



Skript zur Vorlesung  
**Datenbanksysteme I**  
Wintersemester 2012/2013

# **Kapitel 9: Physische Datenorganisation**

Vorlesung: Prof. Dr. Christian Böhm  
Übungen: Sebastian Goebel, Nina Hubig  
Skript © 2005 Christian Böhm

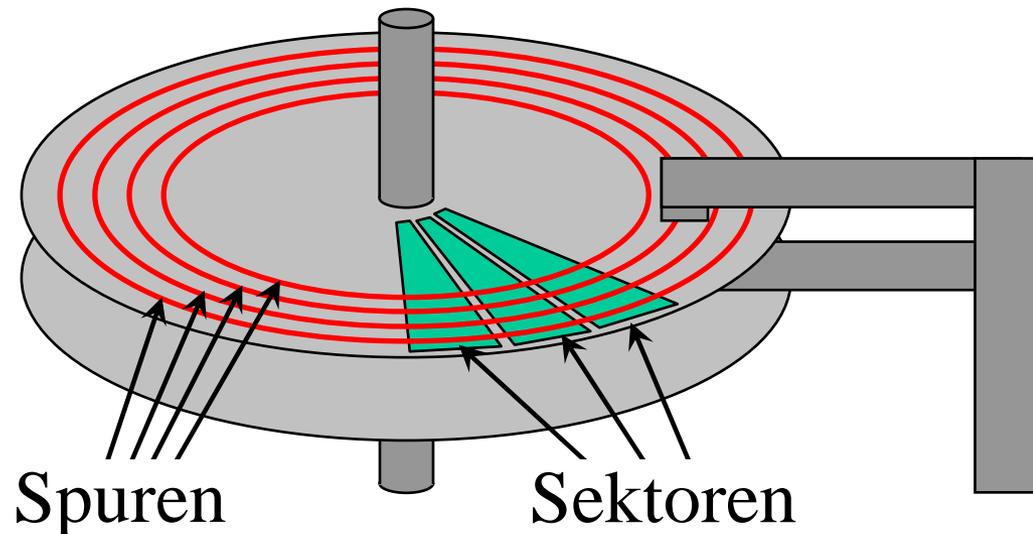
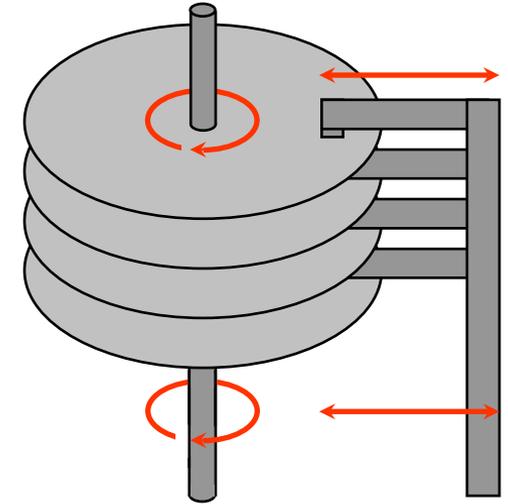
[http://www.dbs.ifi.lmu.de/cms/Datenbanksysteme\\_I](http://www.dbs.ifi.lmu.de/cms/Datenbanksysteme_I)



# Wiederholung (1)

## Aufbau einer Festplatte

- Mehrere magnetisierbare **Platten** rotieren um eine gemeinsame Achse
- Ein Kamm mit je zwei **Schreib-/Leseköpfen** pro Platte (unten/oben) bewegt sich in radialer Richtung.





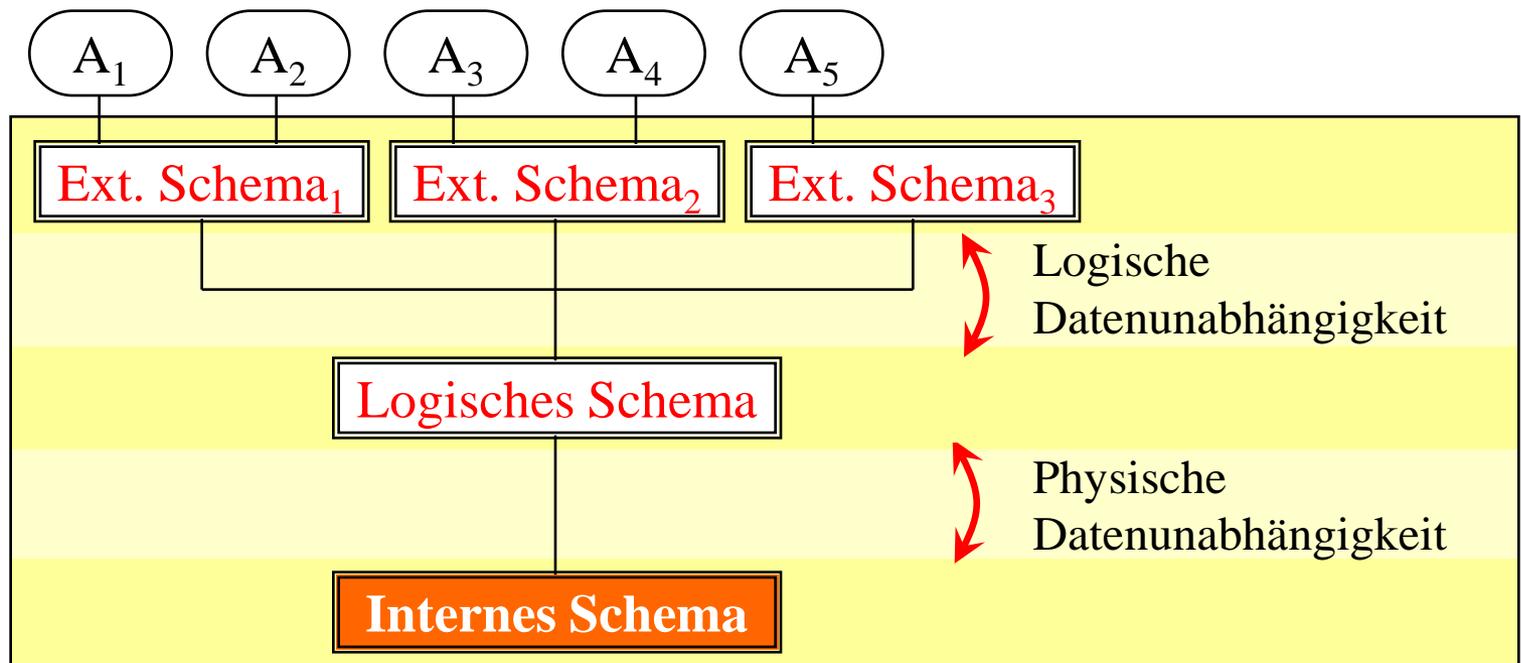


# Wiederholung (3)

Drei-Ebenen-Architektur zur Realisierung von

- **physischer**
- **und logischer**

Datenunabhängigkeit (nach ANSI/SPARC)





# Wiederholung (4)

- Das interne Schema beschreibt die systemspezifische Realisierung der DB-Objekte (physische Speicherung), z.B.
  - Aufbau der gespeicherten Datensätze
  - Indexstrukturen wie z.B. Suchbäume
- Das interne Schema bestimmt maßgeblich das Leistungsverhalten des gesamten DBS
- Die Anwendungen sind von Änderungen des internen Schemas nicht betroffen (physische Datenunabhängigkeit)



# Indexstrukturen (1)

- Um Anfragen und Operationen effizient durchführen zu können, setzt die interne Ebene des Datenbanksystems geeignete Datenstrukturen und Speicherungsverfahren (**Indexstrukturen**) ein.
- **Aufgaben**
  - **Zuordnung eines Suchschlüssels** zu denjenigen physischen Datensätzen, die diese Wertekombination besitzen, d.h. Zuordnung zu der oder den Seiten der Datei, in denen diese Datensätze gespeichert sind.  
*(VW, Golf, schwarz, M-ÜN 40) → (logische) Seite 37*
  - **Organisation der Seiten** unter dynamischen Bedingungen.  
Überlauf einer Seite → Aufteilen der Seite auf zwei Seiten



# Indexstrukturen (2)

- **Aufbau**

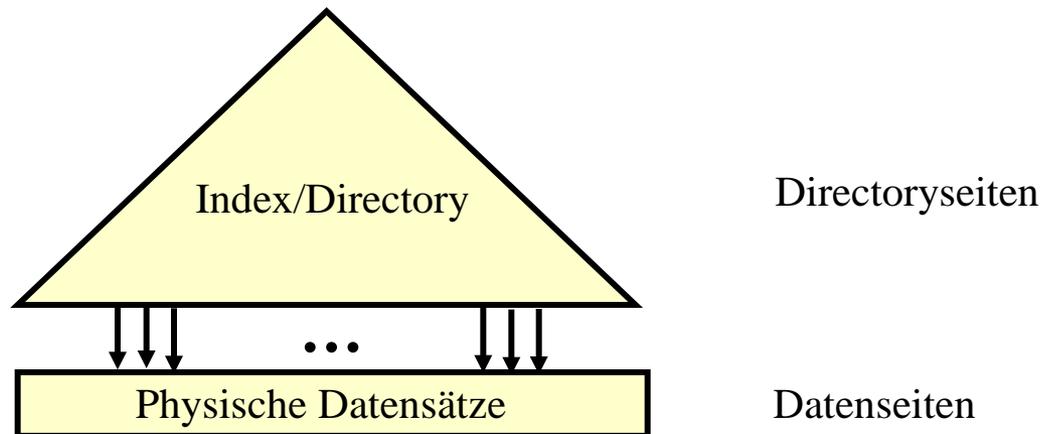
Strukturinformation zur Zuordnung von Suchschlüsseln und zur Organisation der Datei.

- **Directoryseiten:**

Seiten in denen das Directory gespeichert wird.

- **Datenseiten**

Seiten mit den eigentlichen physischen Datensätzen.





# Anforderungen an Indexstrukturen (1)

- **Effizientes Suchen**

- Häufigste Operation in einem DBS: Suchanfragen.
- Insbesondere Suchoperationen müssen mit wenig Seitenzugriffen auskommen.

*Beispiel: unsortierte sequentielle Datei*

- Einfügen und Löschen von Datensätzen werden effizient durchgeführt.
- Suchanfragen müssen ggf. die gesamte Datei durchsuchen.
- Eine Anfrage sollte daher mit Hilfe der Indexstruktur möglichst schnell zu der Seite oder den Seiten geführt werden, auf denen sich die gesuchten Datensätze befinden.



# Anforderungen an Indexstrukturen (2)

- **Dynamisches Einfügen, Löschen und Verändern von Datensätzen**
  - Der Datenbestand einer Datenbank verändert sich im Laufe der Zeit.
  - Verfahren, die zum Einfügen oder Löschen von Datensätzen eine Reorganisation der gesamten Datei erfordern, sind nicht akzeptabel.
    - Beispiel: sortierte sequentielle Datei*
      - Das Einfügen eines Datensatzes erfordert im schlechtesten Fall, dass alle Datensätze um eine Position verschoben werden müssen.
      - Folge: auf alle Seiten der Datei muss zugegriffen werden.
  - Das Einfügen, Löschen und Verändern von Datensätzen darf daher nur *lokale Änderungen* bewirken.



# Anforderungen an Indexstrukturen (3)

- **Ordnungserhaltung**
  - Datensätze, die in ihrer Sortierordnung direkt aufeinander folgen, werden oft gemeinsam angefragt.
  - In der Ordnung aufeinander folgende Datensätze sollten in der gleichen Seite oder in benachbarten Seiten gespeichert werden.
- **Hohe Speicherplatzausnutzung**
  - Dateien können sehr groß werden.
  - Eine möglichst hohe Speicherplatzausnutzung ist wichtig:
    - Möglichst geringer Speicherplatzverbrauch.
    - Im Durchschnitt befinden sich mehr Datensätze in einer Seite, wodurch auch die Effizienz des Suchens steigt und die Ordnungserhaltung an Bedeutung gewinnt.



# Klassen von Indexstrukturen

- **Datenorganisierende Strukturen**  
Organisiere die Menge der tatsächlich auftretenden Daten  
(Suchbaumverfahren)
- **Raumorganisierende Strukturen**  
Organisiere den Raum, in den die Daten eingebettet sind  
(dynamische Hash-Verfahren)

Anwendungsgebiete:

- **Primärschlüsselsuche** (B-Baum und lineares Hashing)
- **Sekundärschlüsselsuche** (invertierte Listen)

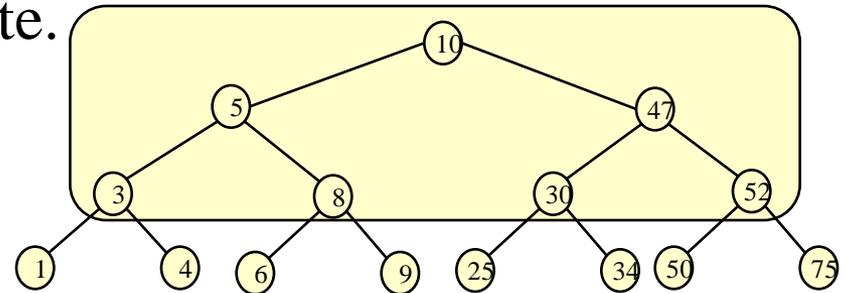


# B-Baum (1)

Idee:

- Daten auf der Festplatte sind in Blöcken organisiert (z.B. 4 Kb Blöcke)
- Bei Organisation der Schlüssel mit einem binärem Suchbaum entsteht pro Knoten, der erreicht wird, ein Seitenzugriff auf der Platte.

=> sehr teuer



- Fasse mehrere Knoten zu einem zusammen, so dass ein Knoten im Baum einer Seite auf der Platte entspricht.



# B-Baum (2)

## **Definition: B-Baum der Ordnung $m$**

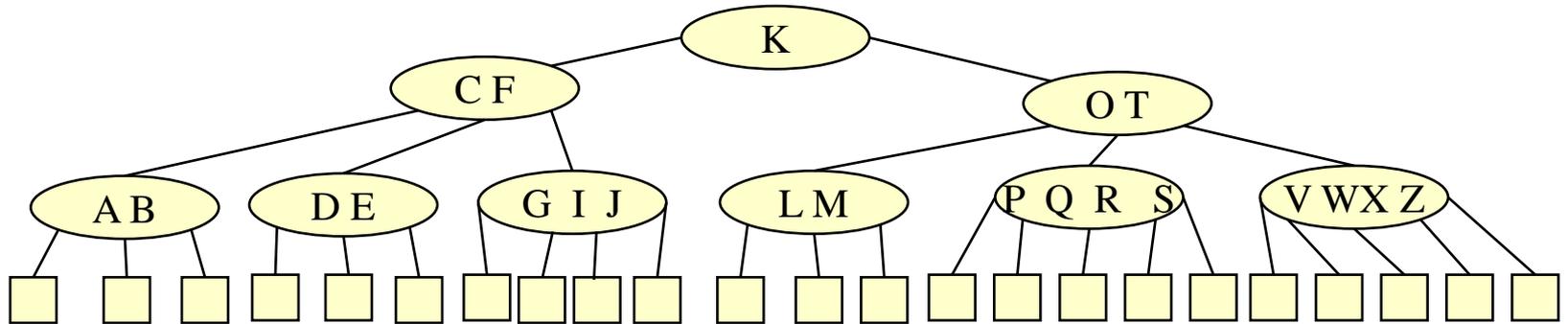
(Bayer und McCreight (1972))

- (1) Jeder Knoten enthält höchstens  $2m$  Schlüssel.
- (2) Jeder Knoten außer der Wurzel enthält mindestens  $m$  Schlüssel.
- (3) Die Wurzel enthält mindestens einen Schlüssel.
- (4) Ein Knoten mit  $k$  Schlüsseln hat genau  $k+1$  Söhne.
- (5) Alle Blätter befinden sich auf demselben Level.



# B-Baum (3)

## Beispiel: B-Baum der Ordnung 2



- max Höhe:  $h \leq \left\lceil \log_{m+1} \left( \frac{n+1}{2} \right) \right\rceil + 1$

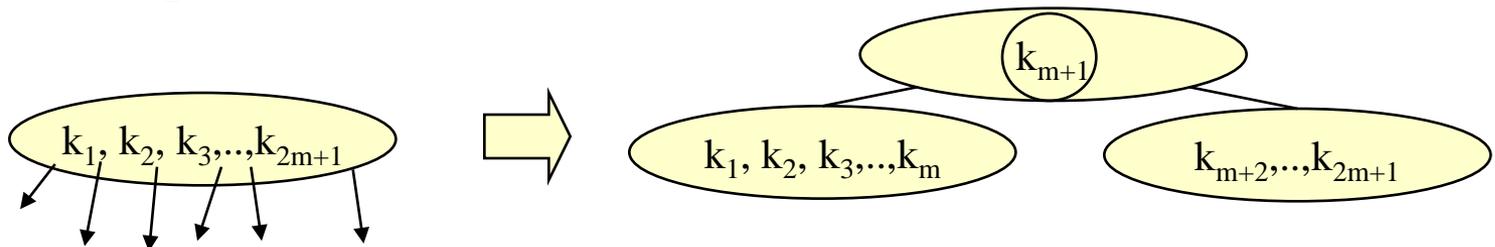
- Ordnung in realen B-Bäumen: 600-900 Schlüssel pro Seite
- Effiziente Suche innerhalb Knoten  $\Rightarrow$  **binäre Suche**



# Einfügen in B-Baum

Einfügen eines Schlüssels  $k$ :

- Suche Knoten  $B$  in den  $k$  eingeordnet werden würde. (Blattknoten bei erfolgloser Suche)
- 1. Fall:  $B$  enthält weniger als  $2m$  Schlüssel  
=> füge  $k$  in  $B$  ein
- 2. Fall:  $B$  enthält  $2m$  Schlüssel  
=> Overflow Behandlung
  - Split des Blattknotens



- Split kann sich über mehrere Ebene fortsetzen bis zur Wurzel



# Entfernen aus B-Baum

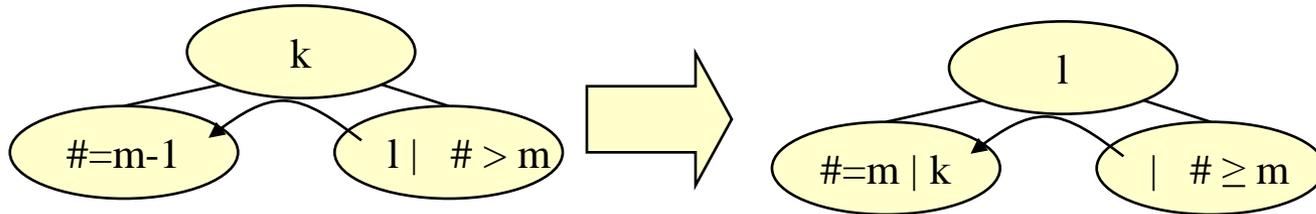
Lösche Schlüssel  $k$  aus Baum:

- Suche Schlüssel
- Falls Schlüssel in inneren Knoten, vertausche Schlüssel mit dem größten Schlüssel im linkem Teilbaum  
(=> Rückführung auf Fall mit Schlüssel in Blattknoten)
- Falls Schlüssel im Blattknoten  $B$ :
  - 1. Fall:  $B$  hat noch mehr als  $m$  Schlüssel,  
=> lösche Schlüssel
  - 2. Fall:  $B$  hat genau  $m$  Schlüssel  
=> Underflow

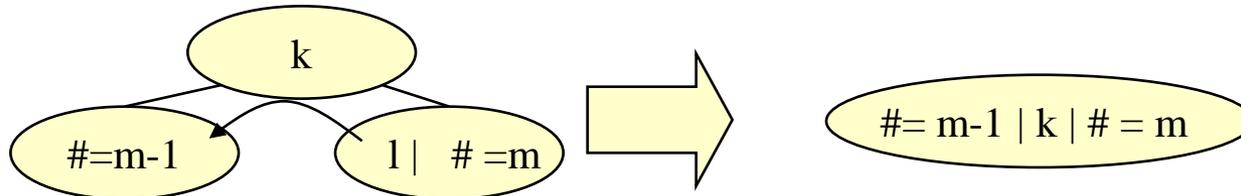


# Underflow-Behandlung im B-Baum

- Betrachte Bruderknoten (immer den rechten falls vorhanden)
- 1. Fall: Bruder hat mehr als  $m$  Knoten  $\Rightarrow$  ausgleichen mit Bruder



- 2. Fall: Bruder hat genau  $m$  Knoten  $\Rightarrow$  Verschmelzen der Brüder



- Verschmelzen kann sich bis zur Wurzel hin fortsetzen.



# B+-Baum (1)

- Häufig tritt in Datenbankanwendungen neben der Primärschlüsselsuche auch sequentielle Verarbeitung auf.
- **Beispiele für sequentielle Verarbeitung:**
  - *Sortiertes Auslesen aller Datensätze*, die von einer Indexstruktur organisiert werden.
  - *Unterstützung von Bereichsanfragen* der Form:
    - “Nenne mir alle Studenten, deren Nachname im Bereich [Be ... Brz] liegt.”
- → Die Indexstruktur sollte die *sequentielle Verarbeitung* unterstützen, d.h. die Verarbeitung der Datensätze in aufsteigender Reihenfolge ihrer Primärschlüssel.



# B+-Baum (2)

## Grundidee:

- Trennung der Indexstruktur in *Directory* und *Datei*.
- *Sequentielle Verkettung* der Daten in der Datei.

## *B+-Datei:*

- Die Blätter des B+-Baumes heißen *Datenknoten* oder *Datenseiten*.
- Die Datenknoten enthalten alle Datensätze.
- Alle Datenknoten sind entsprechend der Ordnung auf den Primärschlüsseln *verkettet*.

## *B+-Directory:*

- Die inneren Knoten des B+-Baumes heißen *Directoryknoten* oder *Directoryseiten*.
- Directoryknoten enthalten nur noch *Separatoren*  $s$ .
- Für jeden Separator  $s(u)$  eines Knotens  $u$  gelten folgende *Separatoreneigenschaften*:
  - $s(u) > s(v)$  für alle Directoryknoten  $v$  im linken Teilbaum von  $s(u)$ .
  - $s(u) < s(w)$  für alle Directoryknoten  $w$  im rechten Teilbaum von  $s(u)$ .
  - $s(u) > k(v')$  für alle Primärschlüssel  $k(v')$  und alle Datenknoten  $v'$  im linken Teilbaum von  $s(u)$ .
  - $s(u) \leq k(w')$  für alle Primärschlüssel  $k(w')$  und alle Datenknoten  $w'$  im rechten Teilbaum von  $s(u)$ .

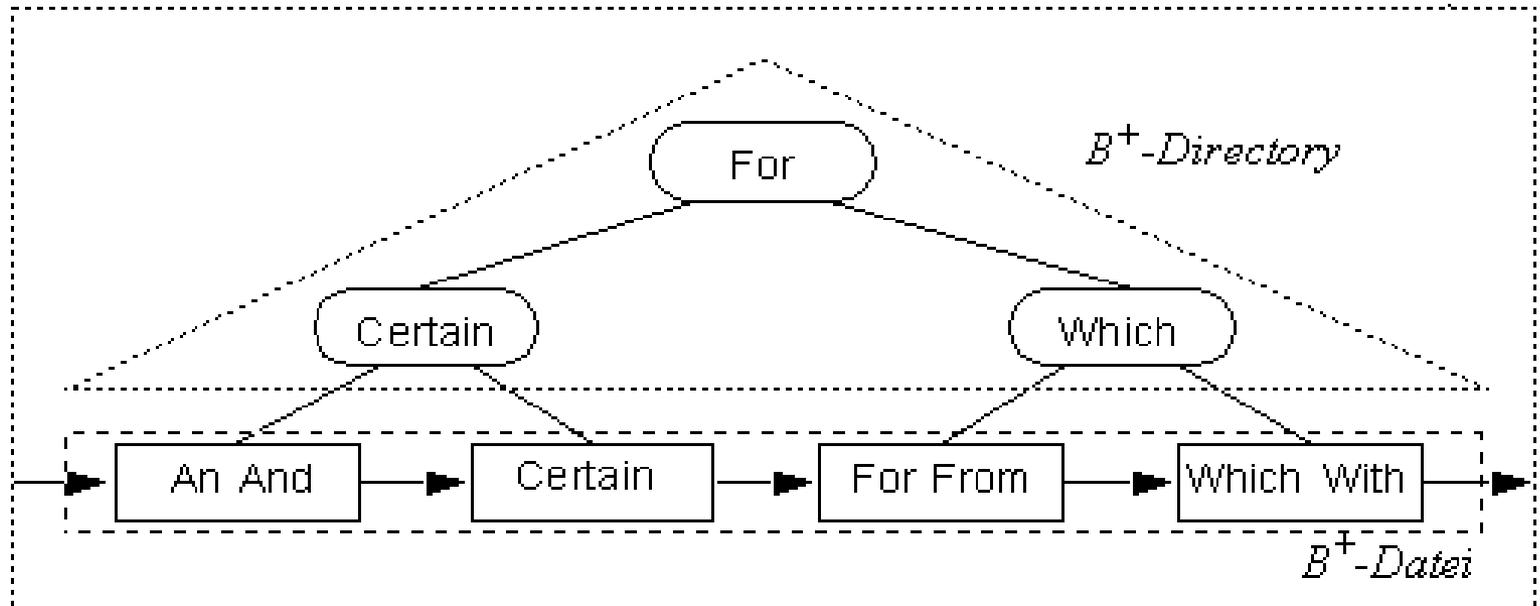


# B+-Baum (3)

## Beispiel:

B+-Baum für die Zeichenketten:

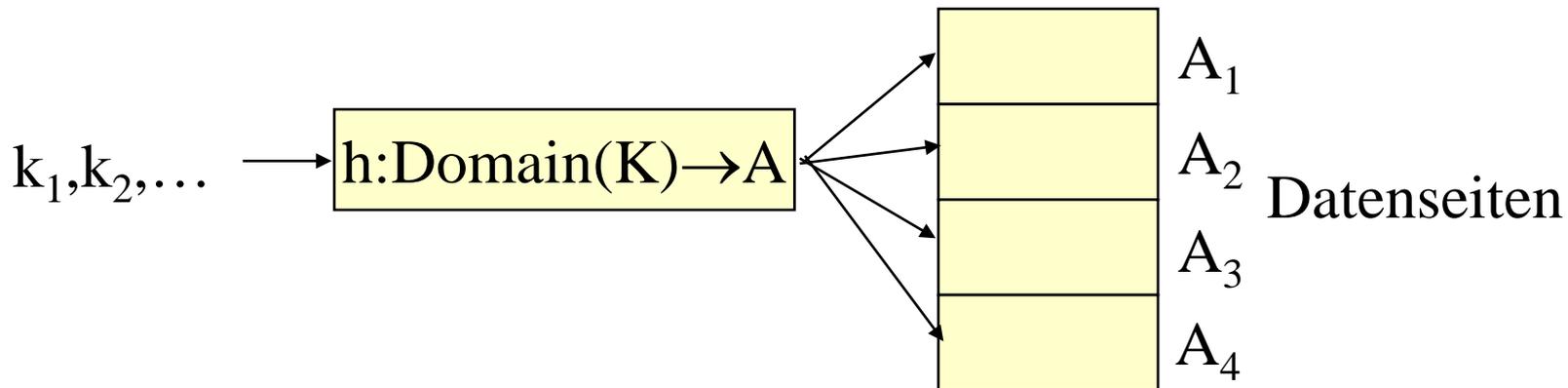
An, And, Certain, For, From, Which, With





# Hash-Verfahren

- Raumorganisierendes Verfahren
- **Idee:** Verwende Funktion, die aus den Schlüsseln  $K$  die Seitenadresse  $A$  berechnet. (Hashfunktion)
- **Vorteil:** Im besten Fall konstante Zugriffszeit auf Daten.
- **Probleme:**
  - Gleichmäßige Verteilung der Schlüssel über  $A$
  - $|\text{Domain}(K)| \gg |A| \Rightarrow$  Kollision





# Hash-Verfahren für Sekundärspeicher

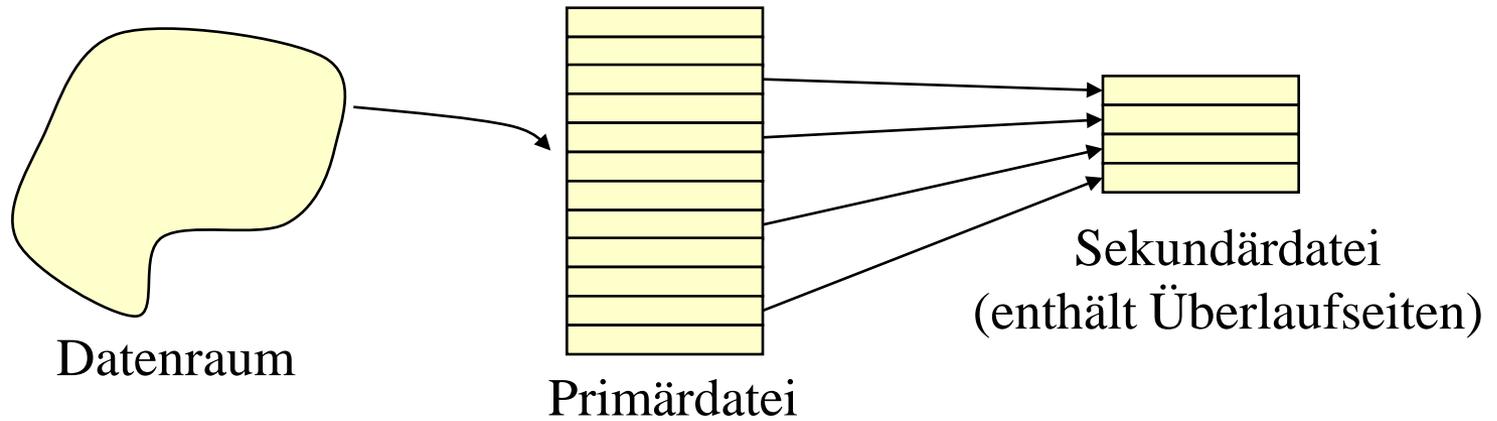
Für Sekundärspeicher sind weitere Anforderungen von Bedeutung:

- hohe Speicherplatzausnutzung  
(Datenseiten sollten über 50 % gefüllt sein)
- Gutes dynamisches Verhalten:  
schnelles Einfügen, Löschen von Schlüsseln und  
Datenseiten
- Gleichbleibend effiziente Suche

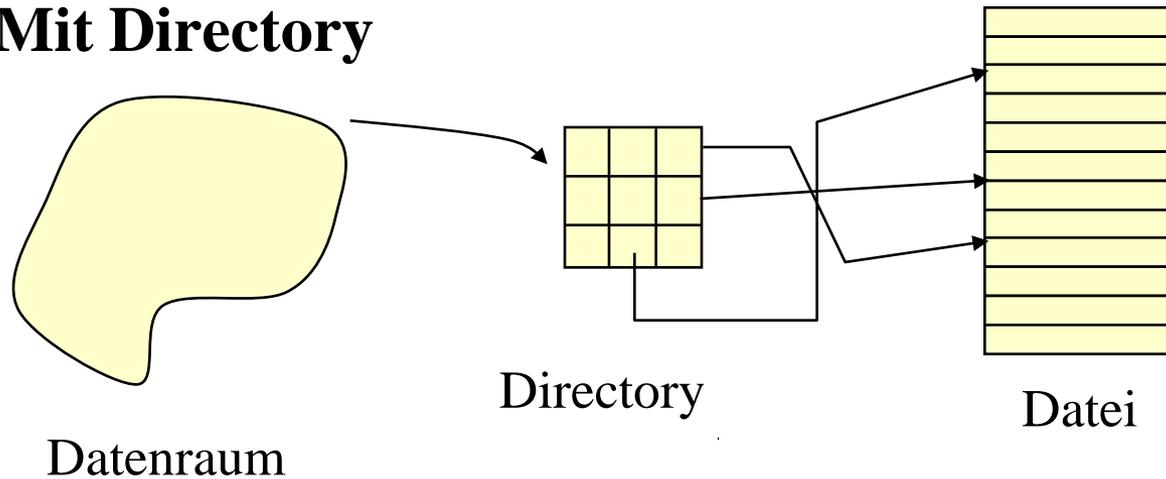


# Klassifizierung von Hash-Verfahren

- **Ohne Directory**



- **Mit Directory**

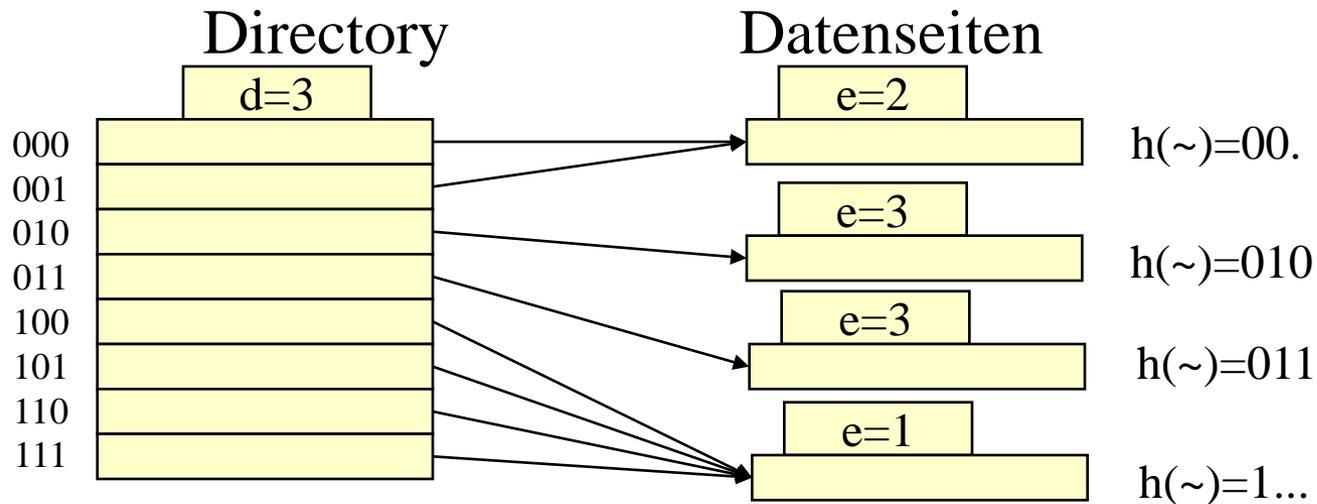




# Hash-Verfahren mit Directory

## Erweiterbares Hashing

- Hashfunktion:  $h(k)$  liefert Bitfolge  $(b_1, b_2, \dots, b_d, \dots)$
- Directory besteht aus eindimensionalen Array  $D [0..2^d-1]$  aus Seitenadressen.  $d$  heißt Tiefe des Directory.
- Verschiedene Einträge können auf die gleiche Seite zeigen





# Einfügen Erweiterbares Hashing (1)

Gegeben: Datensatz mit Schlüssel  $k$

1. Schritt: Bestimme die ersten Bits des Pseudoschlüssels  
 $h(k) = (b_1, b_2, \dots, b_d, \dots)$
2. Schritt:  
Der Directoryeintrag  $D[b_1, b_2, \dots, b_d]$  liefert Seitennummer.  
Datensatz wird in berechnete Seite eingefügt.

Falls Seite danach max. gefüllt:

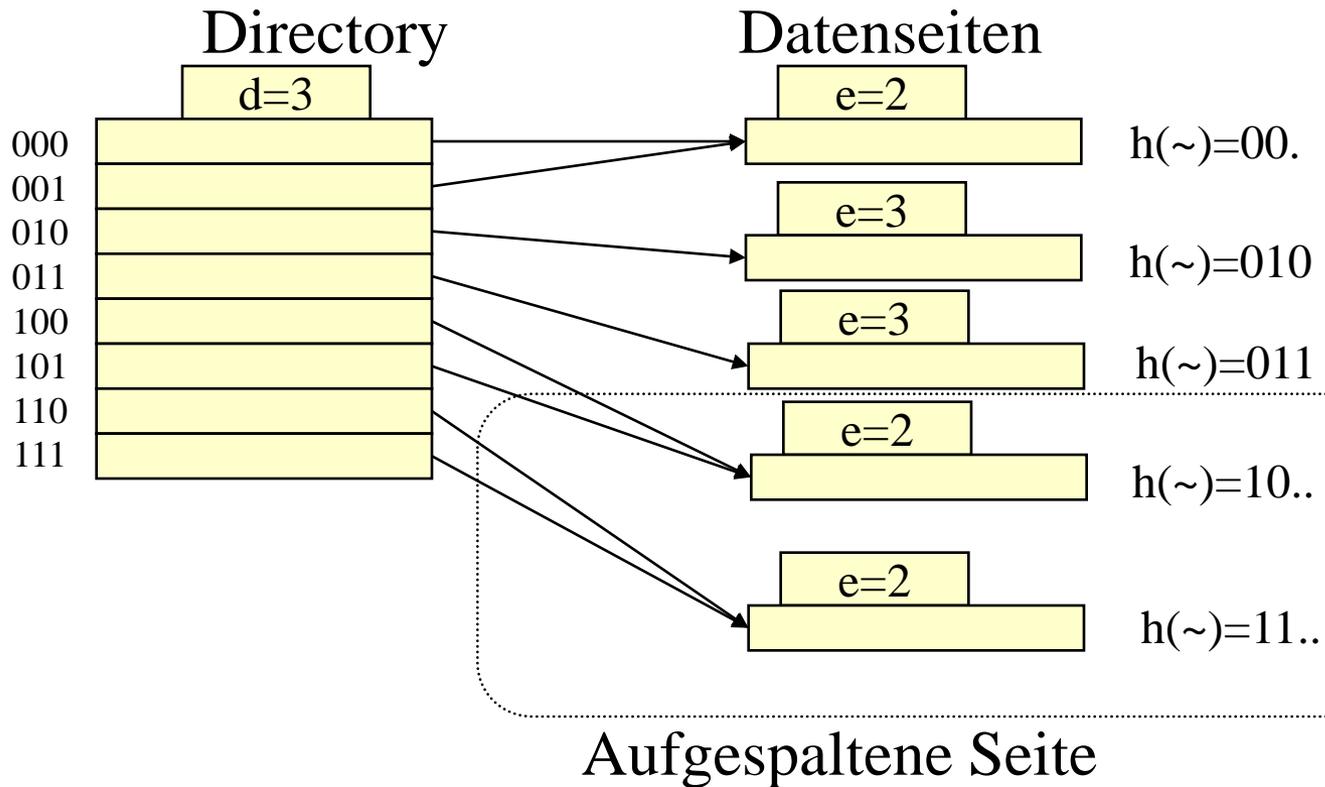
1. Aufspalten der Datenseite.
2. Verdoppeln des Directory.



# Einfügen Erweiterbares Hashing (2)

Aufspalten einer Datenseite

Aufspalten wenn Füllungsgrad einer Seite zu hoch( >90%).

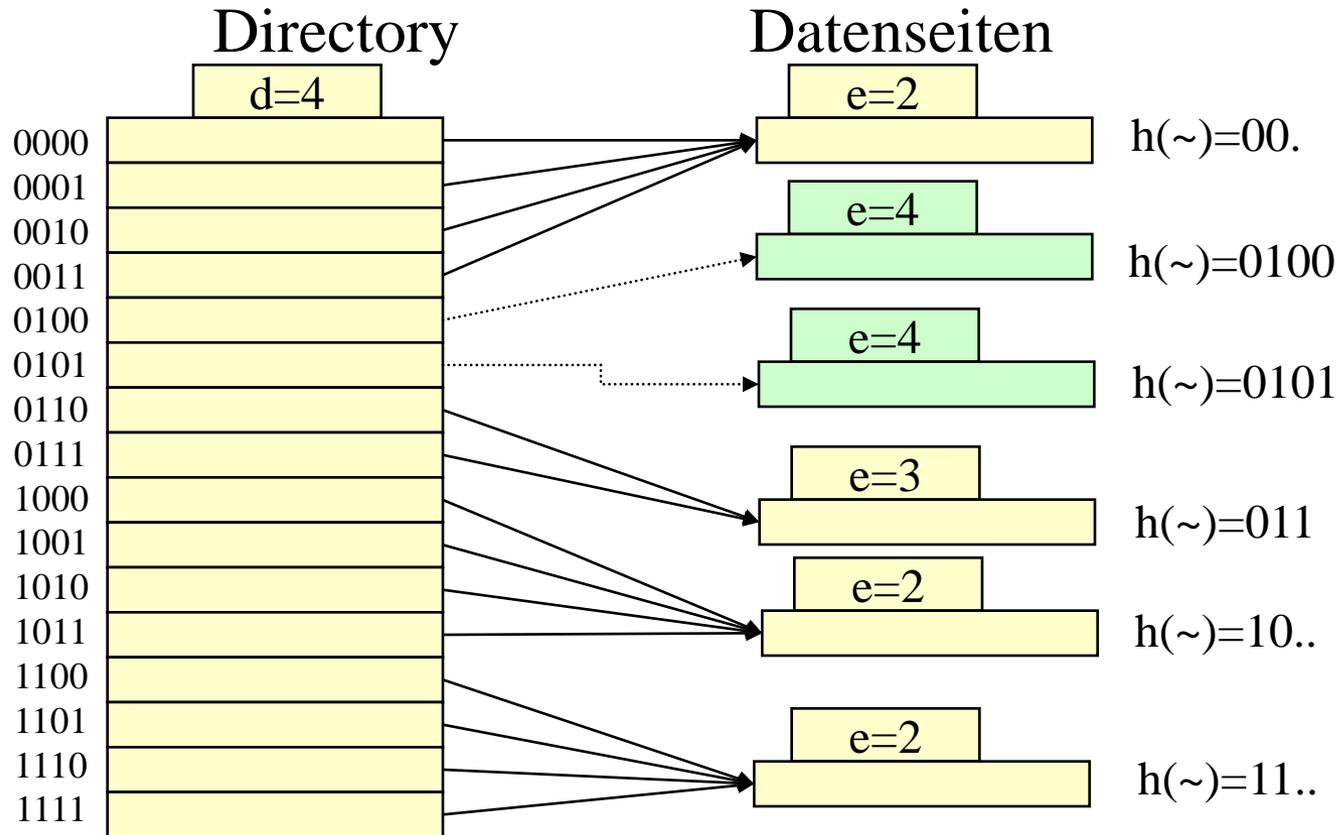




# Einfügen Erweiterbares Hashing (3)

Verdopplung des Directory

Datenseite läuft über und  $d = e$ .

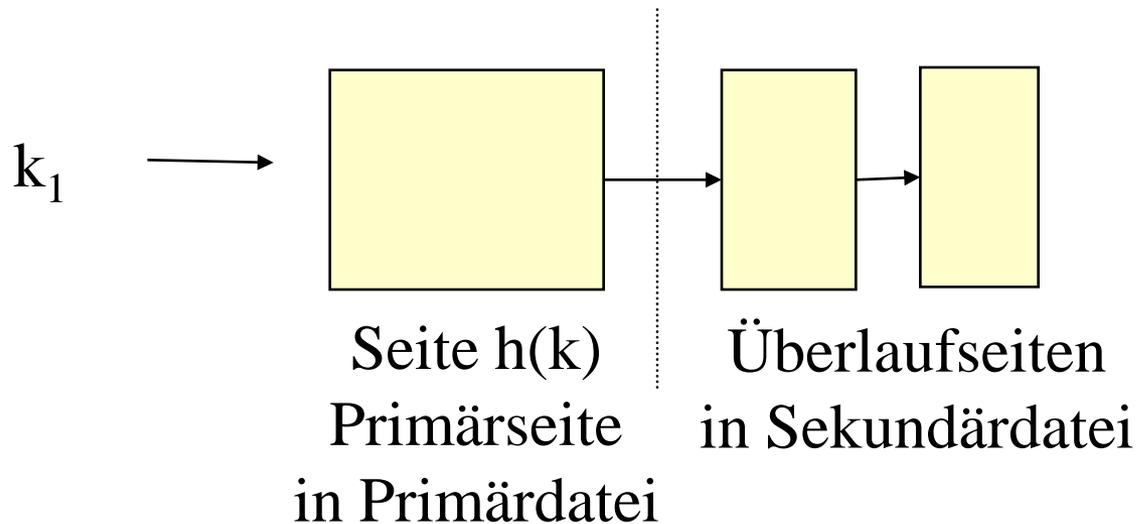




# Hashing ohne Directory

## Lineares Hashing

- Hash-Funktion  $h:K \rightarrow A$  liefert direkt eine Seitenadresse
- Problem: Was ist wenn Datenseite voll ist ?
- Lösung: Überlaufseiten werden angehängt. Aber bei zu vielen Überlaufseiten degeneriert Suchzeit.





# Lineares Hashing (1)

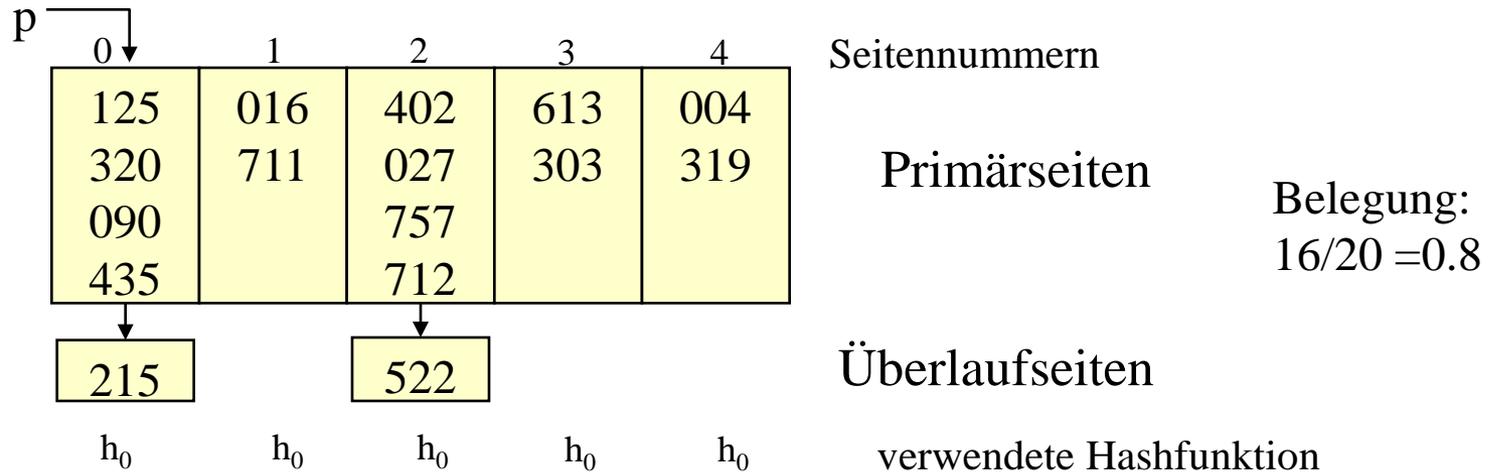
- dynamisches Wachstum der Primärdatei
- Folge von Hash-Funktionen:  $h_0, h_1, h_2, \dots$
- Erweitern der Primärdatei um jeweils eine Seite
- feste Splitreihenfolge
- Expansionzeiger zeigt an welche Seite gesplittet wird
- Kontrollfunktion: Wann wird gesplittet ?  
Belegungsfaktor übersteigt Schwellwert:  
z.B.

$$80\% < \frac{\# \text{abgespeicherte Datensätze}}{\# \text{mögl. Datensätze in Primärdatei}}$$

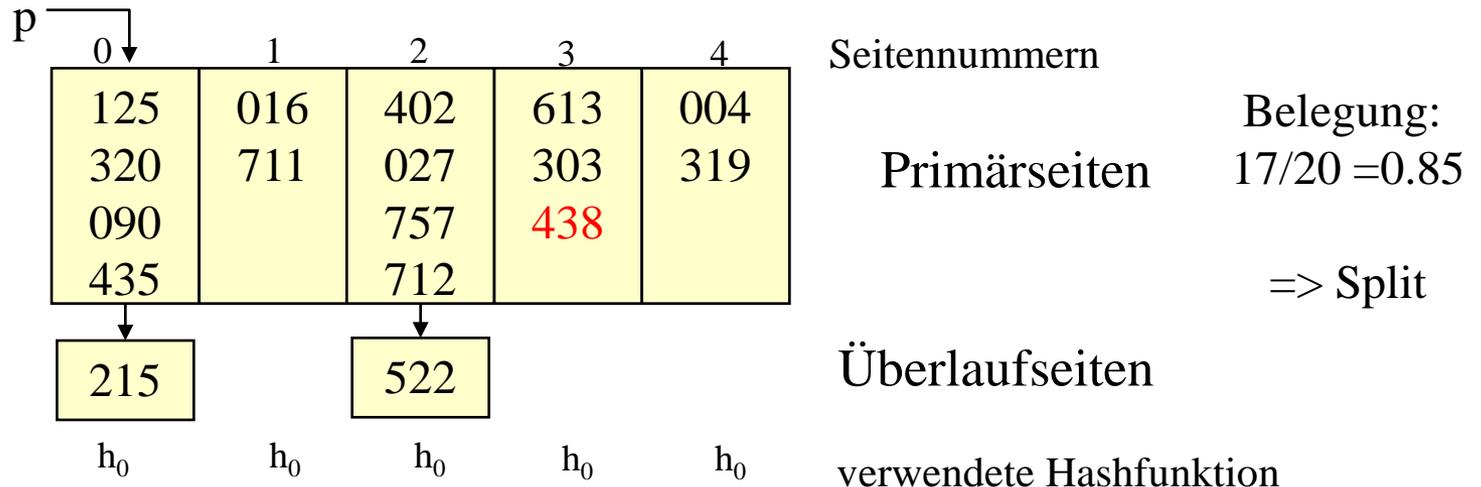


# Lineares Hashing (2)

- Hashfunktionen:  $h_0(k)=k \bmod(5)$ ,  $h_1(k)=k \bmod(10)$ , ...



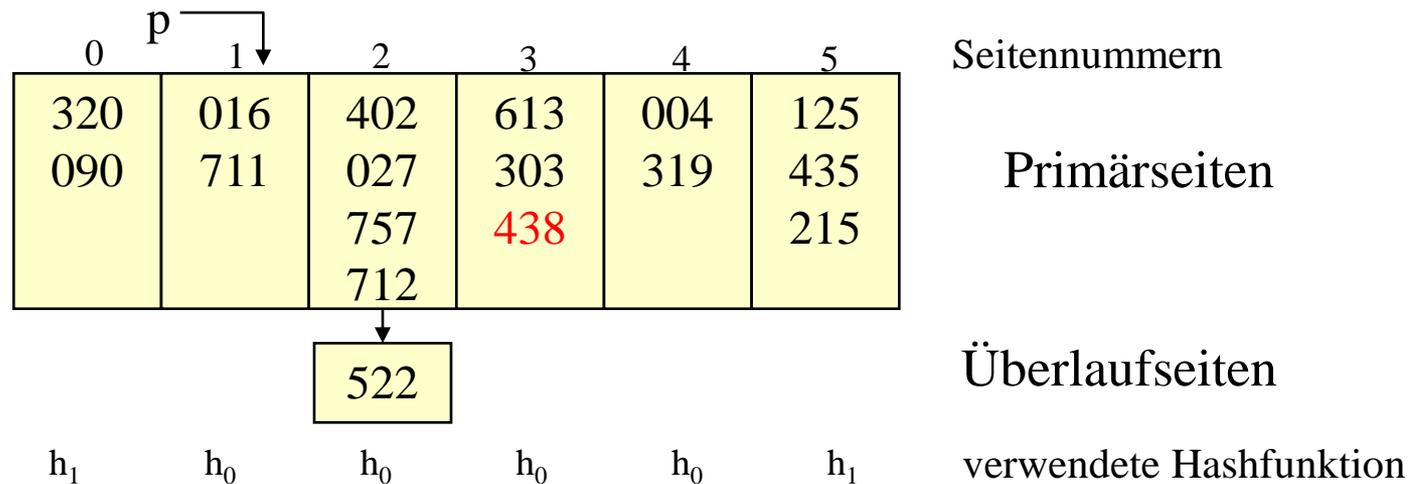
Einfügen von Schlüssel 438:





# Lineares Hashing (3)

Expansion der Seite 0 auf die Seiten 0 und 5:



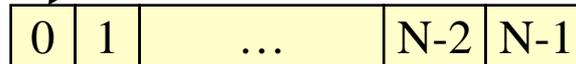
- Umspeichern aller Datensätze mit  $h_1(k) = 5$  in neue Seite
- Datensätze mit  $h_1(k) = 0$  bleiben



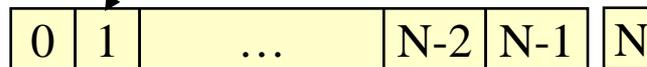
# Lineares Hashing (4)

Prinzip der Expansion:

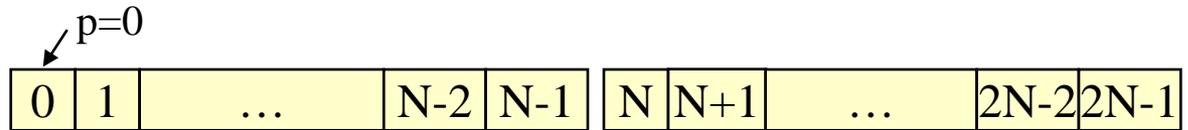
Ausgangssituation  $p=0$



nach dem ersten Split  $p=1$



nach Verdopplung der Datei



- Split in fester Ordnung (nicht: Split der vollen Seiten)
- trotzdem wenig Überlaufseiten
- gute Leistung für gleich verteilte Daten
- Adreßraum wächst linear



# Lineares Hashing (5)

Anforderungen an die Hashfunktionen  $\{h_i\}$ ,  $i > 0$  :

1.) Bereichsbedingung:

$$h_L: \text{domain}(k) \rightarrow \{0, 1, \dots, (2^L * N) - 1\}, L \geq 0$$

2.) Splitbedingung:

$$h_{L+1}(k) = h_L(k) \text{ oder}$$

$$h_{L+1}(k) = h_L(k) + 2^L * N, L \geq 0$$

L gibt an wie oft sich Datei schon vollständig verdoppelt hat.

Beispiel:

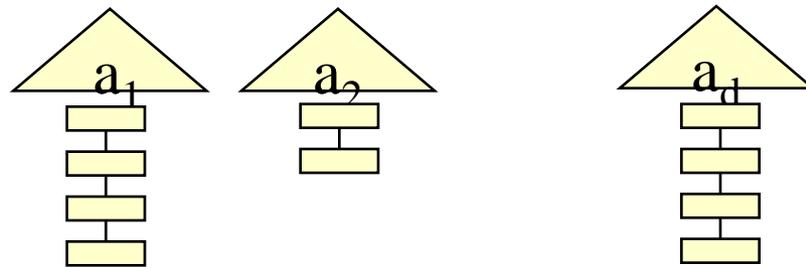
$$h(k) = k \text{ mod } (2^L * N)$$



# Anfragen auf mehreren Attributen (1)

## Invertierte Listen (häufigste Lösung)

- jedes relevante Attribute wird mit eindimensionalem Index verwaltet.
- Suche nach mehreren Attributen  $a_1, a_2, \dots, a_d$
- Erstellen von Ergebnislisten mit Datensätzen  $d$  bei denen  $d.a_1$  der Anfragebedingung genügt.



- Bestimmen des Ergebnis über mengentheoretischen Verknüpfung (z.B. Schnitt) der einzelnen Ergebnislisten.



# Anfragen auf mehreren Attributen (2)

Eigenschaften Invertierter Listen:

- Die Antwortzeit ist nicht proportional zur Anzahl der Antworten.
- Suchzeit wächst mit Anzahl der Attribute
- genügend Effizienz bei kleinen Listen
- Sekundärindizes für nicht Primärschlüssel beeinflussen die physikalische Speicherung nicht.
- zusätzliche Sekundärindizes können das Leistungsverhalten bei DB-Updates stark negativ beeinflussen.



# Index-Generierung in SQL

- Generierung eines Index:

**CREATE INDEX *index-name* ON *table* (*a<sub>1</sub>*, *a<sub>2</sub>*, ..., *a<sub>n</sub>*);**

Ein Composite Index besteht aus mehr als einer Spalte. Die Tupel sind dann nach den Attributwerten (lexikographisch) geordnet:

Für den Vergleich der einzelnen Attribute gilt die jeweils übliche Ordnung:

$t_1 < t_2$  gdw.

$t_1.a_1 < t_2.a_1$  oder  $(t_1.a_1 = t_2.a_1$  und  $t_1.a_2 < t_2.a_2)$  oder ...

numerischer Vergleich für numerische Typen, lexikographischer Vergleich bei **CHAR**, Datums-Vergleich bei **DATE** usw.

- Löschen eines Index:

**DROP INDEX *index-name*;**

- Verändern eines Index:

**ALTER INDEX *index-name* ...;**

(betrifft u.a. Speicherungs-Parameter und Rebuild)



# Durch Index unterstützte Anfragen

- **Exact match query:**

**SELECT \* FROM  $t$  WHERE  $a_1 = \dots$  AND ... AND  $a_n = \dots$**

- **Partial match query:**

**SELECT \* FROM  $t$  WHERE  $a_1 = \dots$  AND ... AND  $a_i = \dots$**

für  $i < n$ , d.h. wenn die exakt spezifizierten Attribute ein Präfix der indizierten Attribute sind.

Eine Spezifikation von  $a_{i+1}$  kann i.a. nicht genutzt werden, wenn  $a_i$  nicht spezifiziert ist.

- **Range query:**

**SELECT \* FROM  $t$  WHERE  $a_1 = \dots$  AND ... AND  $a_i = \dots$  AND  $a_{i+1} \leq \dots$**

auch z.B. für '>' oder 'BETWEEN'

- **Pointset query:**

**SELECT \* FROM  $t$  WHERE  $a_1 = \dots$  AND ... AND  $a_i = \dots$  AND  $a_{i+1} \text{ IN } (7,17,77)$**

auch z.B. ( $a_{i+1} = \dots$  OR  $a_{i+1} = \dots$  OR ...)



# Durch Index unterstützte Anfragen

- **Pattern matching query**

***SELECT \* FROM t WHERE a<sub>1</sub>=... AND ... AND a<sub>i</sub>=... AND a<sub>i+1</sub> LIKE 'c<sub>1</sub>c<sub>2</sub>... c<sub>k</sub>%'***

Problem: Anfragen wie *wort* **LIKE** '*%system*' werden nicht unterstützt.  
Man kann aber z.B. eine Relation aufbauen, in der alle Wörter revers gespeichert werden und dann effizient nach *revers\_wort* **LIKE** '*metsys%*' suchen lassen.



# Indexstrukturen in SQL

Index Reihenfolge:

- 1.) **create index** name\_geb **on** Dozent  
(Name, Geburt)
- 2.) **create index** geb\_name **on** Dozent  
(Geburt, Name )

Welcher Index unterstützt folgende Anfrage besser:

```
Select Name from Dozent where Name like 'H%'
```

Index „name\_geb“ ist besser, da Name ein Praefix von Name, Geburt.



# Zusammenfassung

- Um Anfragen und Operationen effizient durchführen zu können, setzt die interne Ebene des Datenbanksystems geeignete Datenstrukturen und Speicherungsverfahren (**Indexstrukturen**) ein.
- Primärindizes verwalten Primärschlüssel
- Sekundärindizes unterstützen zusätzliche Suchattribute oder Kombinationen von diesen.
- Ein Beispiel für eine solche Indexstruktur sind B+-Baum und dynamische Hash-Verfahren.
- Anfragen auf mehreren Attributen werden meist mit invertierten Listen realisiert.