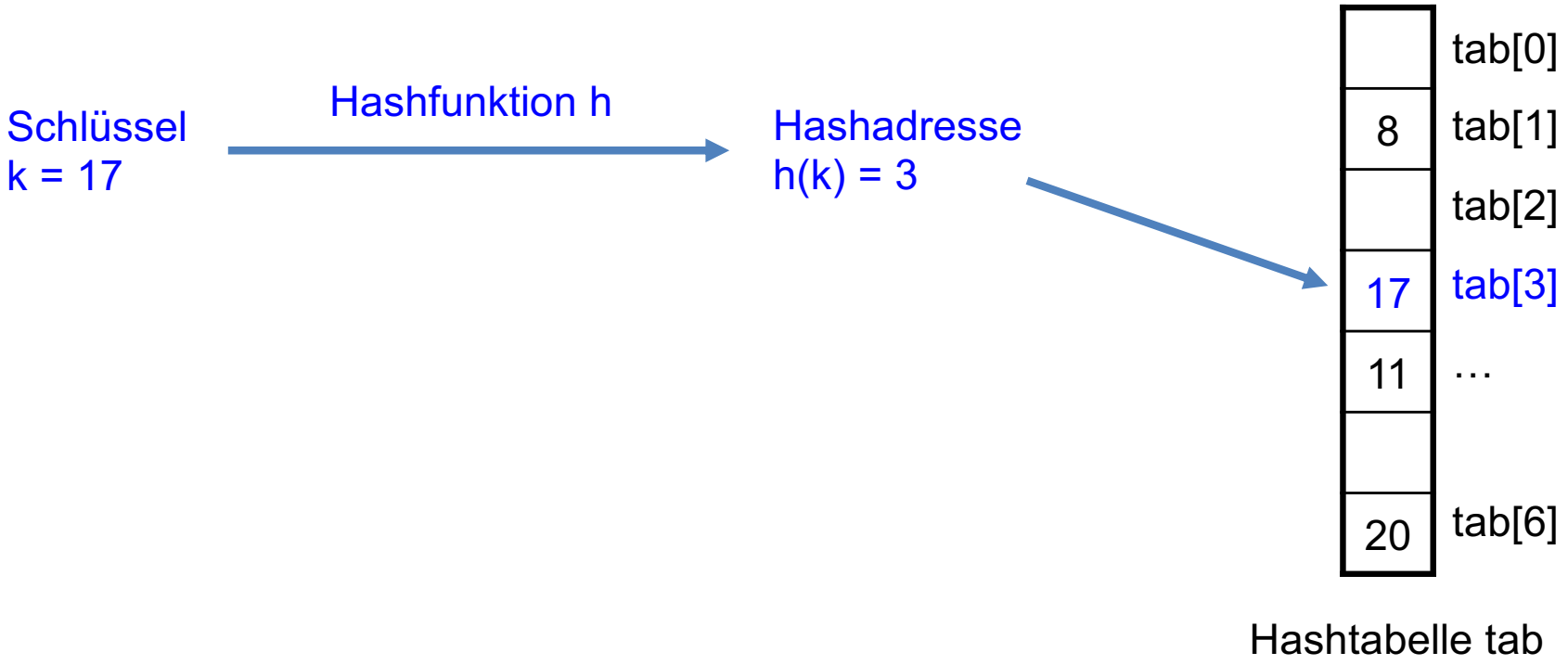
2. Suchen mit Hashverfahren

- Idee
- Hashfunktion
- Hashverfahren mit linear verketteten Listen
- Offene Hashverfahren
- Dynamische Hashverfahren
- Hashverfahren in Java

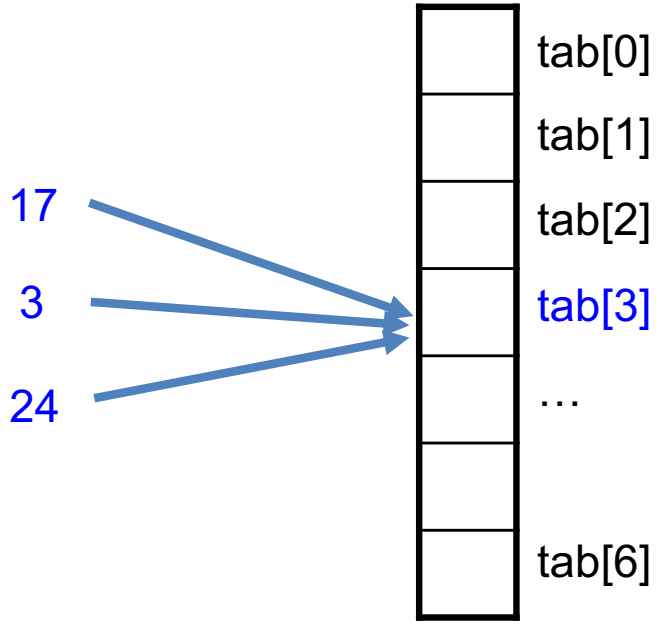
Idee der Hashverfahren

- Mit einer Hashfunktion h wird aus einem Schlüssel k eine Hashadresse h(k) (positive ganze Zahl) berechnet.
- Die Hashadresse gibt den Index in einem Feld an, wo der Datensatz abgespeichert werden kann bzw. abgespeichert ist.
- Das Feld wird auch Hashtabelle genannt.



Wichtige Anforderungen an Hashfunktionen

- Hashfunktion h sollte einfach zu berechnen sein.
- Gute Streuwirkung:
  - vorkommende Schlüssel sollten sich möglichst gut über die Tabelle verteilen.
  - also möglichst wenig Adresskollisionen



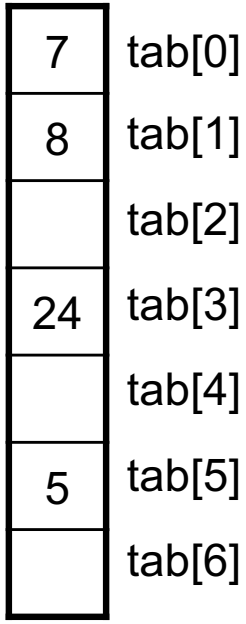
- Einfache Hashfunktion: h(k) = k mod m mit m = 7
- Hashfunktion bildet jedoch Schlüssel k = 17, 3 und 24 auf gleiche Adresse 3 ab.
- → Adresskollision

Hashfunktion: Divisions-Rest-Methode

h(k) = k mod m;

- k ist Schlüssel
- m ist Tabellengröße
- m sollte möglichst Primzahl sein

Beispiel



- Füge 7, 24, 5, 8 in eine Hashtabelle der Größe m = 7 ein.

Hashfunktion: Multiplikative Methode

$$h(k) = \lfloor m * (k\phi^{-1} - \lfloor k\phi^{-1} \rfloor) \rfloor$$

$(k\phi^{-1} - \lfloor k\phi^{-1} \rfloor) \in [0, 1)$

$m * (k\phi^{-1} - \lfloor k\phi^{-1} \rfloor) \in \{0,1, \ldots m-1\}$

- k ist Schlüssel
- m ist Tabellengröße
- $\phi^{-1} = (\sqrt{5} - 1)/2 \approx 0.6180339887$ ist Kehrwert des goldenen Schnitts.
- $\lfloor x \rfloor$ rundet auf die nächste kleinere ganze Zahl ab.

Beispiel

tab[0]	5
[1]	10
[2]	2
[3]	7
[4]	4
[5]	9
[6]	1
[7]	6
[8]	3
[9]	8

- Füge 1, 2, 3, ..., 10 in eine Hashtabelle der Größe m = 10 ein.
- Elemente werden ohne Kollision verteilt!

Bei Division-Rest-Methode sollte Tabellengröße Primzahl sein

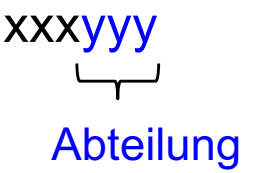
Beispiel Personaldaten –
Wahl einer geradzahligen Tabellengröße erweist sich als ungeschickt!

- Die Personaldaten einer Firma sollen in einer Hashtabelle abgespeichert werden.
- Ganzzahlige Personalnummer als Schlüssel:
  - männliche Person: xx...x0
  - weibliche Person: xx...x1
- Hashfunktion h = k mod m mit einer geraden Tabellengröße m
- Ungleichmäßige Streuung bei ungleicher Geschlechterverteilung:
  - männliche Person: h(x...xx0) ist gerade
  - weibliche Person: h(x...xx1) ist ungerade

Bei Division-Rest-Methode sollte Tabellengröße Primzahl sein

Beispiel Personaldaten –
Wahl einer Tabellengröße von m = 1000 erweist sich als ungeschickt!

- Die Personaldaten einer Firma sollen in einer Hashtabelle abgespeichert werden.
- Personalnummer ist 6-stellig, wobei die hintersten 3 Stellen die Abteilung codieren, in der die Person arbeitet.



- Hashfunktion h = k mod m mit Tabellengröße m = 1000
- Ungleichmäßige Streuung bei ungleicher Verteilung der Mitarbeiter auf die einzelnen Abteilungen.

h(xxxyyy) = yyy

Einschub: Verteilung der Primzahlen

Primzahlfunktion

$\pi(n)$ = Anzahl der Primzahlen $\leq n$.

Primzahlsatz

$\pi(n) \sim n/\ln(n)$

Damit gilt für die Primzahlhäufigkeit:

$\pi(n)/n \sim 1/\ln(n)$

Tabelle zeigt die tatsächliche und die geschätzte Primzahlhäufigkeit

n	$\pi(n)/n$	$1/\ln(n)$
10^4	0.123	0.11
10^5	0.096	0.087
10^6	0.078	0.072
10^7	0.066	0.062
10^8	0.058	0.054
10^9	0.051	0.048
10^{100}	?	0.0043
10^{200}	?	0.0021

Im praktisch relevanten Bereich liegt die Primzahlhäufigkeit bei 5 bis 10%.

Hashfunktion für Strings als Schlüssel

- Interpretierte String s = $z_0 ... z_{n-2} z_{n-1}$ (Folge von ASCII-Zeichen) als eine Zahl im Stellenwertsystem 31:

$$h(z_0 ... z_{n-2} z_{n-1}) = [z_0 * 31^{n-1} + ... + z_{n-2} * 31^1 + z_{n-1} * 31^0] \mod m;$$

- 31 ist eine Primzahl und führt zu einer guten Streuung.
- Mithilfe des Horner-Schemas lässt sich der Ausdruck effizienter berechnen:

$$h(z_0 ... z_{n-2} z_{n-1}) = [(... (z_0 * 31 + z_1) * 31 + ... + z_{n-2}) * 31 + z_{n-1}] \mod m;$$

- Bei einer Implementierung der Hashfunktion kann ein evtl. auftretender Überlauf ignoriert werden. Die Hashadresse kann dabei negativ werden, was abgeprüft werden muss.

```
static int hash(String key){
   int adr = 0;
   for (int i = 0; i < key.length(); i++)
      adr = 31*adr + key.charAt(i);

   if (adr < 0)
      adr = -adr;
   return adr % m;
}
```

Hashfunktion hashCode in Java (1)

- In Java ist in der Klasse `Object` die Methode `hashCode` definiert, die jedes Objekt auf einen ganzzahligen Wert abbildet.

```
class Object {
   public int hashCode() {...}
   // ...
}
```

- Für alle Wrapper-Klassen wie Integer, Long, Short, etc. und für die Klasse String ist hashCode geeignet überschrieben.
- hashCode für String ist ähnlich implementiert wie die for-Schleife auf der vorhergehenden Seite.

  Es ist zu berücksichtigen, dass hashCode eine negative int-Zahl zurückliefern kann . Wird der HashCode als Adresse für eine Hash-Tabelle benötigt, muss ein negativer Wert abgefangen und modolo der Tabellengröße gerechnet werden:

```
String key = "Zimmer";

int adr = key.hashCode();
if (adr < 0)
   adr = -adr;
adr = adr % m;
```

liefert -1618018788

Hashfunktion hashCode in Java (2)

Hashfunktion für zusammengesetze Schlüssel

- wird für einen zusammengesetzten Schlüsseltyp eine Hashfunktion benötigt, dann überschreibt man am besten für den Schlüsseltyp die hashCode-Methode.
- Dabei kann eine ähnliche Technik wir bei einem String-Schlüssel eingesetzt werden.
- Beispiel:

```
public class Datum {
   private int tag;
   private int mon;
   private int jahr;
   // ...

   @Override public int hashCode() {
      int adr = 0;
      adr = 31*adr + tag;
      adr = 31*adr + mon;
      adr = 31*adr + jahr;
      return adr;
   }
}
```

Hashfunktion hashCode in Java (3)

Hashfunktion für zusammengesetze Schlüssel (Fortsetzung)

- Im allgemeinen ist auch hier zu berücksichtigen, dass ein Überlauf auftreten kann und hashCode eine negative int-Zahl zurückliefert.
- Wird der HashCode als Adresse für eine Hash-Tabelle benötigt, muss ein negativer Wert abgefangen und modolo der Tabellengröße gerechnet werden.
- Beispiel:

```
Datum key = new Datum(24,12,2011);
int adr = key.hashCode();
if (adr < 0)
   adr = -adr;
adr = adr % m;
```

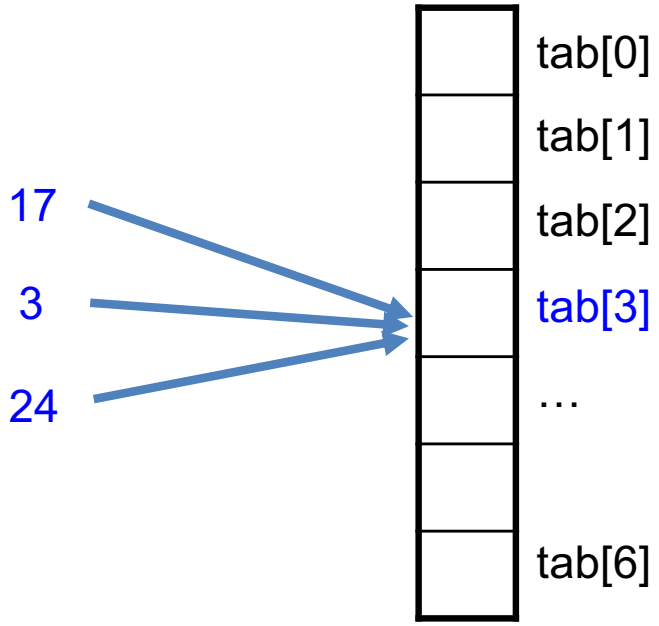
ist in diesem Fall unnötig.

Bei Datum.hashCode kann es keinen Überlauf geben.

Adresskollision

- Im allgemeinen ist eine Hashfunktion nicht injektiv.
  D.h. unterschiedliche Schlüssel können die gleiche Hashadresse haben.
- Beispiel: mit h(k) = k mod m und m = 7 gilt:

  h(17) = h(3) = h(24) = 3.
- Die Wahrscheinlichkeit einer Adresskollision ist sehr groß.
  Sogar bei einer sehr gut streuenden Hashfunktion und einer im Vergleich zur Schlüsselzahl großen Hashtabelle.
  (siehe Geburtstagsparadoxon auf nächste Folie)
- Ansätze zur Kollisionsbehandung:
  - kollidierende Datensätze werden in linear verketteten Listen gehalten.
  - Offene Hashverfahren:
    bei Kollision in der Tabelle nach freien Stellen sondieren



Einschub: Geburtstagsparadoxon

- In einer Gruppe von 23 Personen ist es wahrscheinlich (nämlich Wahrscheinlichkeit p ≈ 0.51), dass 2 Personen am gleichen Tag Geburtstag haben.
- Begründung:

  Wahrscheinlichkeit $\overline{p}$, dass alle n = 23 Personen an unterschiedlichen Tagen Geburtstag haben:

$$\overline{p} = \frac{364}{\underbrace{365}_{2.Person}} * \frac{363}{\underbrace{365}_{3.Person}} * \ldots * \frac{343}{\underbrace{365}_{23.Person}} \approx 0.49$$

  Damit ist die Wahrscheinlichkeit p, dass wenigstens zwei Personen an einem gleichen Tag Geburtstag haben:

$$p = 1 - \overline{p} \approx 0.51$$

- Konsequenz:
  würde man die Daten von 23 Personen in eine Tabelle der Größe 365 mit einem Hashverfahren abbilden und als Hashfunktion

  h(x) = Geburtstag der Person x auf {0, 1, 2, …, 364} umgerechnet

  wählen, dann würde es wahrscheinlich eine Kollision geben.

2. Suchen mit Hashverfahren

- Idee
- Hashfunktion
- Hashverfahren mit linear verketteten Listen
- Offene Hashverfahren
- Dynamische Hashverfahren
- Hashverfahren in Java

Hashverfahren mit linear verketteten Listen (1)

Idee

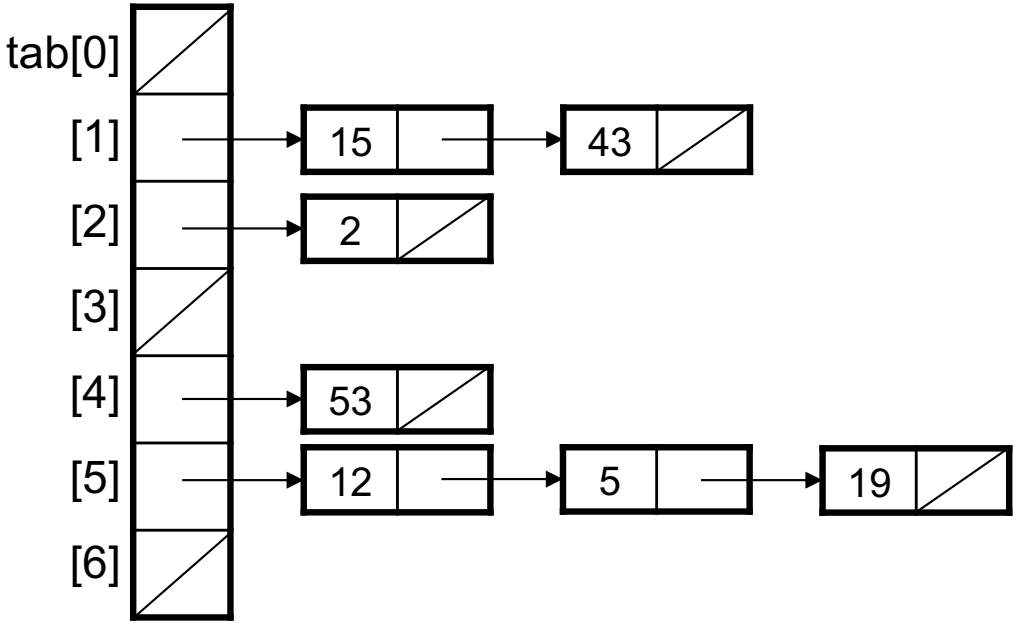
Der Hashtabellen-Eintrag tab[i] zeigt auf eine verkette Liste, die alle Datensätze mit der gleichen Hashadresse i enthalten.

Beispiel

Für m = 7 mit h(k) = k mod m ergibt sich nach dem Einfügen von

12, 53, 5, 15, 2, 19, 43

folgende Hashtabelle:



Hashverfahren mit linear verketteten Listen (2)

Algorithmen:

```
V search (K key) {
        suche in tab[ h(key) ] nach Schlüssel key;
        if (key gefunden)
                return Daten des gefunden Datensatzes;
        else
                return null;
}
```

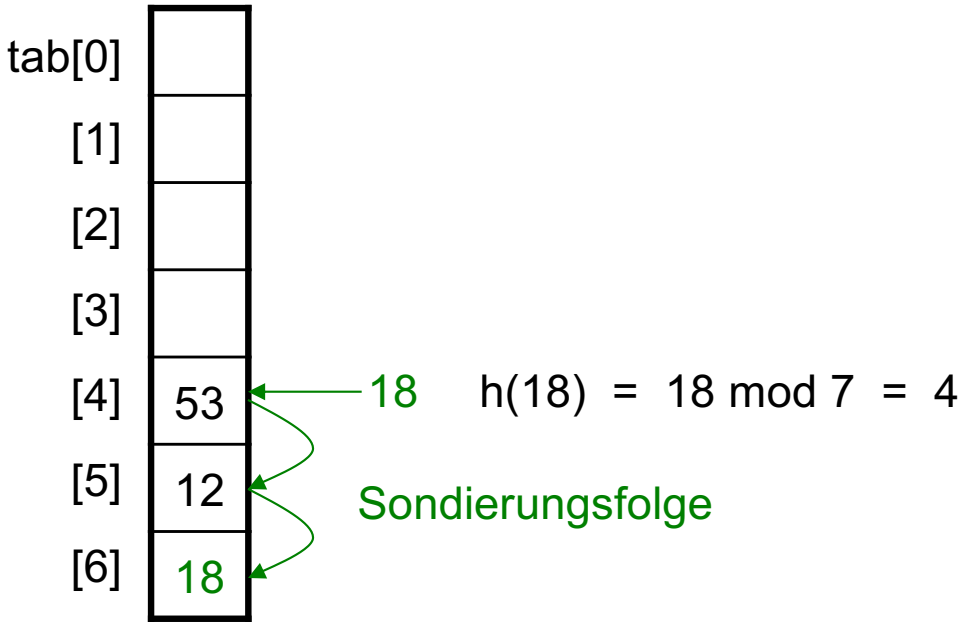
```
V insert (K key, V value) {
        suche in tab[ h(key) ] nach Schlüssel key;
        if (key gefunden)
                // Schlüssel bereits vorhanden;
                alte Daten durch value ersetzen;
                return alte Daten;
        else {
                füge key am Ende oder
                am Anfang der Liste ein;
                return null;
        }
}
```

```
V remove (K key) {
        suche in tab[ h(key) ] nach Schlüssel key;
        if (key gefunden) {
                entferne Knoten k aus Liste;
                return Daten von Knoten k;
        }
        else
                return null;
}
```

Offene Hashverfahren (1)

Idee:

- Alle Datensätze werden in einem Feld (d.h. keine verketteten Listen) untergebracht.
- Falls beim Eintragen des Schlüssels k die Adresse h(k) bereits belegt ist, wird gemäß einer Sondierungsfolge die erste freie Adresse gesucht und k dort abgespeichert.



- Beim Suchen von k wird ebenfalls die Sondierungsfolge durchlaufen.
- Zu unterschiedlichen Zeitpunkten können gleiche Schlüssel auf unterschiedliche Adressen abgebildet werden; daher auch die Bezeichnung Hashverfahren mit offener Adressierung.

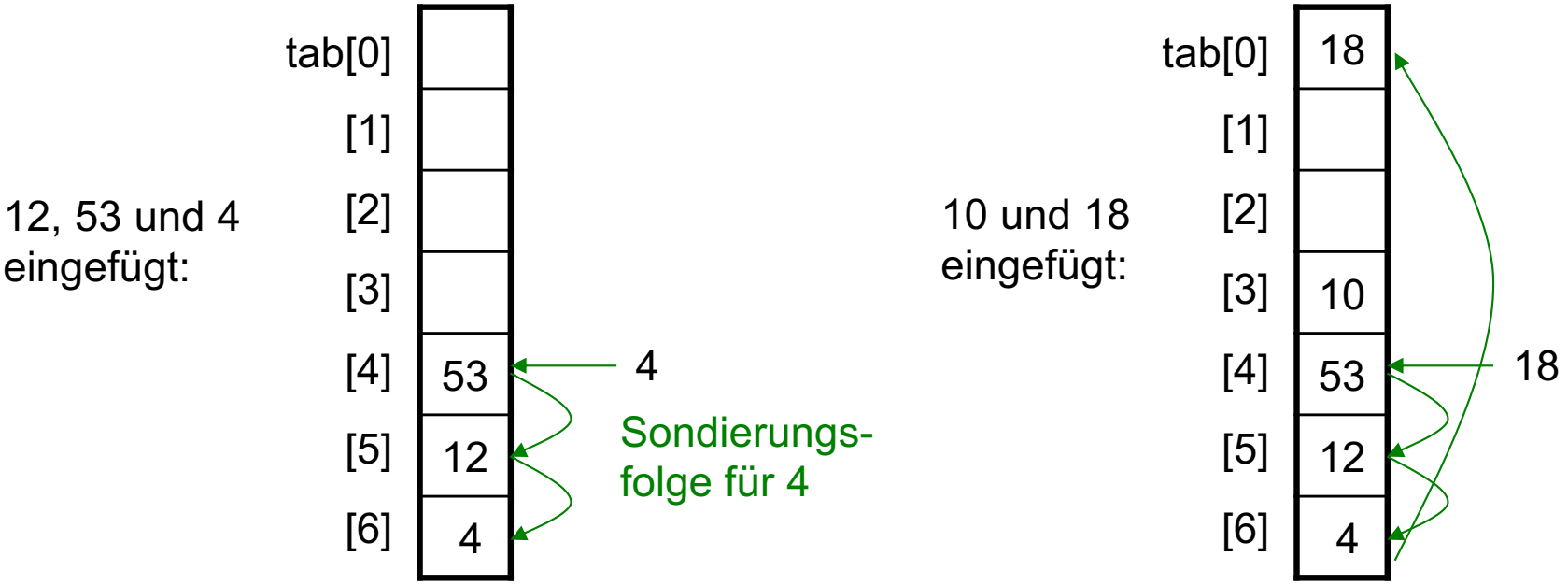
Offene Hashverfahren (2)

Allgemeine Sondierungsfolge

h(k) + s(j,k) mod m mit j = 0, 1, …, m-1

Beispiel (lineare Sondierungsfolge)

h(k) + j mod m mit j = 0, 1, ..., m-1 und h(k) = k mod m



Offene Hashverfahren (3)

Algorithmus zum Suchen:

```
V search (K key) {
        if ( (adr = searchAdr(key) != -1)
                return tab[adr].value;
        else
                return null;
}
```

```
int searchAdr (K key) {
        j = 0;
        do {
                adr = (h(key) + s(j,key)) % m;
                j++;
        } while (tab[adr] != "leer" && tab[adr].key != key);

        if (tab[adr] != "leer")
                return adr;
        }
        else
                return -1;
}
```

Wichtig:

Um Endlosschleifen bei stark gefüllten Tabellen zu vermeiden, sind die Längen der Sondierungsfolgen zu beschränken.

Offene Hashverfahren (4)

Algorithmus zum Löschen:

```
V remove (K key) {
        if ( (adr = searchAdr(key) != -1)
                oldValue = tab[adr].value;
                tab[adr] = "gelöscht" ;
                return oldValue;
        }
        else
                return null;
}
```

Wichtig:

Eine Hashadresse hat 3 Zustände:

- Eintrag vorhanden
- Eintrag gelöscht
- Eintrag leer

Zu Beginn sind alle Einträge leer.

Grund:
Beim Löschen können Lücken entstehen, die bei einer späteren Suchoperation übersprungen werden müssen.

Offene Hashverfahren (5)

Algorithmus zum Einfügen:

```
V insert (K key, V value) {
        if ( (adr = searchAdr(key) != -1)  {
                oldValue = tab[adr].value;
                tab[adr].value = value;
                return oldValue;
        }

        // Neueintrag:
        j = 0;
        do {
                adr = (h(k) + s(j,k)) % m;
                j++;
        } while (tab[adr] != "leer" && tab[adr] != "gelöscht" );
        tab[adr].key = key;
        tab[adr].value = value;
        return null;
}
```

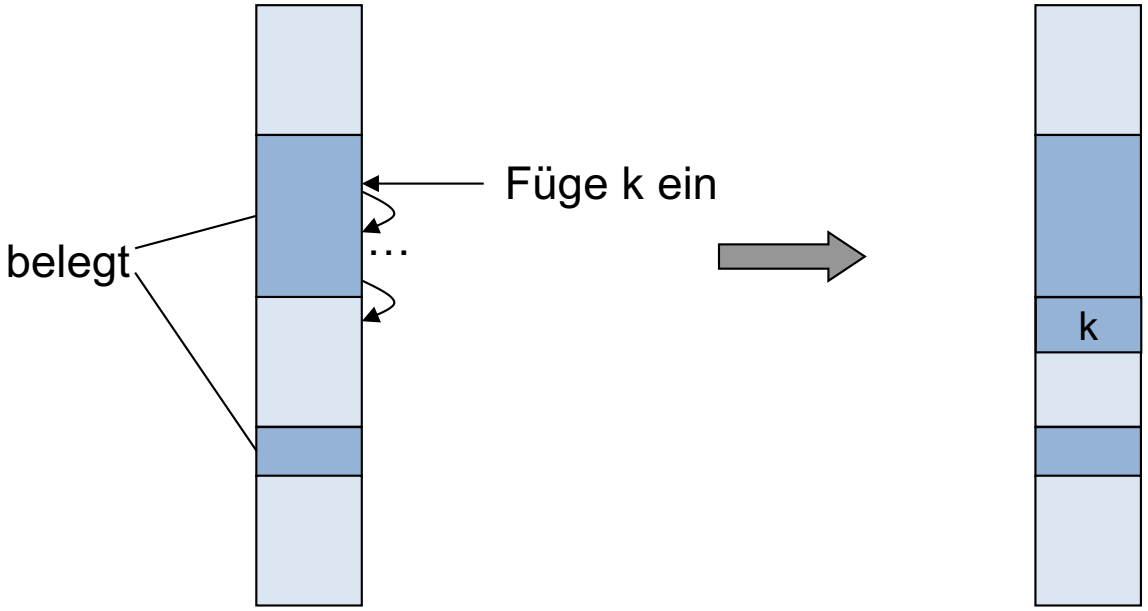
Es werden zuerst wieder die Lücken gefüllt

Lineares Sondieren

- s(j,k) = j
- Damit ergibt sich die Sondierungsfolge:

  h(k)
  h(k) + 1 mod m
  h(k) + 2 mod m
  …

- Lineares Sondieren tendiert aufgrund von Sekundärkollisionen (zwei Sondierungsfolgen überschneiden sich) zu Clusterbildung:
  Große belegte Cluster haben eine stärkere Tendenz zu wachsen als kleinere.



Quadratisches Sondieren

- $s(j,k) = j^2$
- Damit ergibt sich die Sondierungsfolge:

  h(k)
  h(k) + 1 mod m
  h(k) + 4 mod m
  h(k) + 9 mod m
  …

- Quadratisches Sondieren streut wesentlich besser als lineares Sondieren.

Problem beim quadratischen Sondieren

- Es wird mit einer quadratischen Sondierungsfolge im allgemeinen nicht jede Adresse erreicht.
- Beispiel: Mit m = 8 und h(k) = 0 erreicht die Sondierungsfolge nur 3 der 8 Einträge:

  0 = 0 mod m,
  1 = 1 mod m
  4 = 4 mod m
  9 = 1 mod m
  16 = 0 mod m
  25 = 1 mod m
  36 = 4 mod m
  49 = 1 mod m

- Wenn m eine Primzahl ist, dann wird mit jeder Sondierungsfolge wenigstens die Hälfte aller Einträge erreicht.

Alternierend quadratisches Sondieren

- Als Tabellengröße m wird eine Primzahl der Form 4i + 3 gewählt.
- Die alternierend quadratische Sondierungsfolge wird definiert durch:

  $$s(j,k) = \lceil j/2 \rceil^2 (-1)^j$$

- Die Sondierungsfolge lautet konkret:

  h(k)
  h(k) – 1 mod m
  h(k) + 1 mod m
  h(k) – 4 mod m
  h(k) + 4 mod m
  ...

- Aufpassen: mod ist mathematisch definiert und unterscheidet sich für negative Zahlen vom Modolo-Operator % in Java.
- Mit alternierend quadratischem Sondieren werden alle Einträge erreicht.

Einschub: symmetrische mod-Funktion

Symmetrische mod-Funktion:

```
x mod m  =  x – (x/m)*m          x/m ist hier eine Ganzzahldivision
```

Beispiele:

11 mod 7 = 11 – (11/7)*7 = 11 – 1*7 = 4

-11 mod 7 = -11 – (-11/7)*7 = -11 – (-1)*7 = -4

%-Operator in Java und C/C++:

```
System.out.println(11 % 7);      // 4
System.out.println(-11 % 7);     // -4
```

Einschub: mathematische mod-Funktion

Mathematische mod-Funktion:

$x \bmod m = x - \lfloor x/m \rfloor * m$ x/m ist hier eine Gleitkommadivision

Beispiele:

$11 \bmod 7 = 11 - \lfloor 11/7 \rfloor * 7 = 11 - 1*7 = 4$

$-11 \bmod 7 = -11 - \lfloor -11/7 \rfloor * 7 = -11 - (-2)*7 = 3$

%-Operator in Python:

```
print(11 % 7);       // 4
println(-11 % 7);    // 3
```

Funktion floorMod in Java:

```
System.out.println(Math.floorMod(11, 7));      // 4
System.out.println(Math.floorMod(-11, 7));     // 3
```

Double Hashing

- Für die Sondierungsfolge wird eine weitere Hashfunktion h' gewählt.
- Die Sondierungsfolge wird definiert durch:

  s(j,k) = j * h‘(k)

- Damit ergibt sich folgende Sondierungsfolge:

  h(k)
  h(k) + 1*h‘(k) mod m
  h(k) + 2*h‘(k) mod m
  h(k) + 3*h‘(k) mod m
  …

- Die beiden Hashfunktionen sollten möglichst unabhängig sein.
  Eine gute Wahl ist:

  h(k) = k mod m
  h‘(k) = (k+1) mod (m-2).

- Außerdem ist es wichtig, dass die Tabellengröße m eine Primzahl ist.
  Nur dann erreicht jede Sondierungsfolge alle Einträge.

Analyse der Hashverfahren

Analyse im schlechtesten Fall

- Alle n Einträge haben die gleiche Hashadresse.
  Daher muss im schlechtesten Fall eine Operation
  eine Liste mit n Einträgen ablaufen.
- Dies ist so unwahrscheinlich, dass es praktisch nicht vorkommt.

Analyse im mittleren Fall

- Wichtige Maßzahlen:

  C_{Erfolg} Anzahl der durchschnittlich betrachteten Einträge bei erfolgreicher Suche.

  $C_{Nicht\text{-}Erfolg}$ Anzahl der durchschnittlich betrachteten Einträge bei nicht erfolgreicher Suche.

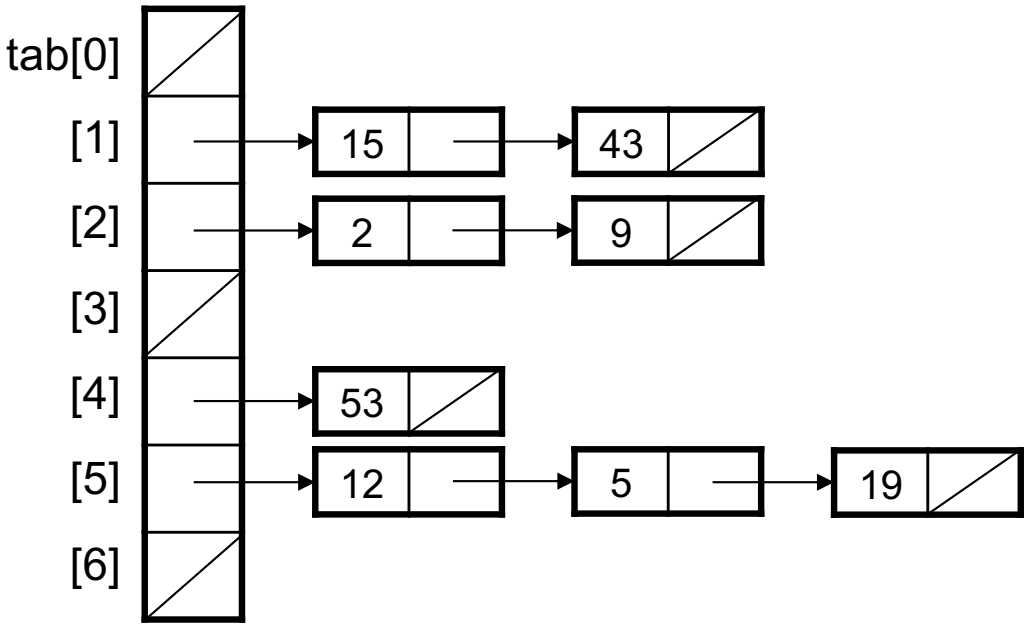
- C_{Erfolg} und $C_{Nicht\text{-}Erfolg}$ hängen nur ab vom

  Füllungsgrad (load factor) $\alpha = n/m$,

  wobei n = Anzahl der Einträge und m = Tabellengröße.

Beispiele für Füllungsgrad α

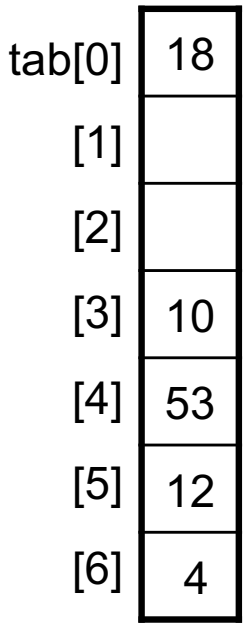
Hashverfahren mit Verkettung



α = n/m

= 8/7 = 1.14 = 114%

Offenes Hashverfahren mit linearer Sondierung



α = n/m

= 5/7 = 0.71 = 71%

n = Anzahl der Einträge und m = Tabellengröße.

Komplexität der Hashverfahren

Verfahren	C_{Erfolg}	$C_{Nicht\text{-}Erfolg}$
Hashverfahren mit Verkettung	$1+\frac{\alpha}{2}$	α
Offenes Hashverfahren mit linearem Sondieren	$\frac{1}{2}\left(1+\frac{1}{1-\alpha}\right)$	$\frac{1}{2}\left(1+\frac{1}{(1-\alpha)^2}\right)$
Offenes Hashverfahren mit quadratischem Sondieren	$1+ln\left(\frac{1}{1-\alpha}\right)-\frac{\alpha}{2}$	$\frac{1}{1-\alpha}-\alpha+ln\left(\frac{1}{1-\alpha}\right)$
double hashing mit unabhängigen h u. h'	$\frac{1}{\alpha}ln\left(\frac{1}{1-\alpha}\right)$	$\frac{1}{1-\alpha}$

- Die Angaben setzen eine ideale Hashfunktion voraus.
  D.h. die Schlüssel sind gleichmäßig über die Tabelle verstreut.
- Umfangreiche Herleitungen befindet sich in [Ottmann u. Widmayer 2002].

Komplexität der Hashverfahren für konkrete Belegungsgrade

	$\alpha = 0.5$		$\alpha = 2/3$		$\alpha = 0.8$	
Verfahren	C_{Erfolg}	$C_{Nicht\text{-}Erfolg}$	C_{Erfolg}	$C_{Nicht\text{-}Erfolg}$	C_{Erfolg}	$C_{Nicht\text{-}Erfolg}$
Hashverfahren mit Verkettung	1.25	0.5	1.33	0.66	1.4	0.8
Offenes Hashverfahren mit linearem Sondieren	1.5	2.5	2	5	3	13
Offenes Hashverfahren mit quadratischem Sondieren	1.44	2.19	1.77	3.43	2.21	5.81
double hashing mit unabhängigen h u. h'	1.38	2	1.65	3	2.01	5

- Bei offenen Hashverfahren wird in der Praxis üblicherweise ein Füllungsgrad von

  $\alpha \leq 2/3$

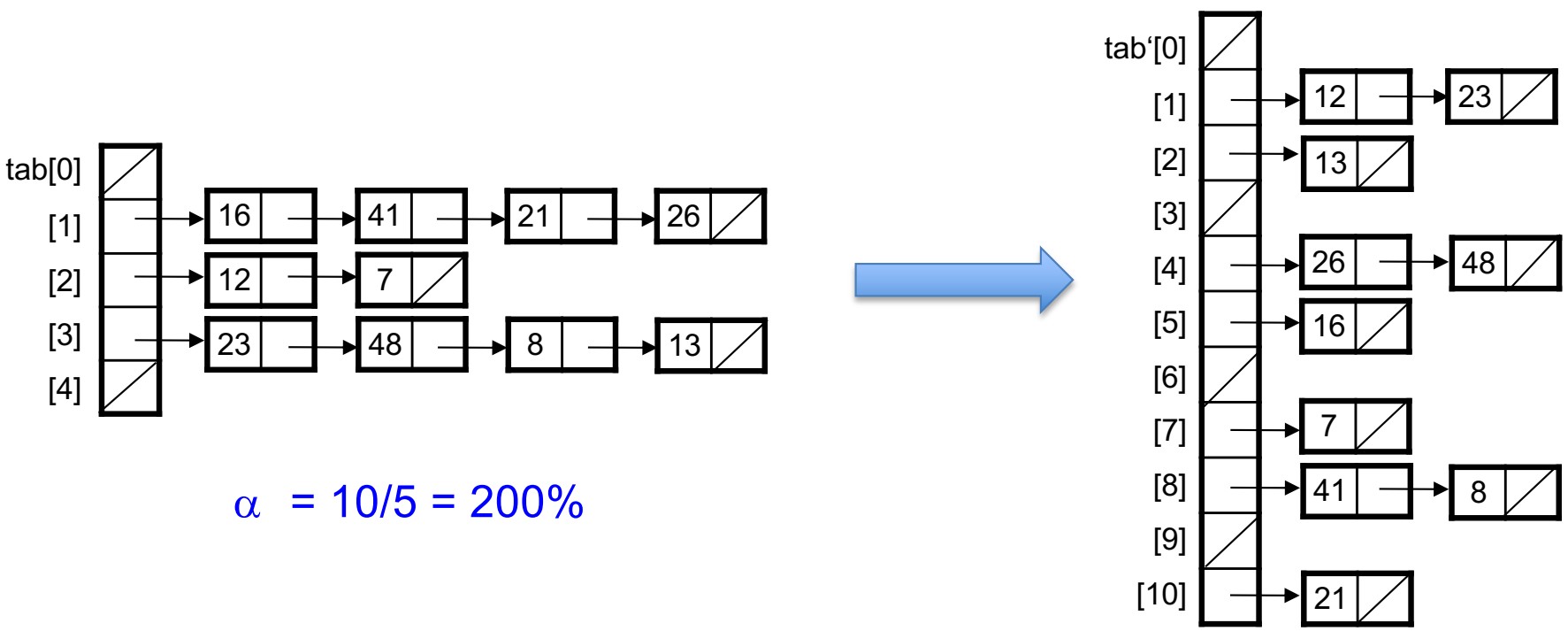
  angestrebt.

2. Suchen mit Hashverfahren

- Idee
- Hashfunktion
- Hashverfahren mit linear verketteten Listen
- Offene Hashverfahren
- Dynamische Hashverfahren
- Hashverfahren in Java

Vergrößern der Tabelle mit sofortigem Umkopieren

- Falls bestimmter Füllungsgrad α überschritten:
  - Lege neue Tabelle tab′ mit einer in etwa doppelten Größe m′ (m′ Primzahl).
  - Füge alle Einträge aus alter Tabelle tab in die neue Tabelle tab′ ein.
- Umorganisation der Hashtabelle ist bei großen Tabellen singulär sehr aufwendig.



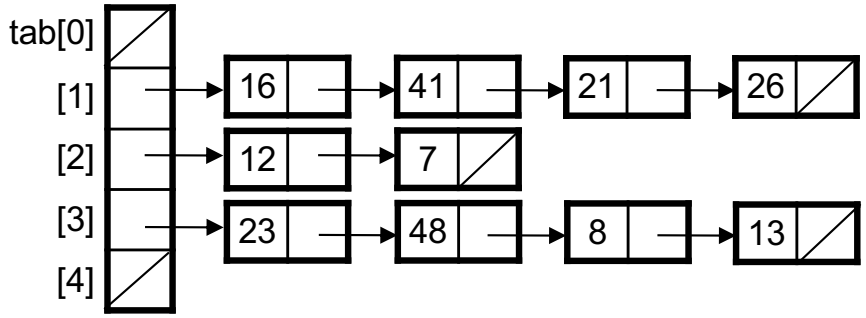
α = 10/5 = 200%

α = 10/11 = 90%

Vergrößern der Tabelle mit verzögertem Umkopieren (lazy copying)

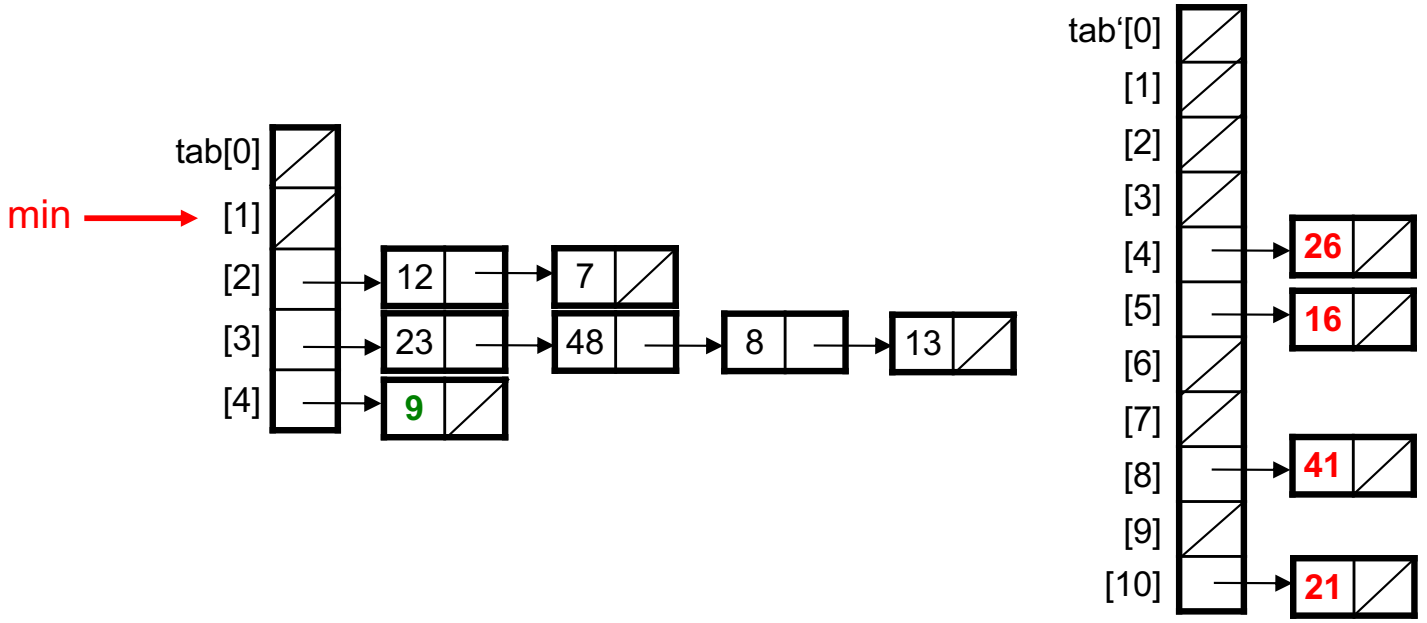
- Nur für Hashverfahren mit Verkettung.
- Falls bestimmter Füllungsgrad überschritten wird:
  - Lege neue Tabelle tab′ mit einer in etwa doppelten Größe m′ an (m′ sollte Primzahl sein).
  - Bei jedem Zugriff auf die Tabelle (search, insert bzw. remove) wird zusätzlich der nicht-leere Tabelleneintrag (komplette verkettete Liste) mit kleinstem Index min in die neue Tabelle übertragen.
  - Entscheide bei jedem Zugriff, ob Daten in alter oder neuer Tabelle stehen: Falls $h(k) = k \bmod m \leq min$, dann greife auf neue Tabelle tab′ zu, sonst auf alte Tabelle tab.
  - Beachte, dass bei alter Tabelle tab mit $h(k) = k \bmod m$ und bei neuer Tabelle tab′ mit $h'(k) = k \bmod m'$ zugegriffen wird.
  - Falls alte Tabelle tab nicht mehr gebraucht wird (d.h. min = Größe der Tabelle tab), wird tab durch tab′ ersetzt.

Beispiel zu Vergrößern der Tabelle mit verzögertem Umkopieren (1)



insert(9):

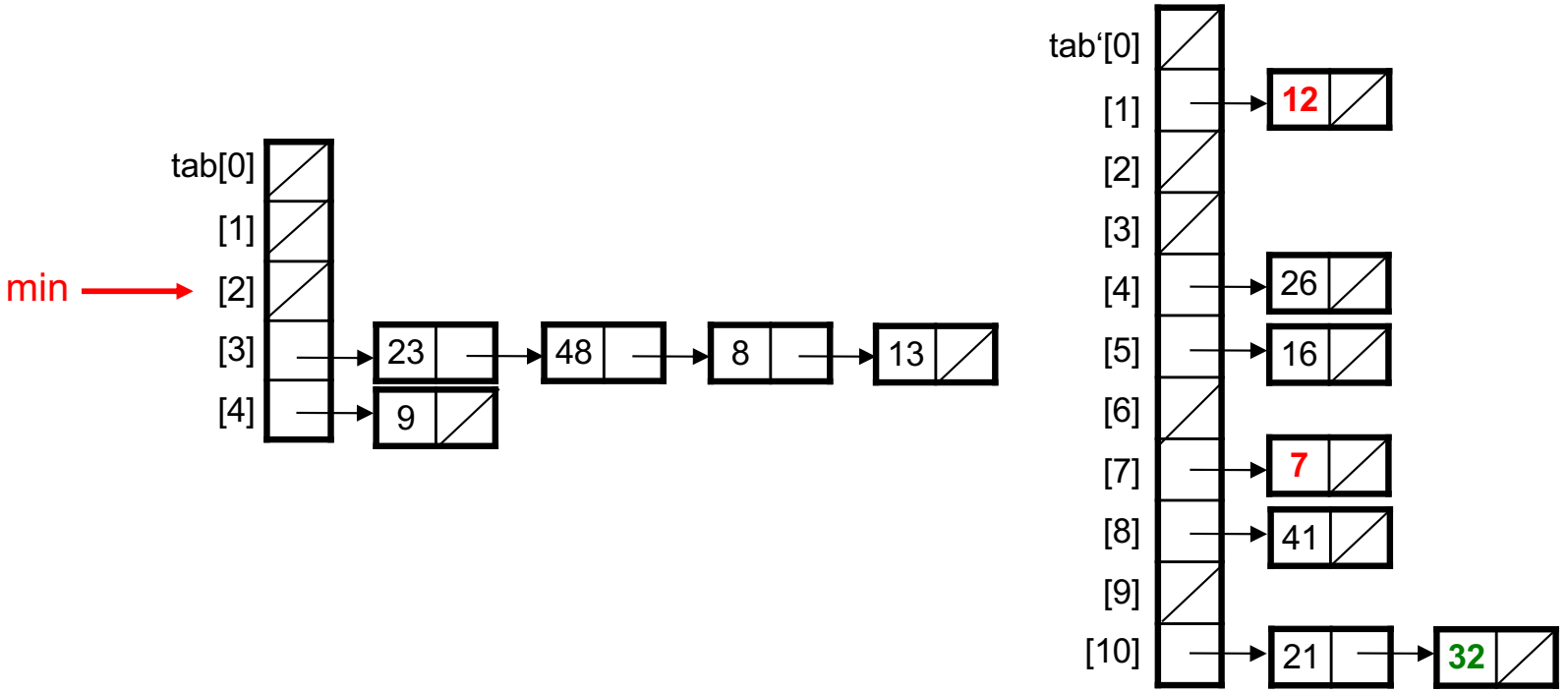
- Lege neue Tabelle tab′ der Größe 11 an, da Füllungsgrad von tab überschritten wird.
- Übertrage kleinsten Tabelleneintrag tab[min] mit min = 1 nach tab′.
- Füge nun 9 in alte Tabelle ein (da h(9) = 9 mod 5 = 4 > min).



Beispiel zu Vergrößern der Tabelle mit verzögertem Umkopieren (2)

insert(32):

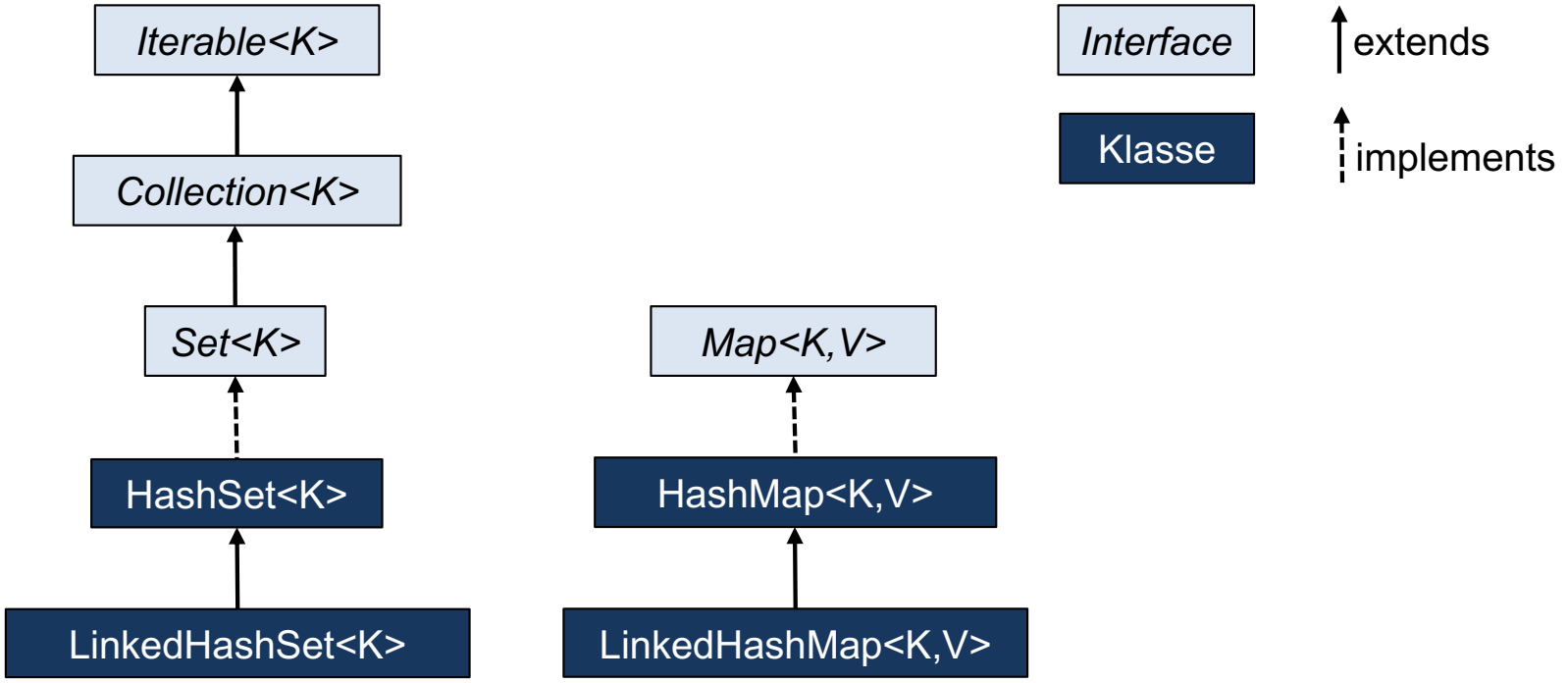
- Übertrage kleinsten Tabelleneintrag tab[min] mit min = 2 nach tab′.
- Füge nun 32 in neue Tabelle ein (h(32) = 32 mod 5 = 2 ≤ min).
  Da h′(32) = 32 mod 11 = 10 ist, wird 32 beim Index 10 eingetragen.



2. Suchen mit Hashverfahren

- Idee
- Hashfunktion
- Hashverfahren mit linear verketteten Listen
- Offene Hashverfahren
- Dynamische Hashverfahren
- Hashverfahren in Java

Hashverfahren in Java



- Bei LinkedHashSet und LinkedHashMap wird zusätzlich mit einer doppelt verketteten Liste über die Reihenfolge des Einfügens Buch geführt.
- Bei LinkedHashMap kann statt der Einfüge-Reihenfolge auch die Zugriffs-Reihenfolge eingestellt werden: least-recently to most-recently accessed
- Wichtig: hashCode und equals muss für den Schlüsseltyp geeignet überschrieben werden. Falls o1.equals(o2), dann muss auch o1.hashCode() == o2.hashCode() sein.
- Außer HashMap gibt es noch die Varianten WeakHashMap und IdentityHashMap.