



Julius-Maximilians-

UNIVERSITÄT
WÜRZBURG

Lehrstuhl für

INFORMATIK I

Algorithmen & Komplexität



Institut für Informatik

Algorithmen und Datenstrukturen

Wintersemester 2020/21
12. Vorlesung

Hashing

Übungen

- Begründen Sie grundsätzlich alle Behauptungen – außer die Aufgabe verlangt explizit keine Begründung.
- Pseudocode allein genügt *nie!*
Algorithmen immer (auch) mit Worten erklären.
Verweisen Sie dabei auf Zeilen Ihres Pseudocodes.
- Kommentieren Sie Ihren Java-Code *beim Programmieren!*
Das hilft Fehler zu vermeiden. Außerdem verstehen Sie Ihren Code auch noch beim nächsten Mal, wenn Sie draufschauen :-)

What's the problem?

Wörterbuch

Spezialfall einer dynamischen Menge

Anwendung: im Compiler Symboltabelle für Schlüsselwörter

Abstrakter Datentyp

stellt folgende Operationen bereit:

Insert, Delete, Search

Implementierung

heute: Hashing (engl. to hash = zerhacken, kleinschneiden)

Suchzeit: – im schlechtesten Fall $\Theta(n)$,

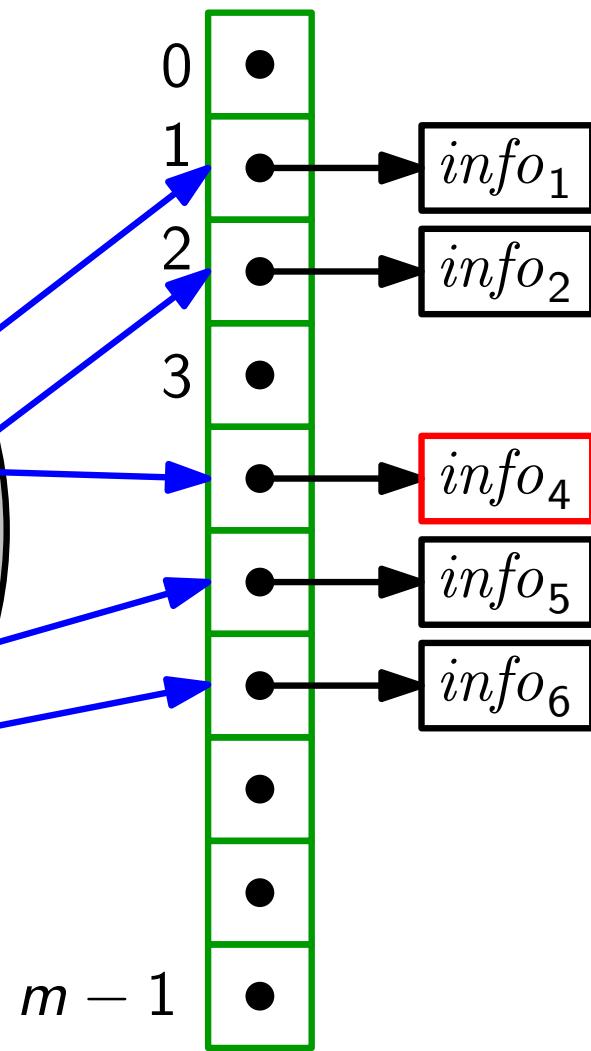
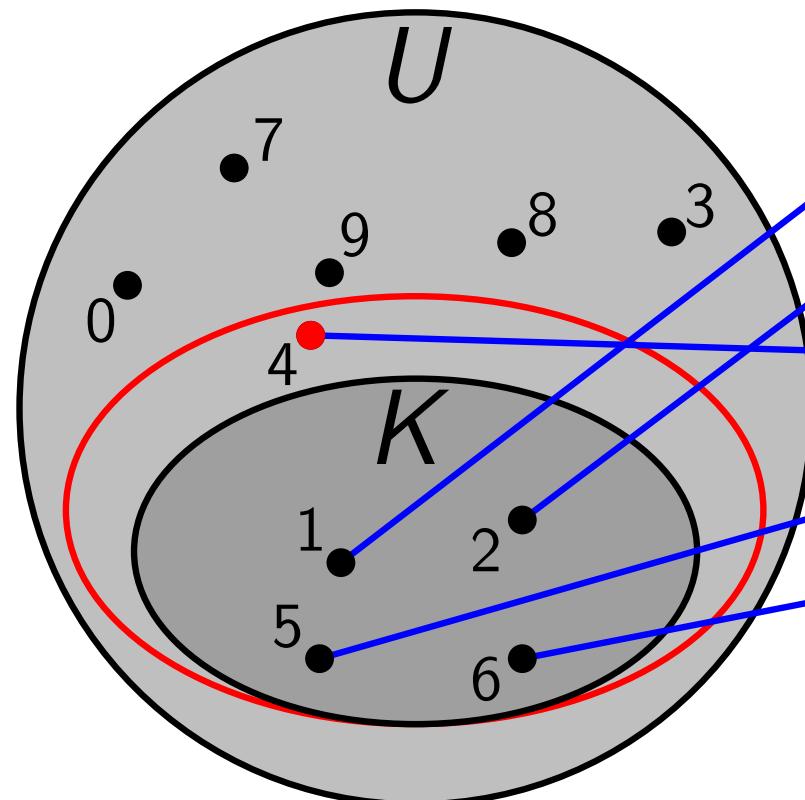
– erwartet $O(1)$ unter akzeptablen Annahmen

Direkte Adressierung

- Annahmen:**
- Schlüssel aus kleinem *Universum* $U = \{0, \dots, m-1\}$
 - Schlüssel paarweise verschieden (dyn. Menge!)

Universum

Menge der
momentan
benutzten
Schlüssel



Direkte Adressierung

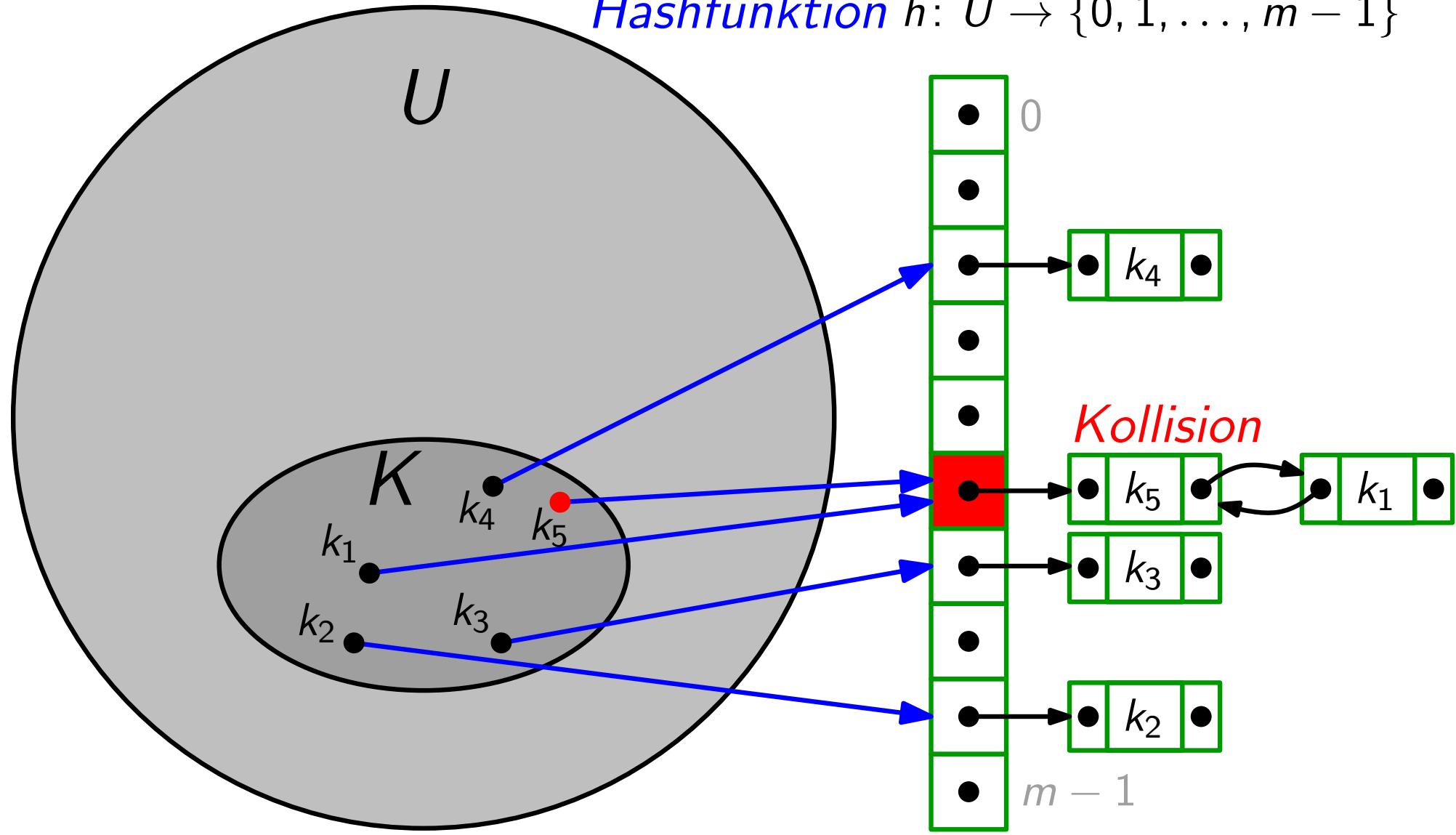
Annahmen: – Schlüssel aus kleinem *Universum* $U = \{0, \dots, m-1\}$
 – Schlüssel paarweise verschieden (dyn. Menge!)

Abs. Datentyp	Implementierung
HashDA(int m)	$T = \text{new info}[0..m - 1]$ ptr[] T for $j = 0$ to $m - 1$ do $T[j] = nil$ $\// T[j] = \text{Zeiger auf } j. \text{ Datensatz}$
ptr Insert(key k , info i)	$\// \text{lege neuen Datensatz an}$ $\// \text{und initialisiere ihn mit } i$ $T[k] = \text{new info}(i)$
Delete(key k)	<ul style="list-style-type: none"> • Speicher freigeben, auf den $T[k]$ zeigt • $T[k] = nil$ Laufzeiten?
ptr Search(key k)	return $T[k]$ Ins, Del, Search $O(1)$ $\text{im schlechtesten Fall}$

Hashing mit Verkettung

Annahme: großes Universum U , d.h. $|U| \gg |K|$

Hashfunktion $h: U \rightarrow \{0, 1, \dots, m - 1\}$



Hashing mit Verkettung

Voraussetzungen: $|U| \gg |K|$, Zugriff auf Hashfunktion h

Abs. Datentyp

```
HashChaining(  
    int m)
```

```
ptr Insert(key k)
```

```
Delete(ptr x)
```

```
ptr Search(key k)
```

Implementierung

```
T = new List[0..m - 1]           ptr[] T  
for j = 0 to m - 1 do T[j] = List()
```

Aufgabe:

Schreiben Sie Insert, Delete & Search.
Verwenden Sie Methoden der DS List!

Hashing mit Verkettung

Voraussetzungen: $|U| \gg |K|$, Zugriff auf Hashfunktion h

Abs. Datentyp

```
HashChaining(  
    int m)
```

```
ptr Insert(key k)
```

```
Delete(ptr x)
```

```
ptr Search(key k)
```

Implementierung

```
T = new List[0..m - 1]           ptr[] T  
for j = 0 to m - 1 do T[j] = List()
```

```
return T[h(k)].Insert(k)
```

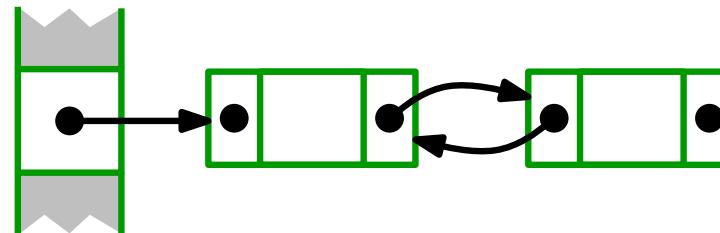
```
T[h(x.key)].Delete(x)
```

```
return T[h(k)].Search(k)
```

Analyse

Definition: Die *Auslastung* α einer Hashtabelle sei n/m , also der Quotient der Anzahl der gespeicherten Elemente und der Tabellengröße.

Bemerkung: α ist die durchschnittliche Länge einer *Kette*.



Laufzeit: $\Theta(n)$ im schlimmsten Fall: z.B. $h(k) = 0 \quad \forall k \in K$.

Annahme: *Einfaches uniformes Hashing*: jedes Element von U wird mit gleicher WK in jeden der m Einträge der Tabelle gehasht – unabhängig von anderen Elementen.
D.h. $\Pr[h(k) = i] = 1/m$

Suche

- Fälle:**
- 1) erfolglose Suche
 - 2) erfolgreiche Suche

Notation: $n_j = T[j].length$ für $j = 0, 1, \dots, m - 1$.

Dann gilt: $n = n_0 + n_1 + \dots + n_{m-1}$.

$$\mathbf{E}[n_j] = n/m = \alpha$$

Satz. Unter der Annahme des einfachen uniformen Hashings durchsucht eine *erfolglose* Suche erwartet α Elemente.

Beweis. Wenn die Suche nach einem Schlüssel k erfolglos ist, muss $T[h(k)]$ komplett durchsucht werden.

$$\mathbf{E}[T[h(k)].length] = \mathbf{E}[n_{h(k)}] = \alpha.$$

Erfolgreiche Suche

Satz. Unter der Annahme des einfachen uniformen Hashings durchsucht eine *erfolgreiche* Suche erwartet höchstens $1 + \alpha/2$ Elemente.

Beweis. Noch 'ne Annahme:

Jedes der n Elemente in T ist mit gleicher WK das gesuchte Element x .

$$\# \text{ durchsuchte Elem.} = \# \text{ Elem. } \underset{\text{räumlich}}{\text{vor}} x \text{ in } T[h(x)] + 1$$

$$X = \# \text{ Elem., die } \underset{\text{zeitlich}}{\text{nach}} x \text{ in } T[h(x)] \text{ eingefügt wurden} + 1$$

Sei x_1, x_2, \dots, x_n die Folge der Schlüssel in der Reihenfolge des Einfügens.

Definiere Indikator-ZV: $X_{ij} = 1$ falls $h(x_i) = h(x_j)$.

Klar: $\mathbf{E}[X_{ij}] = \Pr[X_{ij} = 1] = 1/m$ [einf. unif. Hashing!]

Erfolgreiche Suche

$X = \# \text{ Elem., die nach } x \text{ in } T[h(x)] \text{ eingefügt wurden} + 1$

$$\mathbf{E}[X] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{E}[1 + \# \text{ Elem., die nach } x_i \text{ in } T[h(x_i)] \text{ eingefügt wurden}]$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \underbrace{\mathbf{E} [\# \text{ Elem. } x_j \text{ mit } j > i \text{ und } h(x_i) = h(x_j)]}_{\sum_{j=i+1}^n X_{ij}}$$


Definiere Indikator-ZV: $X_{ij} = 1$ falls $h(x_i) = h(x_j)$.

Erfolgreiche Suche

$X = \# \text{ Elem., die nach } x \text{ in } T[h(x)] \text{ eingefügt wurden} + 1$

$$\mathbf{E}[X] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{E}[1 + \# \text{ Elem., die nach } x_i \text{ in } T[h(x_i)] \text{ eingefügt wurden}]$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{E} [\underbrace{\# \text{ Elem. } x_j \text{ mit } j > i \text{ und } h(x_i) = h(x_j)}]$$

$$= 1 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{E} \left[\sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right]$$

$$= 1 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \mathbf{E}[X_{ij}] = 1 + \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n 1$$

$n - i$

$$= 1 + \frac{1}{nm} \left(n^2 - \frac{n^2 + n}{2} \right) = 1 + \frac{n^2 - n}{2nm} = 1 + \frac{n-1}{2m} < 1 + \frac{\alpha}{2}$$

□

Zusammenfassung Ergebnisse

Satz. Unter der Annahme des einfachen uniformen Hashings durchsucht beim Hashing mit Verkettung eine

- *erfolgreiche* Suche erwartet höch. $1 + \alpha/2$ Elemente
- *erfolglose* Suche erwartet α Elemente.

Und *Einfügen*? Und *Löschen*?

Satz. Unter der Annahme des einfachen uniformen Hashings laufen *alle Wörterbuch-Operationen* in (erwartet) konstanter Zeit, falls $n = O(m)$.

Was ist eine gute Hashfunktion?

1. so „zufällig“ wie möglich – um der Annahme des einfachen uniformen Hashings möglichst nahe zu kommen.

- Hashfunktion sollte die Schlüssel aus dem Universum U möglichst gleichmäßig über die m Plätze der Hashtabelle verteilen.
- Hashfunktion sollte Muster in der Schlüsselmenge K gut auflösen.

Beispiel: $U = \text{Zeichenketten}$, $K = \text{Wörter der dt. Sprache}$

h : nimm die ersten drei Buchstaben \rightarrow Zahl

schlecht:
– viele Wörter fangen mit „sch“ an
 \Rightarrow selber Hashwert
– andere Buchst. haben keinen Einfluss

2. einfach zu berechnen!

Annahme: Alle Schlüssel sind (natürliche) Zahlen.

Suche also Hashfunktionen: $\mathbb{N} \rightarrow \{0, \dots, m - 1\}$

Rechtfertigung:

33	!	49	1	65	A	81	Q	97	a	113	q
34	"	50	2	66	B	82	R	98	b	114	r
35	#	51	3	67	C	83	S	99	c	115	s
36	\$	52	4	68	D	84	T	100	d	116	t
37	%	53	5	69	E	85	U	101	e	117	u
38	&	54	6	70	F	86	V	102	f	118	v
39	,	55	7	71	G	87	W	103	g	119	w
40	(	56	8	72	H	88	X	104	h	120	x
41	)	57	9	73	I	89	Y	105	i	121	y
42	*	58	:	74	J	90	Z	106	j	122	z
43	+	59	;	75	K	91	[	107	k	123	{
44	,	60	<	76	L	92	\	108	l	124	|
45	-	61	=	77	M	93	]	109	m	125	}
46	.	62	>	78	N	94	^	110	n	126	~
47	/	63	?	79	O	95	_	111	o	127	-
48	0	64	@	80	P	96	'	112	p		

American
Standard
Code of
Information
Interchange

Zum Beispiel:

$$\text{AW} \rightarrow (65, 87)_{10} = (1000001, 1010111)_2 \rightarrow 1000001\ 1010111_2 \\ = 65 \cdot 128 + 87 = 8407_{10}$$

Divisionsmethode

Hashfunktion $h: \mathbb{N} \rightarrow \{0, \dots, m - 1\}$

$$k \mapsto k \bmod m$$

Beispiel: $h(k) = k \bmod 1024$

$$h(1026) = 2$$

$$h(2050) = 2$$

10 niedrigwertigste Stellen

$$1026_{10} = 01\overbrace{00000000}^{10 \text{ niedrigwertigste Stellen}}10_2$$

$$2050_{10} = 100000000010_2$$

D.h. die 2 höherwertigsten Stellen werden von h ignoriert

Moral: vermeide $m = \text{Zweierpotenz}$

Strategie: wähle für m eine Primzahl, entfernt von Zweierpotenz



löst Muster gut auf

Multiplikationsmethode

Hashfunktion $h: \mathbb{N} \rightarrow \{0, \dots, m-1\}$

$$k \mapsto \lfloor m \cdot (\underbrace{kA \bmod 1}_{\text{gebrochener Anteil von } kA}) \rfloor, \text{ wobei } 0 < A < 1.$$

gebrochener Anteil von kA
d.h. $kA - \lfloor kA \rfloor$

- Verschiedene Werte von A „funktionieren“ verschieden gut.

gut: z.B. $A \approx \frac{\sqrt{5}-1}{2}$ [Knuth: The Art of Computer Programming III, '73]

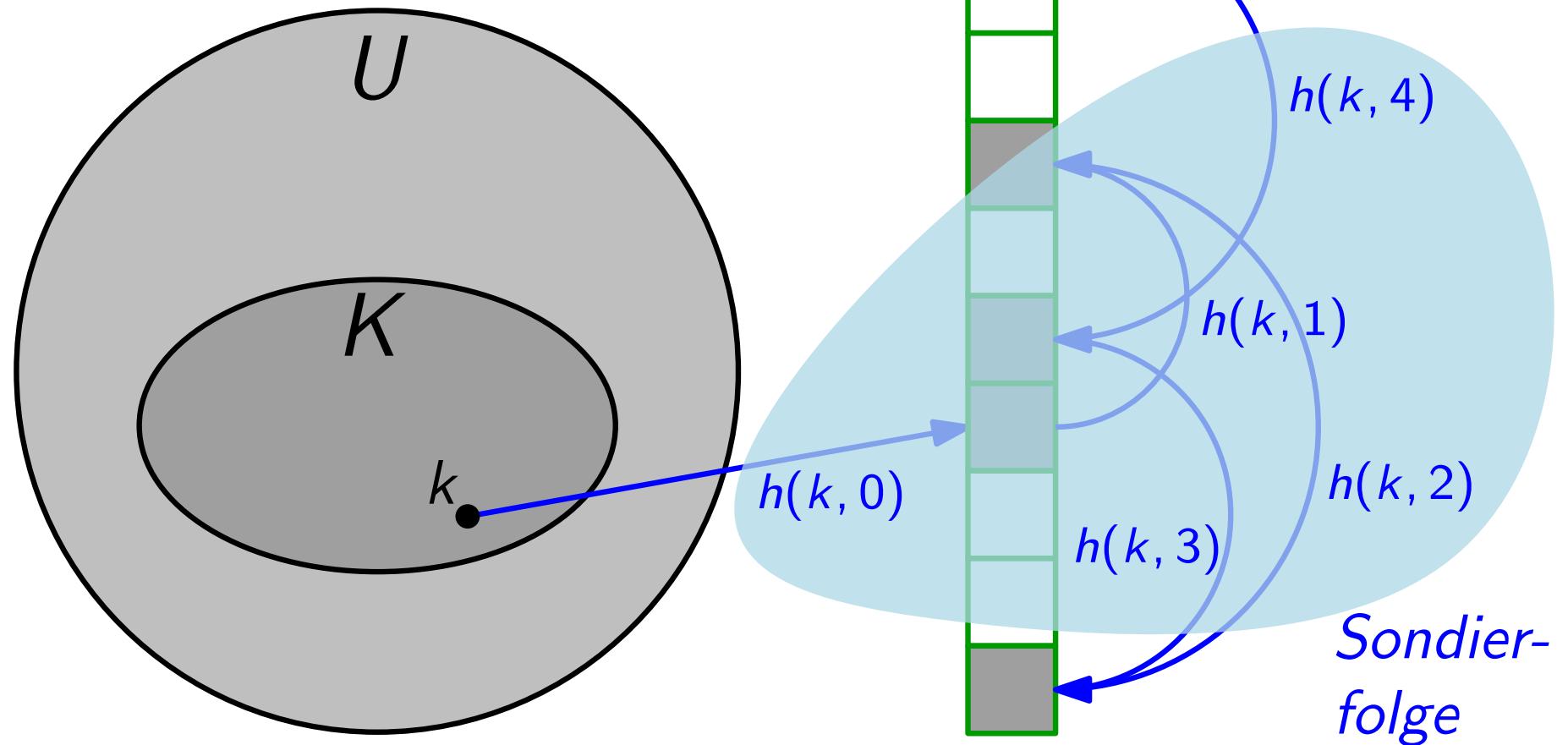
- Vorteil ggü. Divisionsmethode: Wahl von m relativ beliebig.
Insbesondere $m = \text{Zweierpotenz}$ möglich.
 \Rightarrow schnell berechenbar (in Java verschiebt `a << s` die Dualzahlendarstellung von a um s Stellen nach links)

Hashing mit offener Adressierung

Alle Elemente werden direkt in der Hashtabelle gespeichert.

⇒ Tabelle kann volllaufen $\Rightarrow \alpha \leq 1$

Strategie zur Kollisionsauflösung:



Hashing mit offener Adressierung

Abs. Datentyp

HashOA(int m)

int Insert(key k)

int Search(key k)

Implementierung

$T = \text{new key}[0..m - 1]$

key[] T

for $j = 0$ to $m - 1$ do $T[j] = -1$

$i = 0$

repeat

$j = h(k, i)$

if $T[j] == -1$ **then**

$T[j] = k$

return j

else $i = i + 1$

until $i == m$

error “table overflow”

Aufgabe:

Schreiben Sie Search mit repeat-Schleife!

Hashing mit offener Adressierung

Abs. Datentyp

```
HashOA(int m)
```

```
int Insert(key k)
Search
```

...und Delete()?

Umständlich!
Dann lieber
Hashing mit
Verkettung!

```
int Search(key k)
```

Implementierung

```
T = new key[0..m - 1]
```

key[] T

```
for j = 0 to m - 1 do T[j] = -1
```

```
i = 0
```

```
repeat
```

```
    j = h(k, i)
```

```
    if T[j] == k 1 then
```

```
        T[j] = k
```

```
        return j
```

```
    else i = i + 1
```

```
until i == m or T[j] == -1
```

~~error "table overflow"~~ ~~return~~ Aufgabe:

Schreiben Sie Search mit repeat-Schleife!

Berechnung von Sondierfolgen

Hashfkt. für offene Adr. $h: U \times \{0, \dots, m-1\} \rightarrow \{0, \dots, m-1\}$
 $\langle h(k, 0), h(k, 1), \dots, h(k, m-1) \rangle$ heißt *Sondierfolge* (für k).

Voraussetzungen:

- eine Sondierfolge ist eine Permutation von $\langle 0, 1, \dots, m-1 \rangle$
 (Sonst durchläuft die Folge nicht alle Tabelleneinträge genau $1\times!$)
- Existenz von „gewöhnlicher“ Hashfkt $h_0: U \rightarrow \{0, \dots, m-1\}$

Verschiedene Typen von Sondierfolgen:

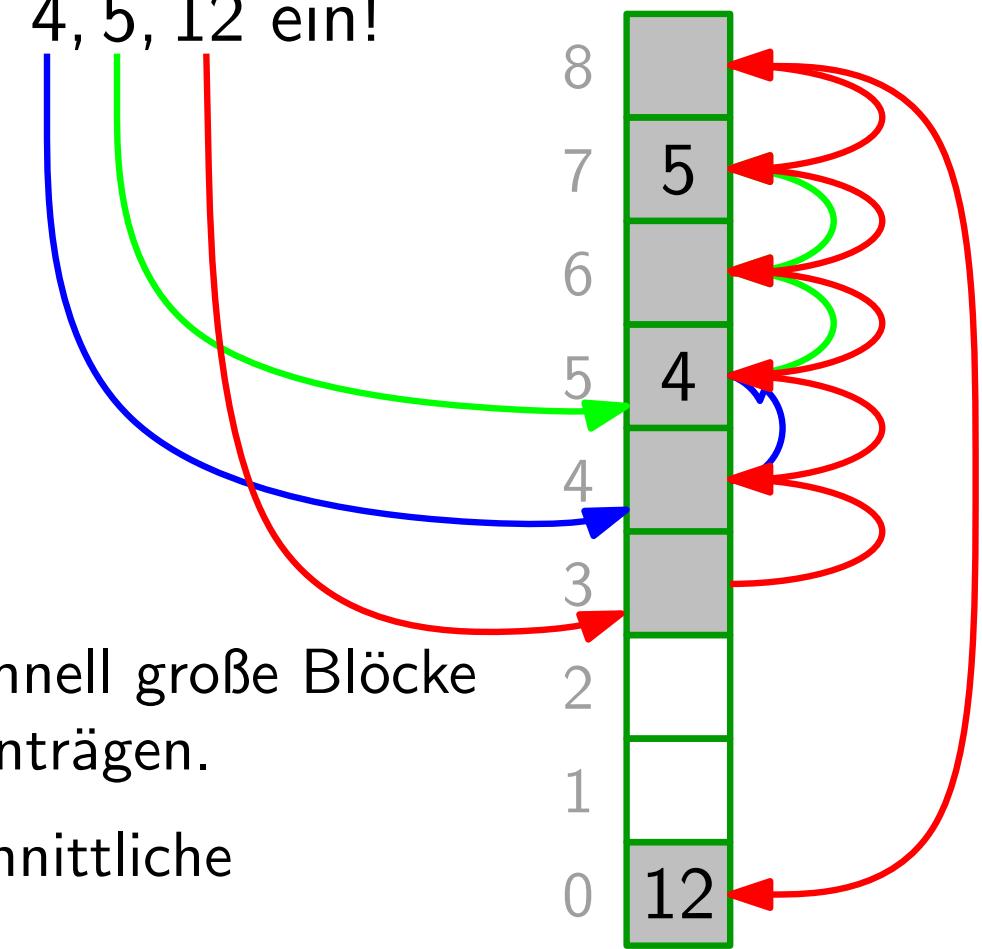
- Lineares Sondieren:
$$h(k, i) = (h_0(k) + i) \bmod m$$
- Quadratisches Sondieren:
$$h(k, i) = (h_0(k) + c_1 i + c_2 i^2) \bmod m$$
- Doppeltes Hashing:
$$h(k, i) = (h_0(k) + i \cdot h_1(k)) \bmod m$$

Lineares Sondieren

Sondierfolge: $h(k, i) = (h_0(k) + i) \bmod m$

Beispiel: $h_0(k) = k \bmod 9$ und $m = 9$

Füge Schlüssel 4, 5, 12 ein!



Problem:

primäres
Clustering

Es bilden sich schnell große Blöcke von besetzten Einträgen.

⇒ hohe durchschnittliche Suchzeit!

Quadratisches Sondieren

Sondierfolge: $h(k, i) = (h_0(k) + c_1 i + c_2 i^2) \bmod m$

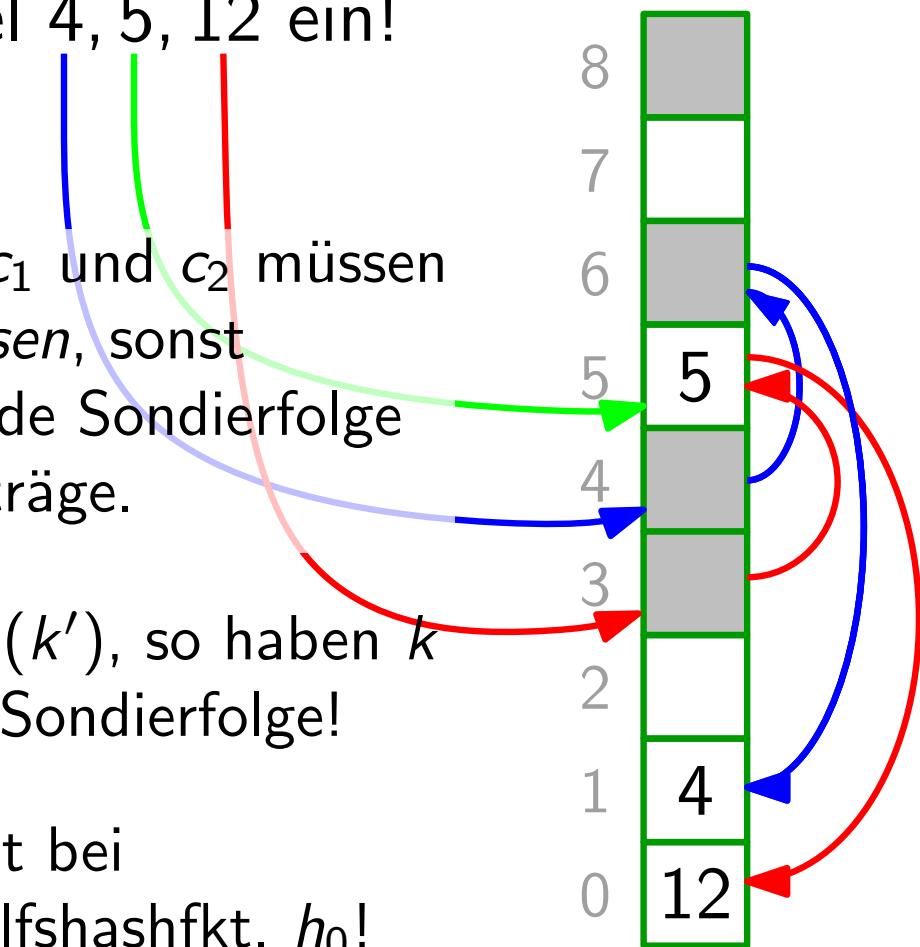
Beispiel: $h_0(k) = k \bmod 9$ und $m = 9$ und $c_1 = c_2 = 1$

Füge Schlüssel 4, 5, 12 ein!

Problem: Die Größen m , c_1 und c_2 müssen zu *einander passen*, sonst besucht nicht jede Sondierfolge alle Tabelleneinträge.

Problem: Falls $h_0(k) = h_0(k')$, so haben k und k' dieselbe Sondierfolge!

⇒ hohe Suchzeit bei schlechter Hilfshashfkt. h_0 !



Doppeltes Hashing

Sondierfolge: $h(k, i) = (h_0(k) + i \cdot h_1(k)) \bmod m$

- Vorteile:**
- Sondierfolge hängt zweifach vom Schlüssel k ab!
 - potentiell m^2 verschiedene Sondierfolgen möglich
(bei linearem & quadratischem Sondieren nur m .)

Frage: Was muss gelten, damit eine Sondierfolge alle Tabelleneinträge durchläuft?

Antwort: $k' = h_1(k)$ und m müssen *teilerfremd* sein ,
d.h. $\text{ggT}(k', m) = 1$. [$\text{ggT}(a, b) =_{\text{Def.}} \max\{t : t|a \text{ und } t|b\}$]

Also: z.B. $m =$ Zweierpotenz und h_1 immer ungerade.
oder $m =$ prim und $0 < h_1(k) < m$ für alle k .

Uniformes Hashing

[kein neues Hashverfahren, sondern eine (idealisierte) Annahme...]

Annahme: Die Sondierfolge jedes Schlüssels ist gleich wahrscheinlich eine der $m!$ Permutationen von $\langle 0, 1, \dots, m - 1 \rangle$.

Satz: Unter der Annahme von uniformem Hashing ist die erwartete Anz. der versuchten Tabellenzugriffe bei offener Adressierung und

- erfolgloser Suche $\leq \frac{1}{1 - \alpha}$
- erfolgreicher Suche $\leq \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1}{1 - \alpha}$

d.h. Suche dauert erwartet $O(1)$ Zeit, falls α konst.

Zusammenfassung Hashing

mit Verkettung

- + funktioniert für $n \in O(m)$

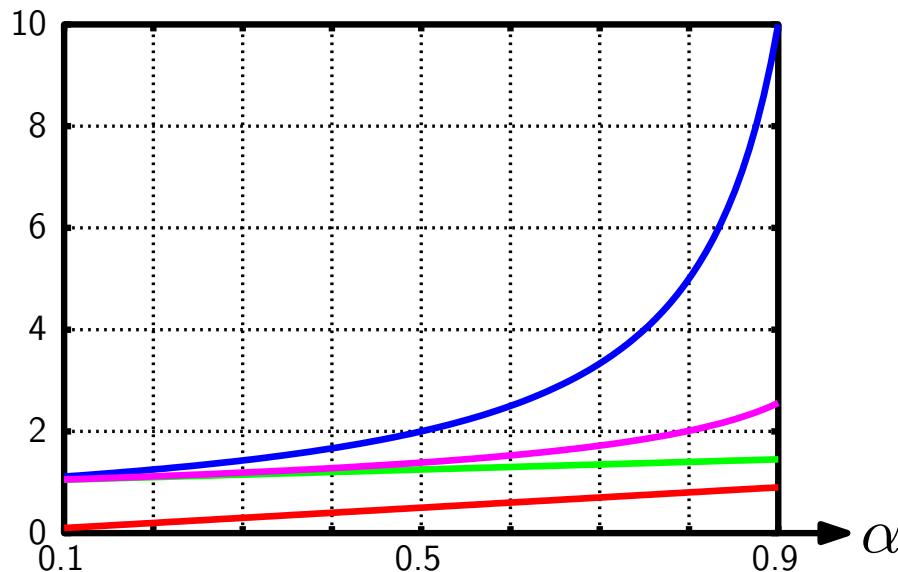
- + gute erwartete Suchzeit:

erfolglos: α [= n/m]

erfolgreich: $1 + \frac{\alpha}{2}$

[Modell: einfaches uniformes Hashing]

- Listenoperationen langsam



mit offener Adressierung

- funktioniert nur für $n \leq m$

- langsam, wenn $n \approx m$

Sondiermethoden:

- lineares Sondieren
- quadratisches Sondieren
- doppeltes Hashing

- + gute erwartete Suchzeit:

erfolglos: $\frac{1}{1-\alpha}$

erfolgreich: $\frac{1}{\alpha} \ln \frac{1}{1-\alpha}$

[Modell: uniformes Hashing]