsumme** oder *message digest* (englische Bezeichnung für „Nachrichtenextrakt“).

Typische Schutzziele, die sich mittels Hashfunktionen realisieren lassen, sind die Nachrichten- und Teilnehmerauthentikation.

- „Nachrichtenauthentikation“ (message authentication)

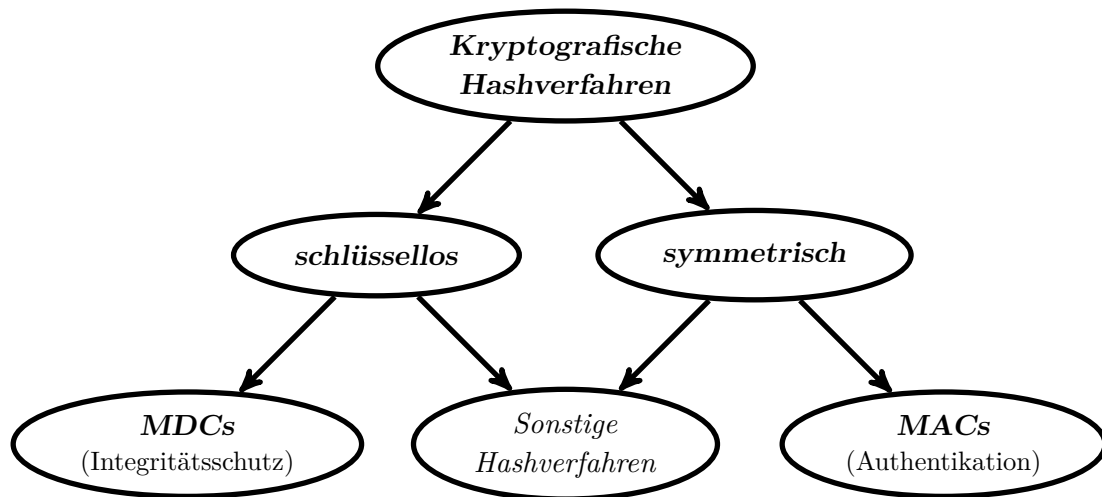


Abbildung 1.1: Eine grobe Einteilung von kryptografischen Hashverfahren.

- Wie lässt sich sicherstellen, dass eine Nachricht (oder eine Datei) während einer (räumlichen oder auch zeitlichen) Übertragung nicht verändert wurde?
- Wie lässt sich der Urheber (oder Absender) einer Nachricht zweifelsfrei feststellen?
- „Teilnehmerauthentikation“ (entity authentication, identification)
  - Wie kann sich eine Person (oder ein Gerät) anderen gegenüber zweifelsfrei ausweisen?

### 1.1.1 Klassifikation von Hashverfahren

Kryptografische Hashverfahren lassen sich grob danach klassifizieren, ob der Hashwert lediglich in Abhängigkeit vom Eingabetext berechnet wird oder zusätzlich von einem symmetrischen Schlüssel abhängt (siehe Abbildung 1.1).

Kryptografische Hashfunktionen, bei deren Berechnung keine Schlüssel benutzt werden, dienen vornehmlich der Erkennung von unbefugt vorgenommenen Manipulationen an Dateien oder Nachrichten. Daher werden sie auch als **MDC** bezeichnet (**Manipulation Detection Code** [englisch] = Code zur Erkennung von Manipulationen). Zuweilen wird das Kürzel **MDC** auch als eine Abkürzung für **Modification Detection Code** verwendet. Seltener ist dagegen die Bezeichnung **MIC** (**message integrity codes**). Abbildung 1.2 zeigt eine typische Anwendung von MDCs.

Um die Integrität eines Datensatzes  $x$  sicherzustellen, der über einen ungesicherten Kanal gesendet (bzw. auf einem vor Manipulationen nicht sicheren Webserver abgelegt) wird, kann man wie folgt verfahren. Man sendet den **MDC**-Hashwert von  $x$  über einen authentisierten Kanal und prüft, ob der Datensatz nach der Übertragung noch denselben Hashwert liefert.

Kryptografische Hashverfahren mit symmetrischen Schlüsseln finden hauptsächlich bei der Authentifizierung von Nachrichten Verwendung. Diese werden daher auch als **MAC** (**message authentication code** [englisch] = Code zur Nachrichtenauthentifizierung) oder als **Authentikationscode** bezeichnet. Daneben gibt es auch Hashverfahren mit asymmetrischen Schlüsseln. Diese werden jedoch der Rubrik der Signaturverfahren zugeordnet, da mit ihnen ausschließlich digitale Unterschriften gebildet werden. Wie sich Nachrichten

mit einem MAC authentisieren lassen, ist in Abbildung 1.3 dargestellt. Man beachte, dass nun auch der Hashwert über den unsicheren Kanal gesendet wird.

Möchte Bob eine Nachricht  $x$  an Alice übermitteln, so berechnet er den zugehörigen MAC-Hashwert  $y = h_k(x)$  und fügt diesen der Nachricht  $x$  hinzu. Alice überprüft die Echtheit der empfangenen Nachricht  $(x', y')$ , indem sie ihrerseits den zu  $x'$  gehörigen Hashwert  $h_k(x')$  berechnet und das Ergebnis mit  $y'$  vergleicht. Der geheime Authentifikationsschlüssel  $k$  muss hierbei genau wie bei einem symmetrischen Kryptosystem über einen gesicherten Kanal vereinbart werden.

Indem Bob seine Nachricht  $x$  um den Hashwert  $y = h_k(x)$  ergänzt, gibt er Alice nicht nur die Möglichkeit, anhand von  $y$  die empfangene Nachricht auf Manipulationen zu überprüfen. Die Benutzung des geheimen Schlüssels  $k$  erlaubt zudem eine Überprüfung der Herkunft der Nachricht.

### 1.1.2 Schlüssellose Hashfunktionen

In diesem Abschnitt betrachten wir verschiedene Sicherheitsanforderungen an einzelne Hashfunktionen  $h$ . Dabei nehmen wir an, dass  $h$  öffentlich bekannt ist, d.h.  $h$  ist eine schlüssellose Hashfunktion (MDC).

Sei  $h: X \rightarrow Y$  eine Hashfunktion. Ein Paar  $(x, y) \in X \times Y$  heißt **gültig** für  $h$ , falls  $h(x) = y$  ist. Ein Paar  $(x, x')$  mit  $h(x) = h(x')$  heißt **Kollisionspaar** für  $h$ . Die Anzahl  $\|Y\|$  der Hashwerte bezeichnen wir mit  $m$ . Ist auch der Textraum  $X$  endlich,  $\|X\| = n$ , so heißt  $h$  eine  $(n, m)$ -**Hashfunktion**. In diesem Fall verlangen wir meist, dass  $n \geq 2m$  ist, und wir nennen  $h$  dann eine **Kompressionsfunktion** (*compression function*).

Da  $h$  öffentlich bekannt ist, ist es sehr einfach, für einen vorgegebenen Text  $x$  ein gültiges Paar  $(x, y)$  zu erzeugen. Für bestimmte kryptografische Anwendungen ist es wichtig, dass dies nicht möglich ist, falls der Hashwert  $y$  vorgegeben wird.

#### Problem P1: Bestimmung eines Urbilds

*Gegeben:* Eine Hashfkt.  $h: X \rightarrow Y$  und ein Hashwert  $y \in Y$ .

*Gesucht:* Ein Text  $x \in X$  mit  $h(x) = y$ .

Falls es einen immensen Aufwand erfordert, für einen *vorgegebenen* Hashwert  $y$  einen Text  $x$  mit  $h(x) = y$  zu finden, so heißt  $h$  **Einweg-Hashfunktion** (*one-way hash function* bzw. *preimage resistant hash function*). Diese Eigenschaft wird beispielsweise benötigt, wenn

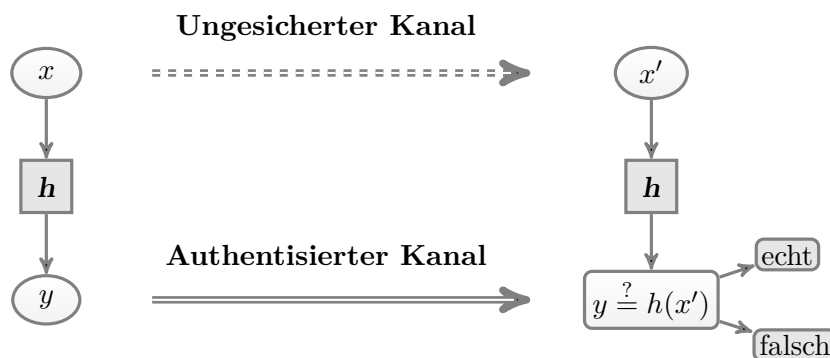


Abbildung 1.2: Einsatz eines MDC  $h$  zur Überprüfung der Integrität eines Datensatzes  $x$ .

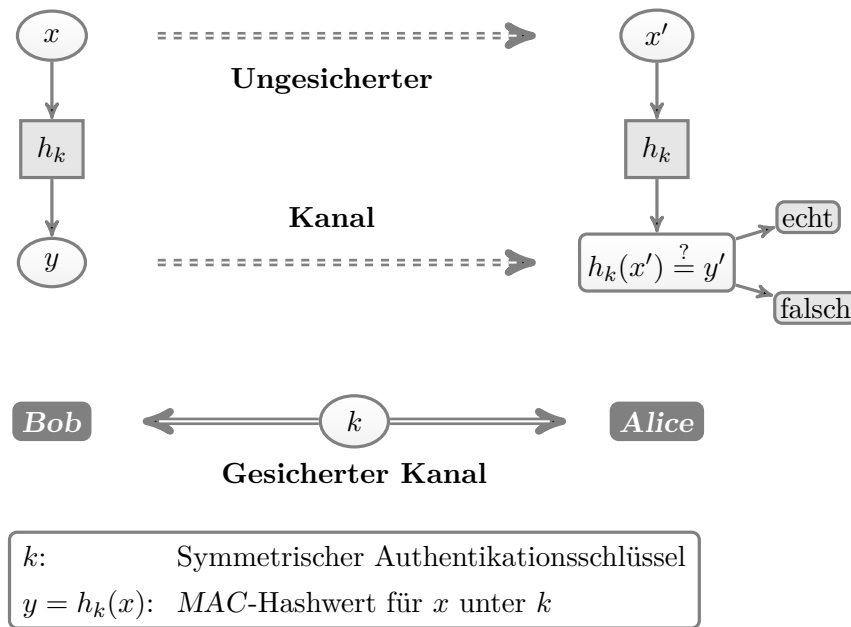


Abbildung 1.3: Verwendung eines MAC zur Nachrichtenauthentikation.

die Hashwerte der Benutzerpasswörter in einer öffentlich zugänglichen Datei abgespeichert werden, wie es bei manchen Unix-Systemen der Fall ist.

### Problem P2: Bestimmung eines zweiten Urbilds

*Gegeben:* Eine Hashfkt.  $h: X \rightarrow Y$  und ein Text  $x \in X$ .

*Gesucht:* Ein Text  $x' \in X \setminus \{x\}$  mit  $h(x') = h(x)$ .

Falls sich für einen vorgegebenen Text  $x$  nur mit großem Aufwand ein weiterer Text  $x' \neq x$  mit dem gleichen Hashwert  $h(x') = h(x)$  finden lässt, heißt  $h$  **schwach kollisionsresistent** (*weakly collision resistant* bzw. *second preimage resistant*). Diese Eigenschaft wird in der durch Abbildung 1.2 skizzierten Anwendung benötigt. Beim Versuch, eine digitale Signatur zu fälschen (siehe unten), sieht sich der Gegner dagegen mit folgender Problemstellung konfrontiert.

### Problem P3: Bestimmung einer Kollision

*Gegeben:* Eine Hashfkt.  $h: X \rightarrow Y$ .

*Gesucht:* Texte  $x \neq x' \in X$  mit  $h(x') = h(x)$ .

Falls sich dieses Problem nur mit einem immensen Aufwand lösen lässt, heißt  $h$  **(stark) kollisionsresistent** (*collision resistant*).

Obwohl die schwache Kollisionsresistenz eine gewisse Ähnlichkeit mit der Einweg-Eigenschaft aufweist, sind die beiden Eigenschaften im allgemeinen unvergleichbar. So muss eine schwach kollisionsresistente Funktion nicht notwendigerweise eine Einwegfunktion sein, da die Bestimmung eines Urbildes gerade für diejenigen Funktionswerte einfach sein kann, die nur ein einziges Urbild besitzen. Umgekehrt impliziert die Einweg-Eigenschaft auch nicht die schwache Kollisionsresistenz, da die Kenntnis eines Urbildes das Auffinden weiterer Urbilder sehr stark erleichtern kann.

**Prozedur FindPreimage( $h, y, q$ )**


---

```

1 wähle eine beliebige Menge  $X_0 = \{x_1, \dots, x_q\} \subseteq X$ 
2 for each  $x_i \in X_0$  do
3   if  $h(x_i) = y$  then return( $x_i$ ) else return(?)
```

---

Abbildung 1.4: Bestimmung eines Urbilds für einen Hashwert

**Das Zufallsorakelmodell (ZOM)**

Das ZOM dient dazu, die Effizienz verschiedener Angriffe auf eine Hashfunktion  $h: X \rightarrow Y$  nach oben abzuschätzen. Sind  $X$  und  $Y$  vorgegeben, so können wir eine Hashfunktion  $h: X \rightarrow Y$  dadurch „konstruieren“, dass wir für jedes  $x \in X$  zufällig ein  $y \in Y$  wählen und  $h(x)$  auf  $y$  setzen. Äquivalent hierzu ist, für  $h$  eine zufällige Funktion aus der Klasse  $F(X, Y)$  aller  $n^m$  Funktionen von  $X$  nach  $Y$  zu wählen. Dieses Verfahren ist auf Grund des hohen Aufwands zwar nicht mehr praktikabel, wenn  $n = \|X\|$  eine bestimmte Größe übersteigt. Es liefert uns aber ein theoretisches Modell für eine Hashfunktion mit „idealen“ kryptografischen Eigenschaften. Offensichtlich besteht für den Gegner die einzige Möglichkeit, Informationen über  $h$  zu erhalten, darin, sich für eine Reihe von Texten die zugehörigen Hashwerte zu besorgen (was der Befragung eines funktionalen Zufallsorakels entspricht).

Dass eine Zufallsfunktion  $h$  gute kryptografische Eigenschaften aufweist, rührt daher, dass der Hashwert  $h(x)$  für einen neuen Text  $x$  auch dann noch schwer vorhersagbar ist, wenn der Gegner bereits die Hashwerte einer beliebigen Zahl von Texten kennt.

**Proposition 1.** Sei  $X_0 = \{x_1, \dots, x_k\}$  eine beliebige Menge von  $k$  verschiedenen Texten aus  $X$  und seien  $y_1, \dots, y_k \in Y$ . Dann gilt für eine zufällig aus  $F(X, Y)$  gewählte Funktion  $h$  und für jedes Paar  $(x, y) \in (X - X_0) \times Y$ ,

$$\Pr[h(x) = y \mid h(x_i) = y_i \text{ für } i = 1, \dots, k] = 1/m.$$

Um eine obere Komplexitätsschranke für das Urbildproblem im ZOM zu erhalten, betrachten wir den in Abbildung 1.4 dargestellten Algorithmus. Hier (und bei den beiden folgenden Algorithmen) gibt der Parameter  $q$  die Anzahl der Hashwertberechnungen (also die Anzahl der gestellten Orakelfragen an das Zufallsorakel  $h$ ) wider. Der Zeitaufwand der Berechnung ist dabei proportional zu  $q$ .

**Satz 2.** FINDPREIMAGE( $h, y, q$ ) gibt mit Wahrscheinlichkeit  $\varepsilon = 1 - (1 - 1/m)^q$  ein Urbild von  $y$  aus (unabhängig von der Wahl der Menge  $X_0$ ).

*Beweis.* Sei  $y \in Y$  fest und sei  $X_0 = \{x_1, \dots, x_q\}$ . Für  $i = 1, \dots, q$  bezeichne  $E_i$  das Ereignis „ $h(x_i) = y$ “. Nach Proposition 1 sind diese Ereignisse stochastisch unabhängig und ihre Wahrscheinlichkeit ist  $\Pr[E_i] = 1/m$  ( $i = 1, \dots, q$ ). Also folgt

$$\Pr[E_1 \cup \dots \cup E_q] = 1 - \Pr[\overline{E_1} \cap \dots \cap \overline{E_q}] = 1 - (1 - 1/m)^q.$$

□

Der in Abbildung 1.5 dargestellte Algorithmus liefert uns eine obere Schranke für die Komplexität des Problems, ein zweites Urbild für  $h(x)$  zu bestimmen. Die Erfolgswahrscheinlichkeit lässt sich vollkommen analog zum vorherigen Satz bestimmen.

**Prozedur FindSecondPreimage( $h, x, q$ )**


---

```

1   $y := h(x)$ 
2  wähle eine beliebige Menge  $X_0 = \{x_1, \dots, x_{q-1}\} \subseteq X - \{x\}$ 
3  for each  $x_i \in X_0$  do
4    if  $h(x_i) = y$  then return( $x_i$ )
5  return(?)

```

---

Abbildung 1.5: Bestimmung eines 2. Urbilds für einen Hashwert

**Satz 3.** FINDSECONDPREIMAGE( $h, x, q$ ) gibt mit Wahrscheinlichkeit  $\varepsilon = 1 - (1 - 1/m)^{q-1}$  ein zweites Urbild  $x_0 \neq x$  von  $y = h(x)$  aus.

Ist  $q$  vergleichsweise klein, so ist bei beiden bisher betrachteten Angriffen  $\varepsilon \approx q/m$ . Um also auf eine Erfolgswahrscheinlichkeit von  $1/2$  zu kommen, ist  $q \approx m/2$  zu wählen.

Geht es lediglich darum, irgendein Kollisionspaar  $(x, x')$  aufzuspüren, so bietet sich ein sogenannter **Geburtstagsangriff** an. Dieser ist deutlich zeiteffizienter zu realisieren. Wie der Name schon andeutet, basiert dieser Angriff auf dem sogenannten Geburtstagsparadoxon, welches in seiner einfachsten Form folgendes besagt.

**Geburtstagsparadoxon:** Bereits in einer Schulklasse mit 23 Schulkindern haben mit einer Wahrscheinlichkeit größer  $1/2$  mindestens zwei Kinder am gleichen Tag Geburtstag (dies erscheint zwar verblüffend, wird aber durch die Praxis mehr als bestätigt).

Tatsächlich zeigt der nächste Satz, dass bei  $q$ -maligem Ziehen (mit Zurücklegen) aus einer Urne mit  $m$  Kugeln mit einer Wahrscheinlichkeit von

$$1 - (m-1)(m-2) \cdots (m-q+1)/m^{q-1}$$

eine Kugel zweimal gezogen wird. Für  $m = 365$  und  $q = 23$  ergibt dies einen Wert von ungefähr 0,507.

Zur Kollisionsbestimmung verwenden wir den in Abbildung 1.6 dargestellten Algorithmus. Bei einer naiven Implementierung würde zwar der Zeitaufwand für die Auswertung der if-Bedingung quadratisch von  $q$  abhängen. Trägt man aber jeden Text  $x$  unter dem Suchwort  $h(x)$  in eine (herkömmliche) Hashtabelle der Größe  $q$  ein, so wird der Zeitaufwand für die Bearbeitung jedes einzelnen Textes  $x$  im wesentlichen durch die Berechnung von  $h(x)$  bestimmt.

**Satz 4.** COLLISION( $h, q$ ) gibt mit Erfolgswahrscheinlichkeit

$$\varepsilon = 1 - \frac{(m-1)(m-2) \cdots (m-q+1)}{m^{q-1}}$$

ein Kollisionspaar  $(x, x')$  für  $h$  aus.

**Prozedur Collision( $h, q$ )**


---

```

1  wähle eine beliebige Menge  $X_0 = \{x_1, \dots, x_q\} \subseteq X - \{x\}$ 
2  for each  $x_i \in X_0$  do  $y_i := h(x_i)$ 
3  if  $\exists i \neq j : y_i = y_j$  then return( $x_i, x_j$ ) else return(?)

```

---

Abbildung 1.6: Bestimmung eines Kollisionspaares



---

```

1 wähle zufällig  $x \in X$ 
2  $x' := A(x)$ 
3 if  $x' \neq ?$  then return( $x, x'$ ) else return(?)

```

---

Abbildung 1.7: Reduktion des Kollisionsproblems auf das Problem, ein zweites Urbild zu bestimmen

*Beweis.* Sei  $X_0 = \{x_1, \dots, x_q\}$ . Für  $i = 1, \dots, q$  bezeichne  $E_i$  das Ereignis

$$“h(x_i) \notin \{h(x_1), \dots, h(x_{i-1})\}.”$$

Dann beschreibt  $E_1 \cap \dots \cap E_q$  das Ereignis “COLLISION( $h, q$ ) gibt ? aus” und für  $i = 1, \dots, q$  gilt

$$\Pr[E_i | E_1 \cap \dots \cap E_{i-1}] = \frac{m - i + 1}{m}.$$

Dies führt auf die Erfolgswahrscheinlichkeit

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 1 - \Pr[E_1 \cap \dots \cap E_q] \\ &= 1 - \Pr[E_1] \Pr[E_2 | E_1] \cdots \Pr[E_q | E_1 \cap \dots \cap E_{q-1}] \\ &= 1 - \left(\frac{m-1}{m}\right) \left(\frac{m-2}{m}\right) \cdots \left(\frac{m-q+1}{m}\right). \end{aligned}$$

□

Mit  $1 - x \approx e^{-x}$  folgt

$$\varepsilon = 1 - \prod_{i=1}^{q-1} \left(1 - \frac{i}{m}\right) \approx 1 - \prod_{i=1}^{q-1} e^{-\frac{i}{m}} = 1 - e^{-\frac{1}{m} \sum_{i=1}^{q-1} i} = 1 - e^{-\frac{q(q-1)}{2m}} \approx q^2/2m.$$

Somit erhalten wir die Abschätzung

$$q \approx c_\varepsilon \sqrt{m}$$

mit  $c_\varepsilon = \sqrt{2\varepsilon}$ . Für  $\varepsilon = 1/2$  ergibt sich also  $q \approx \sqrt{m}$ . Besitzt also eine binäre Hashfunktion  $h: \{0, 1\}^n \rightarrow \{0, 1\}^m$  die Hashwertlänge  $m = 128$  Bit, so müssen im ZOM  $q \approx 2^{64}$  Texte gehasht werden, um mit einer Wahrscheinlichkeit von  $1/2$  eine Kollision zu finden. Um einem Geburtstagsangriff widerstehen zu können, sollte eine Hashfunktion mindestens eine Hashwertlänge von 128 oder besser 160 Bit haben.

## Vergleich von Sicherheitsanforderungen

In diesem Abschnitt zeigen wir, dass stark kollisionsresistente Hashfunktionen sowohl schwach kollisionsresistent als auch Einweghashfunktionen sein müssen.

**Satz 5.** Sei  $h: X \rightarrow Y$  eine  $(n, m)$ -Hashfunktion. Dann ist das Problem P3, ein Kollisionspaar für  $h$  zu bestimmen, auf das Problem P2, ein zweites Urbild zu bestimmen, reduzierbar. Folglich sind stark kollisionsresistente Hashfunktionen auch schwach kollisionsresistent.

*Beweis.* Sei  $A$  ein Las-Vegas Algorithmus, der für ein zufällig aus  $X$  gewähltes  $x$  mit Erfolgswahrscheinlichkeit  $\varepsilon$  ein zweites Urbild  $x'$  für  $h$  liefert. Dann ist klar, dass der in Abbildung 1.7 dargestellte Las-Vegas Algorithmus mit Wahrscheinlichkeit  $\varepsilon$  ein Kollisionspaar ausgibt. □

---

```

1 wähle zufällig  $x \in X$ 
2  $y := h(x)$ 
3  $x' := A(y)$ 
4 if  $x \neq x'$  then return( $x, x'$ ) else return(?)

```

---

Abbildung 1.8: Reduktion des Kollisionsproblems auf das Urbildproblem

Als nächstes zeigen wir, wie sich das Kollisionsproblem auf das Urbildproblem reduzieren lässt.

**Satz 6.** Sei  $h: X \rightarrow Y$  eine  $(n, m)$ -Hashfunktion mit  $n \geq 2m$ . Dann ist das Problem P3, ein Kollisionspaar für  $h$  zu bestimmen, auf das Problem P1, ein Urbild zu bestimmen, reduzierbar.

*Beweis.* Sei  $A$  ein Invertierungsalgorithmus für  $h$ , d.h.  $A$  berechnet für jeden Hashwert  $y$  in  $W(h) = \{h(x) \mid x \in X\}$  ein Urbild  $x$  mit  $h(x) = y$ . Betrachte den in Abbildung 1.8 dargestellten Las-Vegas Algorithmus B.

Sei  $\mathcal{C} = \{h^{-1}(y) \mid y \in Y\}$ . Dann hat  $B$  eine Erfolgswahrscheinlichkeit von

$$\sum_{C \in \mathcal{C}} \frac{\|C\|}{\|X\|} \cdot \frac{\|C\| - 1}{\|C\|} = \frac{1}{n} \sum_{C \in \mathcal{C}} (\|C\| - 1) = (n - m)/n \geq \frac{1}{2}.$$

□

## Iterierte Hashfunktionen

In diesem Abschnitt beschäftigen wir uns mit der Frage, wie sich aus einer kollisionsresistenten Kompressionsfunktion

$$h: \{0, 1\}^{m+t} \rightarrow \{0, 1\}^m$$

eine kollisionsresistente Hashfunktion

$$\hat{h}: \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^l$$

konstruieren lässt. Hierzu betrachten wir folgende kanonische Konstruktionsmethode.

**Preprocessing:** Transformiere  $x \in \{0, 1\}^*$  mittels einer Funktion

$$y: \{0, 1\}^* \rightarrow \bigcup_{r \geq 1} \{0, 1\}^{rt}$$

zu einem String  $y(x)$  mit der Eigenschaft  $|y(x)| \equiv_t 0$ .

**Processing:** Sei  $IV \in \{0, 1\}^m$  ein öffentlich bekannter Initialisierungsvektor und sei  $y(x) = y_1 \cdots y_r$  mit  $|y_i| = t$  für  $i = 1, \dots, r$ . Berechne eine Folge  $z_0, \dots, z_r$  von Strings  $z_i \in \{0, 1\}^m$  wie folgt:

$$z_i = \begin{cases} IV, & i = 0, \\ h(z_{i-1}y_i), & i = 1, \dots, r. \end{cases}$$

**Optionale Ausgabetransformation:** Berechne den Hashwert  $\hat{h}(x) = g(z_r)$ , wobei  $g: \{0, 1\}^m \rightarrow \{0, 1\}^l$  eine öffentlich bekannte Funktion ist. (Meist wird für  $g$  die Identität verwendet.)