

# Datenbanken 2

## Indexstrukturen

Nikolaus Augsten

[nikolaus.augsten@sbg.ac.at](mailto:nikolaus.augsten@sbg.ac.at)

FB Computerwissenschaften  
Universität Salzburg

Version 2018-01-30

Wintersemester 2017/18

## Literatur und Quellen

Lektüre zum Thema “Indexstrukturen”:

- Kapitel 7 aus Kemper und Eickler: Datenbanksysteme: Eine Einführung. Oldenbourg Verlag, 2013.
- Chapter 11 in Silberschatz, Korth, and Sudarshan: Database System Concepts. McGraw Hill, 2011.

Danksagung Die Vorlage zu diesen Folien wurde entwickelt von:

- Michael Böhlen, Universität Zürich, Schweiz
- Johann Gamper, Freie Universität Bozen, Italien

## Inhalt

### 1 Indexstrukturen für Dateien

- Grundlagen
- $B^+$ -Baum
- Statisches Hashing
- Dynamisches Hashing
- Mehrschlüssel Indices
- Indizes in SQL

## Inhalt

### 1 Indexstrukturen für Dateien

- Grundlagen
- $B^+$ -Baum
- Statisches Hashing
- Dynamisches Hashing
- Mehrschlüssel Indices
- Indizes in SQL

## Grundlagen/1

- Index beschleunigt Zugriff, z.B.:
  - Autorenkatalog in Bibliothek
  - Index in einem Buch
- Index-Datei besteht aus Datensätzen: den Index-Einträgen
- Index-Eintrag hat die Form  
(Suchschlüssel, Pointer)
  - Suchschlüssel: Attribut(liste) nach der Daten gesucht werden
  - Pointer: Pointer auf einen Datensatz (TID)
- Suchschlüssel darf mehrfach vorkommen  
(im Gegensatz zu Schlüsseln von Relationen)
- Index-Datei meist viel kleiner als die indizierte Daten-Datei

## Grundlagen/3

Indextypen werden nach folgenden Kriterien unterschieden:

- Ordnung der Daten- und Index-Datei:
  - Primärindex
  - Clustered Index
  - Sekundärindex
- Art der Index-Einträgen:
  - sparse Index
  - dense Index

Nicht alle Kombinationen üblich/möglich:

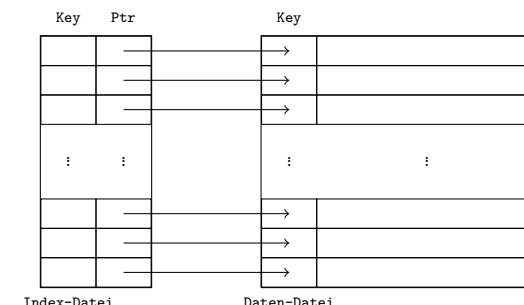
- Primärindex ist oft sparse
- Sekundärindex ist immer dense

## Grundlagen/2

- Merkmale des Index sind:
  - Zugriffszeit
  - Zeit für Einfügen
  - Zeit für Löschen
  - Speicherbedarf
  - effizient unterstützte Zugriffsarten
- Wichtigste Zugriffsarten sind:
  - Punktanfragen: z.B. Person mit SVN=1983-3920
  - Mehrpunktanfragen: z.B. Personen, die 1980 geboren wurden
  - Bereichsanfragen: z.B. Personen die mehr als 100.000 EUR verdienen

## Primärindex/1

- Primärindex:
  - Datensätze in der Daten-Datei sind nach Suchschlüssel sortiert
  - Suchschlüssel ist eindeutig, d.h., Suche nach 1 Schlüssel ergibt (höchstens) 1 Tupel



## Primärindex/2

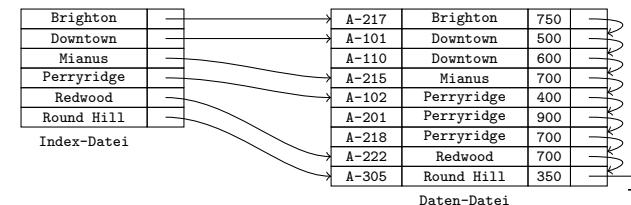
- **Index-Datei:**
  - sequentiell geordnet nach Suchschlüssel
- **Daten-Datei:**
  - sequentiell geordnet nach Suchschlüssel
  - jeder Suchschlüssel kommt nur 1 mal vor
- **Effiziente Zugriffsarten:**
  - Punkt- und Bereichsanfragen
  - nicht-sequentieller Zugriff (random access)
  - sequentieller Zugriff nach Suchschlüssel sortiert (sequential access)

## Sekundärindex/1

- **Primär- vs. Sekundärindex:**
  - nur 1 Primärindex (bzw. Clustered Index) möglich
  - beliebig viele Sekundärindizes
  - Sekundärindex für schnellen Zugriff auf alle Felder, die nicht Suchschlüssel des Primärindex sind
- **Beispiel:** Konten mit Primärindex auf Kontonummer
  - Finde alle Konten einer bestimmten Filiale.
  - Finde alle Konten mit 1000 bis 1500 EUR Guthaben.
- **Ohne Index** können diese Anfragen **nur durch sequentielles Lesen** aller Knoten beantwortet werden – sehr langsam
- **Sekundärindex** für schnellen Zugriff **erforderlich**

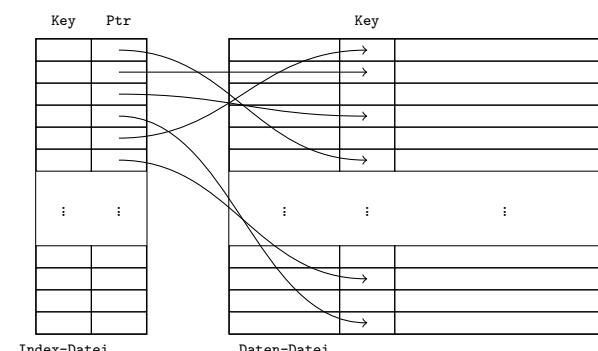
## Clustered Index

- **Index-Datei:**
  - sequentiell geordnet nach Suchschlüssel
- **Daten-Datei:**
  - sequentiell geordnet nach Suchschlüssel
  - Suchschlüssel kann *mehr*fach vorkommen
- **Effiziente Zugriffsarten:**
  - Punkt-, Mehrpunkt-, und Bereichsanfragen
  - nicht-sequentieller Zugriff (random access)
  - sequentieller Zugriff nach Suchschlüssel sortiert (sequential access)



## Sekundärindex/2

- **Index-Datei:**
  - sequentiell nach Suchschlüssel geordnet
- **Daten-Datei:**
  - Suchschlüssel kann *mehr*fach vorkommen
  - *nicht* nach Suchschlüssel geordnet



## Sekundärindex/3

### Effiziente Zugriffsarten:

- sehr schnell für Punktanfragen
- Mehrpunkt- und Bereichsanfragen: gut wenn nur kleiner Teil der Tabelle zurückgeliefert wird (wenige %)
- besonders für nicht-sequentiellen Zugriff (random access) geeignet

## Duplikate/1

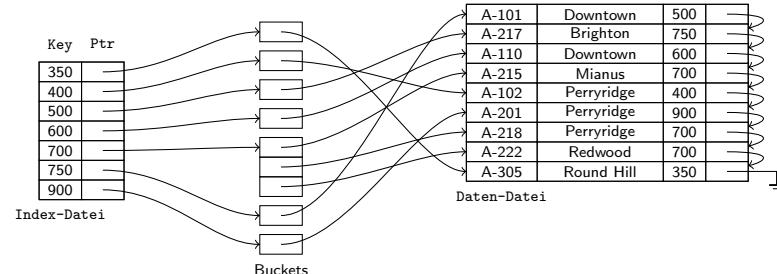
Umgang mit mehrfachen Suchschlüsseln:

### (a) Doppelte Indexeinträge:

- ein Indexeintrag für jeden Datensatz  
→ schwierig zu handhaben, z.B. in  $B^+$ -Baum Index

### (b) Buckets:

- nur einen Indexeintrag pro Suchschlüssel
- Index-Eintrag zeigt auf ein Bucket
- Bucket zeigt auf alle Datensätze zum entsprechenden Suchschlüssel  
→ zusätzlicher Block (Bucket) muss gelesen werden



## Duplikate/2

Umgang mit mehrfachen Suchschlüsseln:

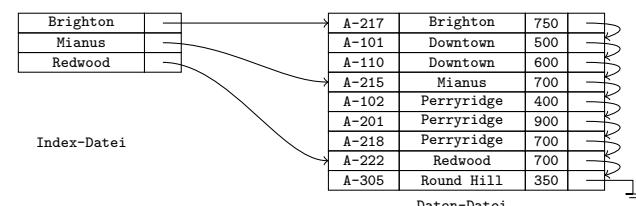
### (c) Suchschlüssel eindeutig machen:

- Einfügen: TID wird an Suchschlüssel angehängt (sodass dieser eindeutig wird)
- Löschen: Suchschlüssel und TID werden benötigt (ergibt genau 1 Index-Eintrag)
- Suche: nur Suchschlüssel wird benötigt (ergibt mehrere Index-Einträge)  
→ wird in der Praxis verwendet

## Sparse Index/1

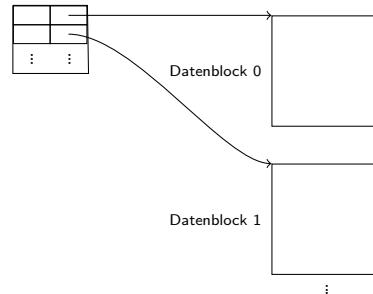
### Sparse Index

- ein Index-Eintrag für mehrere Datensätze
- kleiner Index: weniger Index-Einträge als Datensätze
- nur möglich wenn Datensätze nach Suchschlüssel geordnet sind (d.h. Primärindex oder Clustered Index)



## Sparse Index/2

- Oft enthält ein sparse Index einen Eintrag pro Block.
- Der **Suchschlüssel**, der im Index für einen Block gespeichert wird, ist der **kleinste Schlüssel in diesem Block**.



## Dense Index/1

- **Dense Index:**
  - Index-Eintrag (bzw. Pointer in Bucket) für **jeden Datensatz** in der Daten-Datei
  - **dense Index** kann groß werden (aber normalerweise kleiner als Daten)
  - Handhabung einfacher, da ein Pointer pro Datensatz
- **Sekundärindex** ist immer **dense**

## Gegenüberstellung von Index-Typen

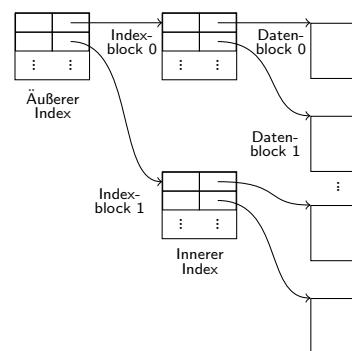
- Alle Index-Typen machen **Punkt-Anfragen erheblich schneller**.
- Index erzeugt **Kosten bei Updates**: Index muss auch aktualisiert werden.
- **Dense/Sparse** und **Primär/Sekundär**:
  - Primärindex kann **dense** oder **sparse** sein
  - Sekundärindex ist **immer dense**
- **Sortiert lesen** (=sequentielles Lesen nach Suchschlüssel-Ordnung):
  - mit Primärindex **schnell**
  - mit Sekundärindex **teuer**, da sich aufeinander folgende Datensätze auf unterschiedlichen Blocks befinden (können)
- **Dense vs. Sparse**:
  - sparse Index braucht **weniger Platz**
  - sparse Index hat **geringere Kosten** beim Aktualisieren
  - dense Index erlaubt bestimmte Anfragen zu beantworten, ohne dass Datensätze gelesen werden müssen ("covering index")

## Mehrstufiger Index/1

- **Großer Index wird teuer**:
  - Index passt nicht mehr in Hauptspeicher und mehrere Block-Lese-Operationen werden erforderlich
  - binäre Suche:  $\lfloor \log_2(B) \rfloor + 1$  Block-Lese-Operationen (Index mit  $B$  Blocks)
  - eventuelle Overflow Blocks müssen sequentiell gelesen werden
- **Lösung: Mehrstufiger Index**
  - Index wird selbst wieder indiziert
  - dabei wird der Index als sequentielle Daten-Datei behandelt

## Mehrstufiger Index/2

- Mehrstufiger Index:
  - Innerer Index: Index auf Daten-Datei
  - Äußerer Index: Index auf Index-Datei
- Falls äußerer Index zu groß wird, kann eine **weitere Index-Ebene** eingefügt werden.
- Diese Art von (ein- oder mehrstufigem) Index wird auch als **ISAM** (Index Sequential Access Method) oder **index-sequentielle Datei** bezeichnet.



## Inhalt

### 1 Indexstrukturen für Dateien

- Grundlagen
- $B^+$ -Baum
- Statisches Hashing
- Dynamisches Hashing
- Mehrschlüssel Indices
- Indizes in SQL

## Mehrstufiger Index/3

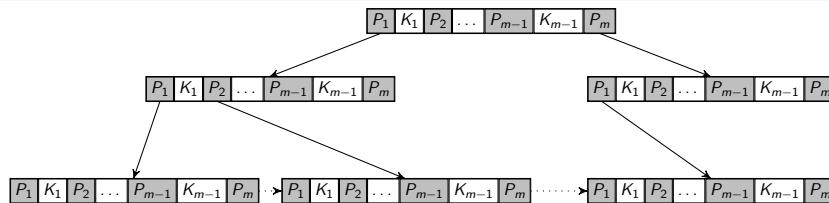
- **Index Suche**
  - beginne beim Root-Knoten
  - finde alle passenden Einträge und verfolge die entsprechenden Pointer
  - wiederhole bis Pointer auf Datensatz zeigt (Blatt-Ebene)
- **Index Update: Löschen und Einfügen**
  - Indizes aller Ebenen müssen nachgeführt werden
  - Update startet beim innersten Index
  - Erweiterungen der Algorithmen für einstufige Indizes

## $B^+$ -Baum/1

**$B^+$ -Baum:** Alternative zu index-sequentiellen Dateien:

- **Vorteile von  $B^+$ -Bäumen:**
  - Anzahl der Ebenen wird automatisch angepasst
  - reorganisiert sich selbst nach Einfüge- oder Lösch-Operationen durch kleine lokale Änderungen
  - reorganisieren des gesamten Indexes ist nie erforderlich
- **Nachteile von  $B^+$ -Bäumen:**
  - evtl. Zusatzaufwand bei Einfügen und Löschen
  - etwas höherer Speicherbedarf
  - komplexer zu implementieren
- Vorteile wiegen Nachteile in den meisten Anwendungen bei weitem auf, deshalb sind  $B^+$ -Bäume die meist-verbreitete Index-Struktur

## $B^+$ -Baum/2



- **Knoten mit Grad  $m$ :** enthält bis zu  $m - 1$  Suchschlüssel und  $m$  Pointer
  - Knotengrad  $m > 2$  entspricht der maximalen Anzahl der Pointer
  - Suchschlüssel im Knoten sind sortiert
  - Knoten (außer Wurzel) sind mindestens halb voll
- **Wurzelknoten:**
  - als Blattknoten: 0 bis  $m - 1$  Suchschlüssel
  - als Nicht-Blattknoten: mindestens 2 Kinder
- **Innerer Knoten:**  $\lceil m/2 \rceil$  bis  $m$  Kinder (=Anzahl Pointer)
- **Blattknoten:**  $\lceil (m-1)/2 \rceil$  bis  $m - 1$  Suchschlüssel bzw. Daten-Pointer
- **balancierter Baum:** alle Pfade von der Wurzel zu den Blättern sind gleich lang (maximal  $\lceil \log_{\lceil m/2 \rceil}(L) \rceil$  Kanten für  $L$  Blattknoten)

## $B^+$ -Baum Knotenstruktur/1

**Blatt-Knoten:**

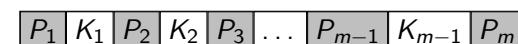
- $K_1, \dots, K_{m-1}$  sind Suchschlüssel
- $P_1, \dots, P_{m-1}$  sind Daten-Pointer
- Suchschlüssel sind sortiert:  $K_1 < K_2 < K_3 < \dots < K_{m-1}$
- Daten-Pointer  $P_i$ ,  $1 \leq i \leq m - 1$ , zeigt auf
  - einen Datensatz mit Suchschlüssel  $K_i$ , oder
  - auf ein Bucket mit Pointern zu Datensätzen mit Suchschlüssel  $K_i$
- $P_m$  zeigt auf das nächste Blatt in Suchschlüssel-Ordnung

## Terminologie und Notation

- Ein Paar  $(P_i, K_i)$  ist ein Eintrag.
- $L[i] = (P_i, K_i)$  bezeichnet den  $i$ -ten Eintrag von Knoten  $L$
- **Daten-Pointer:** Pointer zu Datensätzen sind nur in den Blättern gespeichert
- **Verbindung zwischen Blättern:** der letzte Pointer im Blatt,  $P_m$ , zeigt auf das nächste Blatt

*Anmerkung:* Es gibt viele Varianten des  $B^+$ -Baumes, die sich leicht unterscheiden. Auch in Lehrbüchern werden unterschiedliche Varianten vorgestellt. Für diese Lehrveranstaltung gilt der  $B^+$ -Baum, wie er hier präsentiert wird.

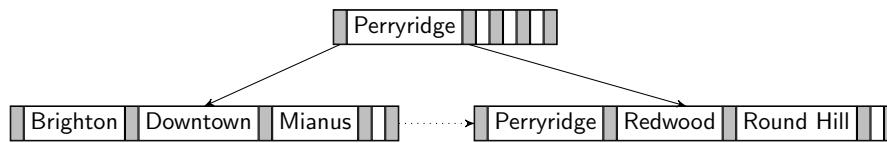
## $B^+$ -Baum Knotenstruktur/2

**Innere Knoten:**

- Stellen einen **mehrstufigen sparse Index** auf die Blattknoten dar.
- Suchschlüssel im Knoten sind **einzigartig**.
- $P_1, \dots, P_m$  sind **Pointer zu Kind-Knoten**, d.h., zu Teilbäumen
- Alle **Suchschlüssel  $k$**  im Teilbaum von  $P_i$  haben folgende Eigenschaften:
  - $i = 1$ :  $k < K_1$
  - $1 < i < m$ :  $K_{i-1} \leq k < K_i$
  - $i = m$ :  $k \geq K_{m-1}$

Beispiel:  $B^+$ -Baum/1

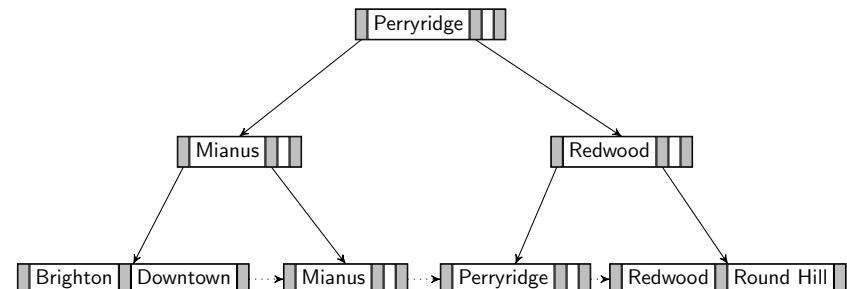
- Index auf Konto-Relation mit Suchschlüssel Filiale
- $B^+$ -Baum mit Knotengrad  $m = 5$ :
  - Wurzel: mindestens 2 Pointer zu Kind-Knoten
  - Innere Knoten:  $\lceil m/2 \rceil = 3$  bis  $m = 5$  Pointer zu Kind-Knoten
  - Blätter:  $\lceil (m-1)/2 \rceil = 2$  bis  $m-1 = 4$  Suchschlüssel

Suche im  $B^+$ -Baum/1

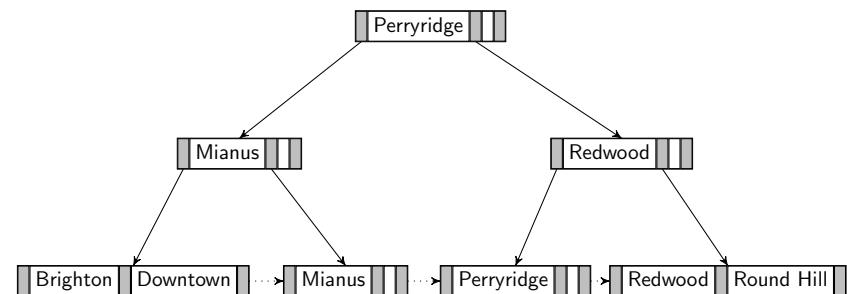
- Algorithmus: Suche alle Datensätze mit Suchschlüssel  $k$  (Annahme: denses  $B^+$ -Baum Index):
  - $C \leftarrow$  Wurzelknoten
  - while**  $C$  keine Blattknoten **do**
    - suche im Knoten  $C$  nach dem größten Schlüssel  $K_i \leq k$
    - if** ein Schlüssel  $K_i \leq k$  existiert
    - then**  $C \leftarrow$  Knoten auf den  $P_{i+1}$  zeigt
    - else**  $C \leftarrow$  Knoten auf den  $P_1$  zeigt
  - if** es gibt einen Schlüssel  $K_i$  in  $C$  sodass  $K_i = k$
  - then** folge Pointer  $P_i$  zum gesuchten Datensatz (oder Bucket)
  - else** kein Datensatz mit Suchschlüssel  $k$  existiert

Beispiel:  $B^+$ -Baum/2

- $B^+$ -Baum für Konto-Relation (Knotengrad  $m = 3$ )
  - Wurzel: mindestens 2 Pointer zu Kind-Knoten
  - Innere Knoten:  $\lceil m/2 \rceil = 2$  bis  $m = 3$  Pointer zu Kind-Knoten
  - Blätter:  $\lceil (m-1)/2 \rceil = 1$  bis  $m-1 = 2$  Suchschlüssel

Suche im  $B^+$ -Baum/2

- Beispiel: Finde alle Datensätze mit Suchschlüssel  $k = Mianus$ 
  - Beginne mit dem Wurzelknoten
  - Kein Schlüssel  $K_i \leq Mianus$  existiert, also folge  $P_1$
  - $K_1 = Mianus$  ist der größte Suchschlüssel  $K_i \leq Mianus$ , also folge  $P_2$
  - Suchschlüssel  $Mianus$  existiert, also folge dem ersten Datensatz-Pointer  $P_1$  um zum Datensatz zu gelangen



## Suche im B<sup>+</sup>-Baum/3

- Suche durchläuft Pfad von Wurzel bis Blatt:

- Länge des Pfads höchstens  $\lceil \log_{\lceil m/2 \rceil}(L) \rceil$  für  $L$  Blattknoten  
 $\Rightarrow \lceil \log_{\lceil m/2 \rceil}(L) \rceil + 1$  Blocks<sup>1</sup> müssen gelesen werden
- sind die Blattknoten nur minimal voll ( $\lceil (m-1)/2 \rceil$ ), ergibt sich die maximale Anzahl der Blattknoten:  $L = \lceil \frac{K}{\lceil (m-1)/2 \rceil} \rceil$
- Wurzelknoten bleibt im Hauptspeicher, oft auch dessen Kinder, dadurch werden 1-2 Block-Zugriffe pro Suche gespart

- Suche effizienter als in sequentiell Index:

- bis zu  $\lfloor \log_2(B) \rfloor + 1$  Blocks<sup>1</sup> lesen im einstufigen sequentiellen Index (binäre Suche, Index mit  $B$  Blocks,  $B = \lceil K/(m-1) \rceil$ )

<sup>1</sup>nur Index Blocks werden gezählt, Datenzugriff hier nicht berücksichtigt

## Einfügen in B<sup>+</sup>-Baum/1

- Datensatz mit Suchschlüssel  $k$  einfügen:

- füge Datensatz in Daten-Datei ein (ergibt Pointer)
- finde Blattknoten für Suchschlüssel  $k$
- falls** im Blatt noch Platz ist **dann**:
  - füge (Pointer, Suchschlüssel)-Paar so in Blatt ein, dass Ordnung der Suchschlüssel erhalten bleibt
- sonst** (Blatt ist voll) teile Blatt-Knoten:
  - sortiere alle Suchschlüssel (einschließlich  $k$ )
  - die Hälfte der Suchschlüssel bleiben im alten Knoten
  - die andere Hälfte der Suchschlüssel kommt in einen neuen Knoten
  - füge den kleinsten Eintrag des neuen Knotens in den Eltern-Knoten des geteilten Knotens ein
- falls** Eltern-Knoten voll ist **dann**: teile den Knoten und propagiere Teilung nach oben, sofern nötig

## Integrierte Übung 2.1

Es soll ein Index mit  $10^6$  verschiedenen Suchschlüsseln erstellt werden. Ein Knoten kann maximal 200 Schlüssel mit den entsprechenden Pointern speichern. Es soll nach einem bestimmten Suchschlüssel  $k$  gesucht werden.

- Wie viele Block-Zugriffe erfordert ein B<sup>+</sup>-Baum Index maximal, wenn kein Block im Hauptspeicher ist?
- Wie viele Block-Zugriffe erfordert ein einstufiger, sequentieller Index mit binärer Suche?

## Einfügen in B<sup>+</sup>-Baum/2

- Aufteilvorgang:

- falls nach einer Teilung der neue Schlüssel im Elternknoten nicht Platz hat wird auch dieser geteilt
- im schlimmsten Fall wird der Wurzelknoten geteilt und der B<sup>+</sup>-Baum wird um eine Ebene tiefer

## Algorithmus: Einfügen in B<sup>+</sup>-Baum/1

→ Knoten  $L$ , Suchschlüssel  $k$ , Pointer  $p$  (zu Datensatz oder Knoten)

### Algorithm 1: B+TreeInsert( $L, k, p$ )

```

if  $L$  has less than  $m - 1$  key values then
   $\downarrow$  insert( $k, p$ ) into  $L$ 
else
   $T \leftarrow L \cup (k, p);$                                 // Knoten teilen
  create new node  $L'$ ;                                // temporärer Speicher
   $L'.p_m \leftarrow L.p_m;$ 
   $L \leftarrow \emptyset;$ 
   $L.p_m \leftarrow L';$ 
  copy  $T.p_1$  through  $T.k_{\lceil m/2 \rceil}$  into  $L$ ;
  copy  $T.p_{\lceil m/2 \rceil + 1}$  through  $T.k_m$  into  $L'$ ;
   $k' \leftarrow T.k_{\lceil m/2 \rceil} + 1;$ 
  B+TreeInsertInParent( $L, k', L'$ );

```

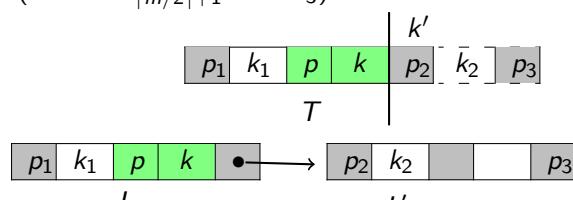
## Blatt teilen/1

Kopiere  $L$  nach  $T$  und füge  $(k, p)$  ein:  $\boxed{p_1 \ k_1 \ p_2 \ k_2 \ p_3}$   $m = 3$

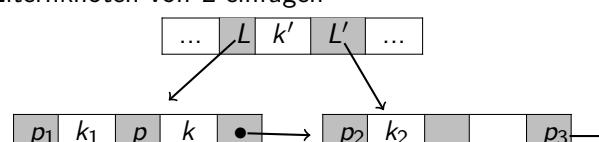
1. Anhängen und sortieren (z.B.:  $k_1 < k < k_2$ )



2. Teilen ( $k' = T.k_{\lceil m/2 \rceil + 1} = T.k_3$ )



3.  $(k', L')$  in Elternknoten von  $L$  einfügen



## Algorithmus: Einfügen in B<sup>+</sup>-Baum/2

### Algorithm 2: B+TreeInsertInParent( $L, k, L'$ )

```

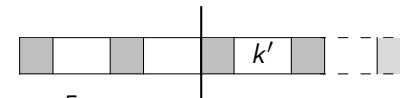
if  $L$  is root then
  create new root with children  $L, L'$  and value  $k$ ;
   $\downarrow$  return;
else
   $P \leftarrow \text{parent}(L);$ 
  if  $P$  has less than  $m$  pointers then
     $\downarrow$  insert( $k, L'$ ) into  $P$ ;
  else
     $T \leftarrow P \cup (k, L');$                                 // Knoten teilen
    erase all entries from  $P$ ;
    create new node  $P'$ ;
    copy  $T.p_1$  through  $T.p_{\lceil m/2 \rceil}$  into  $P$ ;
    copy  $T.p_{\lceil m/2 \rceil + 1}$  through  $T.p_{m+1}$  into  $P'$ ;
     $k' \leftarrow T.k_{\lceil m/2 \rceil};$ 
    B+TreeInsertInParent( $P, k', P'$ );

```

## Blatt teilen/2

$k' = T.k_{\lceil m/2 \rceil + 1}$

- $m$  gerade, z.B.:  $m=4$



- $m$  ungerade, z.B.:  $m=5$

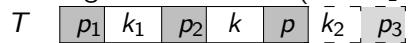


## Innere Knoten teilen/1

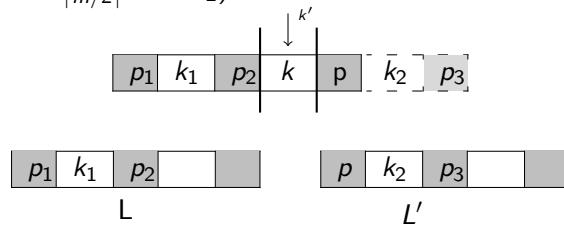


Kopiere P nach T und füge (k, p) ein:

1. Anhängen und sortieren (z.B.:  $k_1 < k < k_2$ )



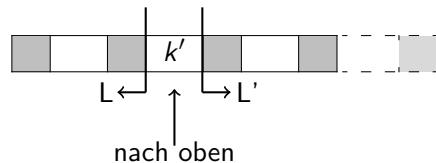
2. Teilen ( $k' = T.k_{\lceil m/2 \rceil} = T.k_2$ )



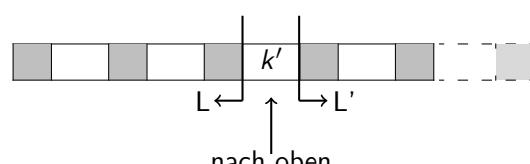
## Innere Knoten teilen/3

$$k' = T.k_{\lceil m/2 \rceil}$$

- m gerade, z.B.: m=4

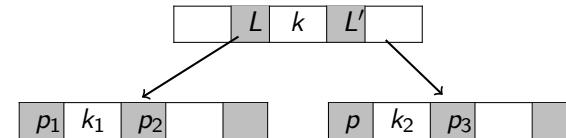


- m ungerade, z.B.: m=5

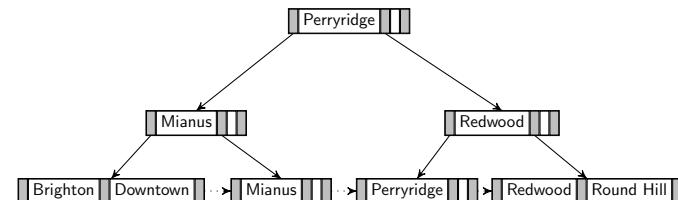


## Innere Knoten teilen/2

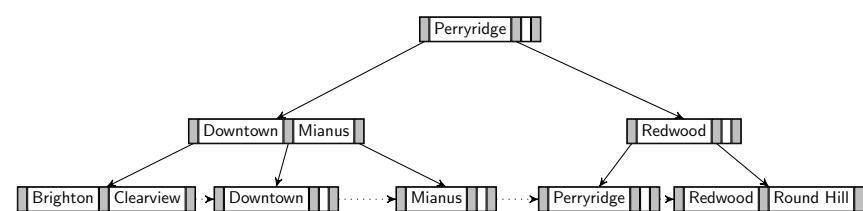
3. ( $k', L'$ ) in Elternknoten von L einfügen

Beispiel: Einfügen in B<sup>+</sup>-Baum/1

- B<sup>+</sup>-Baum vor Einfügen von Clearview

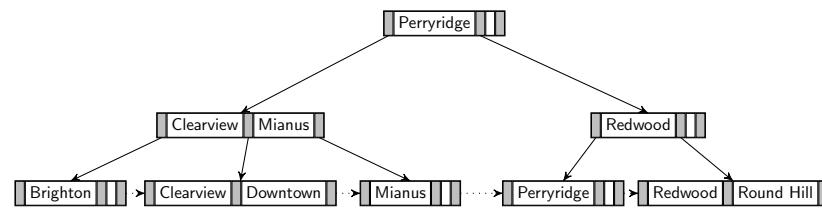


- B<sup>+</sup>-Baum nach Einfügen von Clearview

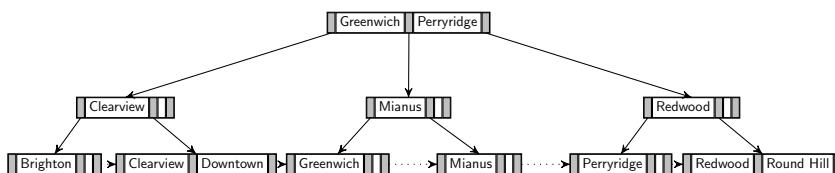


Beispiel: Einfügen in B<sup>+</sup>-Baum/2

- B<sup>+</sup>-Baum vor Einfügen von Greenwich



- B<sup>+</sup>-Baum nach Einfügen von Greenwich

Löschen von B<sup>+</sup>-Baum/2

- Vereinigung:

- Vereinigung zweier Knoten propagiert im Baum nach oben bis ein Knoten mit mehr als  $\lceil m/2 \rceil$  Kindern gefunden wird
- falls die Wurzel nach dem Löschen nur mehr ein Kind hat, wird sie gelöscht und der Kind-Knoten wird zur neuen Wurzel

Löschen von B<sup>+</sup>-Baum/1

Datensatz mit Suchschlüssel  $k$  löschen:

- finde Blattknoten mit Suchschlüssel  $k$
- lösche  $k$  von Knoten
- falls** Knoten durch Löschen von  $k$  zu wenige Einträge hat:
  - Einträge im Knoten und einem Geschwisterknoten passen in 1 Knoten **dann**:
    - vereinige die beiden Knoten in einen einzigen Knoten (den linken, falls er existiert; ansonsten den rechten) und lösche den anderen Knoten
    - lösche den Eintrag im Elternknoten der zwischen den beiden Knoten ist und wende Löschen rekursiv an
  - Einträge im Knoten und einem Geschwisterknoten passen *nicht* in 1 Knoten **dann**:
    - verteile die Einträge zwischen den beiden Knoten sodass beide die minimale Anzahl von Einträgen haben
    - aktualisiere den entsprechenden Suchschlüssel im Eltern-Knoten

Algorithmus: Löschen im B<sup>+</sup>-BaumAlgorithm 3: B+TreeDelete( $L, k, p$ )

```

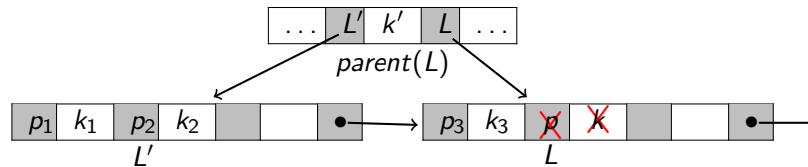
delete( $k, p$ ) from  $L$ 
if  $L$  is root and has only one remaining child then
  make the child the new root and delete  $L$ 
else if  $L$  has too few values/pointers then
   $L' \leftarrow$  previous sibling of  $L$  [next, if there is no previous];
   $k' \leftarrow$  value between  $L$  and  $L'$  in parent( $L$ );
  if entries in  $L$  and  $L'$  can fit in a single node then
    if  $L$  is a predecessor of  $L'$  then swap  $L$  with  $L'$ ; // vereinigen
    if  $L$  is not a leaf then  $L' \leftarrow L' \cup k'$  and all  $(k_i, p_i)$  from  $L$ ;
    else  $L' \leftarrow L' \cup$  all  $(k_i, p_i)$  from  $L$ ;
    B+TreeDelete(parent( $L$ ),  $k', L$ );
  else
    if  $L'$  is a predecessor of  $L$  then
      if  $L$  is a nonleaf node then
        remove the last  $(k, p)$  of  $L'$ ;
        insert the former last  $p$  of  $L'$  and  $k'$  as the first pointer and value in  $L$ ;
      else move the last  $(p, k)$  of  $L'$  as the first pointer and value to  $L$ ;
      replace  $k'$  in parent( $L$ ) by the former last  $k$  of  $L'$ ;
    else symmetric to the then case (switch first  $\leftrightarrow$  last,...);
  
```

## Löschen aus Blatt/1

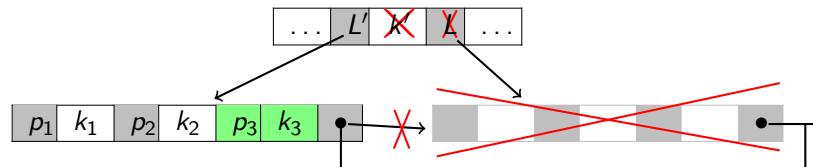
 $(k, p)$  wird aus  $L$  gelöscht:

1. Vereinigen (
- $m = 4$
- )

Vorher:



Nachher:

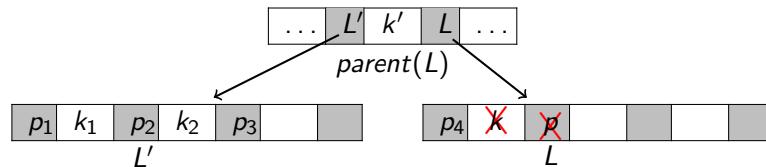


## Löschen aus innerem Knoten/1

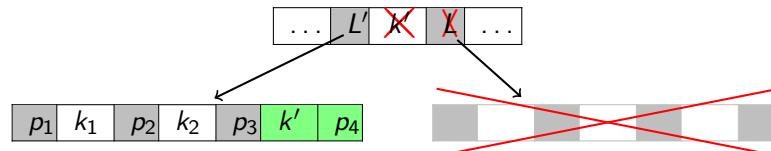
 $(k, p)$  wird aus  $L$  gelöscht:

1. Vereinigen (
- $m = 4$
- )

Vorher:



Nachher:

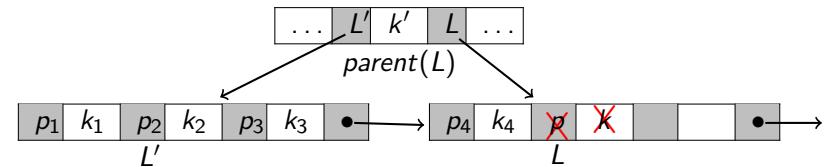


## Löschen aus Blatt/2

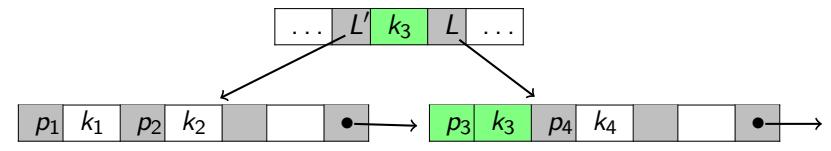
 $(k, p)$  wird aus  $L$  gelöscht:

2. Verteilen (
- $m = 4$
- )

Vorher:



Nachher:

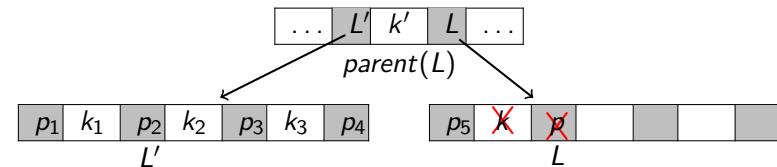


## Löschen aus innerem Knoten/2

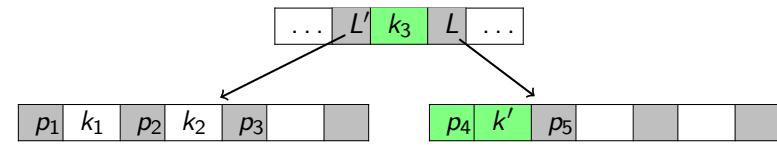
 $(k, p)$  wird aus  $L$  gelöscht:

2. Verteilen (
- $m = 4$
- )

Vorher:

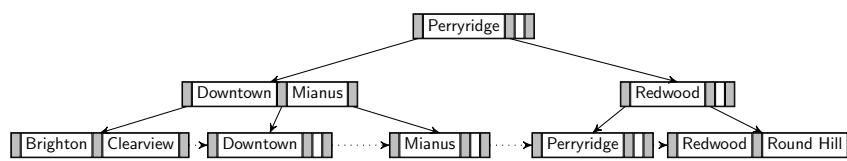


Nachher:

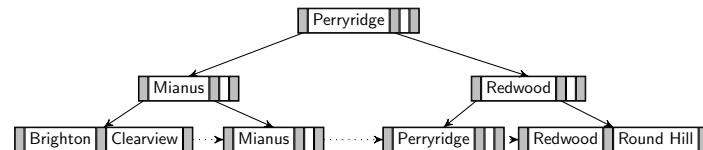


Beispiel: Löschen von B<sup>+</sup>-Baum/1

- Vor Löschen von *Downtown*:



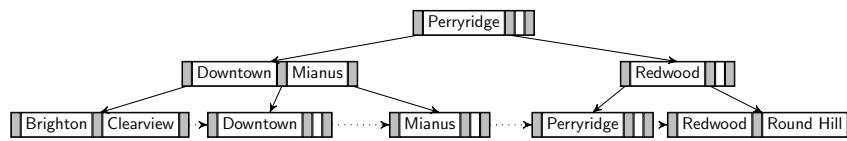
- Nach Löschen von *Downtown*:



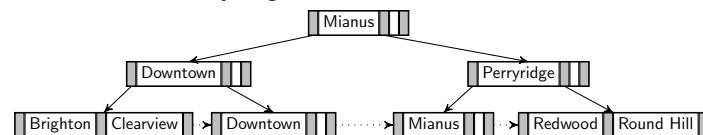
- Nach Löschen des Blattes mit *Downtown* hat der Elternknoten noch genug Pointer.
- Somit propagiert Löschen nicht weiter nach oben.

Beispiel: Löschen von B<sup>+</sup>-Baum/3

- Vor Löschen von *Perryridge*:



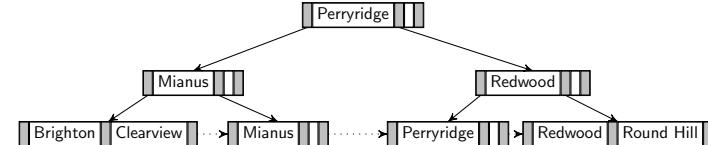
- Nach Löschen von *Perryridge*:



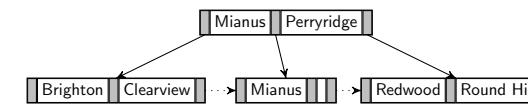
- Elternknoten von Blatt mit *Perryridge* hat durch Löschen zu wenig Einträge und erhält einen Pointer vom linken Nachbarn (Verteilung von Einträgen).
- Schlüssel im Elternknoten des Elternknotens (Wurzel in diesem Fall) ändert sich ebenfalls.

Beispiel: Löschen von B<sup>+</sup>-Baum/2

- Vor Löschen von *Perryridge*:



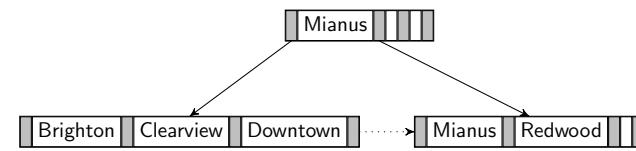
- Nach Löschen von *Perryridge*:



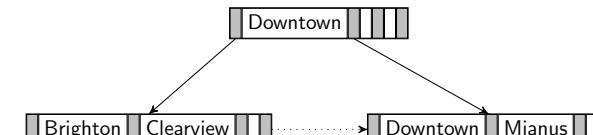
- Blatt mit *Perryridge* hat durch Löschen zu wenig Einträge und wird mit dem (rechten) Nachbarknoten vereinigt.
- Dadurch hat der Elternknoten zu wenig Pointer und wird mit seinem (linken) Nachbarknoten vereinigt (und ein Eintrag wird vom gemeinsamen Elternknoten gelöscht).
- Die Wurzel hat jetzt nur noch 1 Kind und wird gelöscht.

Beispiel: Löschen von B<sup>+</sup>-Baum/4

- Vor Löschen von *Redwood*:



- Nach Löschen von *Redwood*:



- Knoten von Blatt mit *Redwood* hat durch Löschen zu wenig Einträge und erhält einen Eintrag vom linken Nachbarn (Verteilung von Einträgen).
- Schlüssel im Elternknoten (Wurzel in diesem Fall) ändert sich ebenfalls.

## Zusammenfassung B<sup>+</sup>-Baum

- Knoten mit Pointern verknüpft:
  - logisch nahe Knoten müssen nicht physisch nahe gespeichert sein
  - erlaubt mehr Flexibilität
  - erhöht die Anzahl der nicht-sequentiellen Zugriffe
- B<sup>+</sup>-Bäume sind flach:
  - maximale Tiefe  $\lceil \log_{\lceil m/2 \rceil}(L) \rceil$  für  $L$  Blattknoten
  - $m$  ist groß in der Praxis (z.B.  $m = 200$ )
- Suchschlüssel als "Wegweiser":
  - einige Suchschlüssel kommen als Wegweiser in einem oder mehreren inneren Knoten vor
  - zu einem Wegweiser gibt es nicht immer einen Suchschlüssel in einem Blattknoten (z.B. weil der entsprechende Datensatz gelöscht wurde)
- Einfügen und Löschen sind effizient:
  - nur  $O(\log(K))$  viele Knoten müssen geändert werden
  - Index degeneriert nicht, d.h. Index muss nie von Grund auf rekonstruiert werden

## Inhalt

### 1 Indexstrukturen für Dateien

- Grundlagen
- B<sup>+</sup>-Baum
- Statisches Hashing
- Dynamisches Hashing
- Mehrschlüssel Indices
- Indizes in SQL

## Statisches Hashing

- Nachteile von ISAM und B<sup>+</sup>-Baum Indices:
  - B<sup>+</sup>-Baum: Suche muss Indexstruktur durchlaufen
  - ISAM: binäre Suche in großen Dateien
  - das erfordert zusätzliche Zugriffe auf Plattenblöcke
- Hashing:
  - erlaubt es auf Daten direkt und ohne Indexstrukturen zuzugreifen
  - kann auch zum Bauen eines Index verwendet werden

## Hash Datei Organisation

- Statisches Hashing ist eine Form der Dateiorganisation:
  - Datensätze werden in Buckets gespeichert
  - Zugriff erfolgt über eine Hashfunktion
  - Eigenschaften: konstante Zugriffszeit, kein Index erforderlich
- Bucket: Speichereinheit die ein oder mehrere Datensätze enthält
  - ein Block oder mehrere benachbarte Blocks auf der Platte
  - alle Datensätze mit bestimmtem Suchschlüssel sind im selben Bucket
  - Datensätze im Bucket können verschiedene Suchschlüssel haben
- Hash Funktion  $h$ : bildet Menge der Suchschlüssel  $K$  auf Menge der Bucket Adressen  $B$  ab
  - wird in konstanter Zeit (in der Anzahl der Datensätze) berechnet
  - mehrere Suchschlüssel können auf dasselbe Bucket abbilden
- Suchen eines Datensatzes mit Suchschlüssel:
  - verwende Hash Funktion um Bucket Adresse aufgrund des Suchschlüssels zu bestimmten
  - durchsuche Bucket nach Datensätzen mit Suchschlüssel

## Beispiel: Hash Datei Organisation

- Beispiel: Organisation der Konto-Relation als Hash Datei mit Filialname als Suchschlüssel.
- 10 Buckets
- Numerischer Code des  $i$ -ten Zeichens im 26-Buchstaben-Alphabet wird als  $i$  angenommen, z.B.,  $\text{code}(B)=2$ .
- Hash Funktion  $h$ 
  - Summe der Codes aller Zeichen modulo 10:
  - $h(\text{Perryridge}) = 125 \bmod 10 = 5$
  - $h(\text{Round Hill}) = 113 \bmod 10 = 3$  ( $\text{code}(' ')=0$ )
  - $h(\text{Brighton}) = 93 \bmod 10 = 3$

bucket 0	bucket 5
	A-102 Perryridge 400
	A-201 Perryridge 900
	A-210 Perryridge 700
bucket 1	bucket 6
bucket 2	bucket 7
	A-215 Mianus 700
bucket 3	bucket 8
A-217 Brighton 750	A-105 Downtown 500
A-305 Round Hill 350	A-110 Downtown 600
bucket 4	bucket 9
A-222 Redwood 700	

## Hash Funktionen/1

- Die **Worst Case Hash Funktion** bildet alle Suchschlüssel auf das gleiche Bucket ab.
  - Zugriffszeit wird linear in der Anzahl der Suchschlüssel.
- Die **Ideale Hash Funktion** hat folgende Eigenschaften:
  - Die Verteilung ist **uniform** (gleichverteilt), d.h. jedes Bucket ist der gleichen Anzahl von Suchschlüsseln aus der Menge aller Suchschlüssel zugewiesen.
  - Die Verteilung ist **random** (zufällig), d.h. im Mittel erhält jedes Bucket gleich viele Suchschlüssel unabhängig von der Verteilung der Suchschlüssel.

## Hash Funktionen/2

- Beispiel: 26 Buckets und eine Hash Funktion welche Filialnamen die mit dem  $i$ -ten Buchstaben beginnen dem Bucket  $i$  zuordnet.
  - keine Gleichverteilung, da es für bestimmte Anfangsbuchstaben erwartungsgemäß mehr Suchschlüssel gibt, z.B. erwarten wir mehr Filialen die mit B beginnen als mit Q.
- Beispiel: Hash Funktion die Kontostand nach gleich breiten Intervallen aufteilt:  $1 - 10000 \rightarrow 0, 10001 - 20000 \rightarrow 1$ , usw.
  - uniform, da es für jedes Bucket gleich viele mögliche Werte von Kontostand gibt
  - nicht random, da Kontostände in bestimmten Intervallen häufiger sind, aber jedem Intervall 1 Bucket zugeordnet ist
- Typische Hash Funktion:** Berechnung auf interner Binärdarstellung des Suchschlüssels, z.B. für String  $s$  mit  $n$  Zeichen,  $b$  buckets:
  - $(s[0] + s[1] + \dots + s[n-1]) \bmod b$ , oder
  - $(31^{n-1}s[0] + 31^{n-2}s[1] + \dots + s[n-1]) \bmod b$

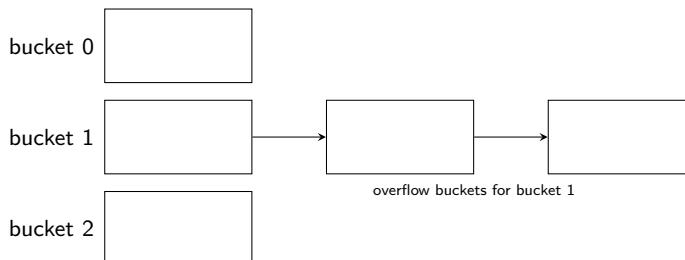
## Bucket Overflow/1

- Bucket Overflow:** Wenn in einem Bucket nicht genug Platz für alle zugehörigen Datensätze ist, entsteht ein Bucket overflow. Das kann aus zwei Gründen geschehen:
  - zu wenig Buckets
  - Skew: ungleichmäßige Verteilung der Hashwerte
- Zu wenig Buckets:** die Anzahl  $n_B$  der Buckets muss größer gewählt werden als die Anzahl der Datensätze  $n$  geteilt durch die Anzahl der Datensätze pro Bucket  $f$ :  $n_B > n/f$
- Skew:** Ein Bucket ist überfüllt obwohl andere Buckets noch Platz haben. Zwei Gründe:
  - viele Datensätze haben gleichen Suchschlüssel (ungleichmäßige Verteilung der Suchschlüssel)
  - Hash Funktion erzeugt ungleichmäßige Verteilung
- Obwohl die Wahrscheinlichkeit für Overflows reduziert werden kann, können **Overflows nicht gänzlich vermieden** werden.
  - Overflows müssen behandelt werden
  - Behandlung durch Overflow Chaining

## Bucket Overflow/2

### Overflow Chaining (closed addressing)

- falls ein Datensatz in Bucket  $b$  eingefügt wird und  $b$  schon voll ist, wird ein Overflow Bucket  $b'$  erzeugt, in das der Datensatz gespeichert wird
- die Overflow Buckets für Bucket  $b$  werden in einer Liste verkettet
- für einen Suchschlüssel in Bucket  $b$  müssen auch alle Overflow Buckets von  $b$  durchsucht werden



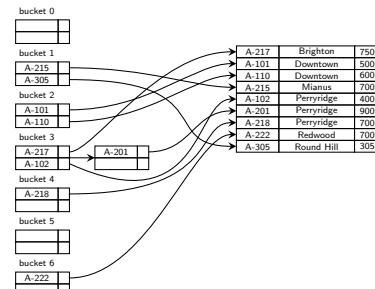
## Hash Index

### Hash Index: organisiert (Suchschlüssel,Pointer) Paare als Hash Datei

- Pointer zeigt auf Datensatz
- Suchschlüssel kann mehrfach vorkommen

### Beispiel: Index auf Konto-Relation.

- Hash Funktion  $h$ : Quersumme der Kontonummer modulo 7
- Beachte: Konto-Relation ist nach Filialnamen geordnet



### Hash Index ist immer Sekundärindex:

- ist deshalb immer "dense"
- Primär- bzw. Clustered Hash Index entspricht einer Hash Datei Organisation (zusätzliche Index-Ebene überflüssig)

## Bucket Overflow/3

### Open Addressing: Die Menge der Buckets ist fix und es gibt keine Overflow Buckets.

- überzählige Datensätze werden in ein anderes (bereits vorhandenes) Bucket gegeben, z.B. das nächste das noch Platz hat (linear probing)
- wird z.B. für Symboltabellen in Compilern verwendet, hat aber wenig Bedeutung in Datenbanken, da Löschen schwieriger ist

## Inhalt

### 1 Indexstrukturen für Dateien

- Grundlagen
- $B^+$ -Baum
- Statisches Hashing
- Dynamisches Hashing
- Mehrschlüssel Indices
- Indizes in SQL

## Probleme mit Statischem Hashing

- Richtige Anzahl von Buckets ist kritisch für Performance:
  - zu wenig Buckets: Overflows reduzieren Performance
  - zu viele Buckets: Speicherplatz wird verschwendet (leere oder unterbesetzte Buckets)
- Datenbank wächst oder schrumpft mit der Zeit:
  - großzügige Schätzung: Performance leidet zu Beginn
  - knappe Schätzung: Performance leidet später
- Reorganisation des Index als einziger Ausweg:
  - Index mit neuer Hash Funktion neu aufbauen
  - sehr teuer, während der Reorganisation darf niemand auf die Daten schreiben
- Alternative: Anzahl der Bucket dynamisch anpassen

## Erweiterbares Hashing

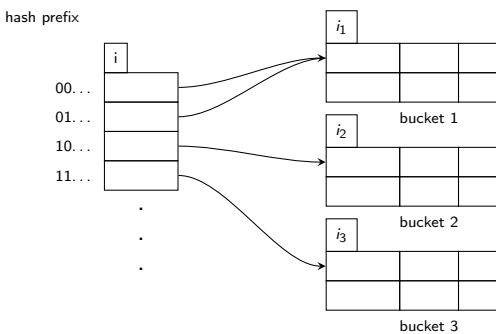
- Hash Funktion  $h$  berechnet Hash Wert für sehr viele Buckets:
  - eine  $b$ -Bit Integer Zahl
  - typisch  $b = 32$ , also 4 Milliarden (mögliche) Buckets
- Hash-Prefix:
  - nur die  $i$  höchstwertigen Bits (MSB) des Hash-Wertes werden verwendet
  - $0 \leq i \leq b$  ist die *globale Tiefe*  $i$
  - $i$  wächst oder schrumpft mit Datenmenge, anfangs  $i = 0$
- Verzeichnis: (directory, bucket address table)
  - Hauptspeicherstruktur: Array mit  $2^i$  Einträgen
  - Hash-Prefix indiziert einen Eintrag im Verzeichnis
  - jeder Eintrag verweist auf ein Bucket
  - mehrere aufeinanderfolgende Einträge im Verzeichnis können auf dasselbe Bucket zeigen

## Dynamisches Hashing

- Dynamisches Hashing (dynamic hashing): Hash Funktion wird dynamisch angepasst.
- Erweiterbares Hashing (extendible hashing): Eine Form des dynamischen Hashing.

## Erweiterbares Hashing

- Buckets:
  - Anzahl der Buckets  $\leq 2^i$
  - jedes Bucket  $j$  hat eine *lokale Tiefe*  $i_j$
  - falls mehrere Verzeichnis-Pointer auf dasselbe Bucket  $j$  zeigen, haben die entsprechenden Hash Werte dasselbe  $i_j$  Prefix.
- Beispiel:  $i = 2$ ,  $i_1 = 1$ ,  $i_2 = i_3 = 2$ ,



## Erweiterbares Hashing: Suche

- **Suche:** finde Bucket für Suchschlüssel  $K$ 
  1. berechne Hash Wert  $h(K) = X$
  2. verwende die  $i$  höchstwertigen Bits (Hash Prefix) von  $X$  als Adresse ins Verzeichnis
  3. folge dem Pointer zum entsprechenden Bucket

## Erweiterbares Hashing: Bucket teilen

- **Bucket  $j$  teilen** um Suchschlüssel  $K$  einzufügen
  - If  $i > i_j$  (mehrere Pointer zu Bucket  $j$ ) then
    - lege neues Bucket  $z$  an und setze  $i_z$  und  $i_j$  auf das alte  $i_j + 1$
    - aktualisiere die Pointer die auf  $j$  zeigen (die Hälfte zeigt nun auf  $z$ )
    - lösche alle Datensätze von Bucket  $j$  und füge sie neu ein (sie verteilen sich auf Buckets  $j$  und  $z$ )
    - versuche  $K$  erneut einzufügen
  - Else if  $i = i_j$  (nur 1 Pointer zu Bucket  $j$ ) then
    - erhöhe  $i$  und verdopple die Größe des Verzeichnisses
    - ersetze jeden alten Eintrag durch zwei neue Einträge die auf dasselbe Bucket zeigen
    - versuche  $K$  erneut einzufügen
- **Overflow Buckets** müssen nur erzeugt werden, wenn das Bucket voll ist und die Hashwerte aller Suchschlüssel im Bucket identisch sind (d.h., teilen würde nichts nützen)

## Erweiterbares Hashing: Einfügen

- **Einfügen:** füge Datensatz mit Suchschlüssel  $K$  ein
  1. verwende Suche um richtiges Bucket  $j$  zu finden
  2. If genug freier Platz in Bucket  $j$  then
    - füge Datensatz in Bucket  $j$  ein
  3. else
    - teile Bucket und versuche erneut

## Integrierte Übung 2.2

Betrachten Sie die folgende Hashfunktion:

Schlüssel	Hashwert
Brighton	0010
Downtown	1010
Mianus	1100
Perryridge	1111
Redwood	0011

Nehmen Sie Buckets der Größe 2 an und erweiterbares Hashing mit einem anfangs leeren Verzeichnis. Zeigen Sie die Hashtabelle nach folgenden Operationen:

- füge 1 Brighton und 2 Downtown Datensätze ein
- füge 1 Mianus Datensatz ein
- füge 1 Redwood Datensatz ein
- füge 3 Perryridge Datensätze ein

## Erweiterbares Hashing: Löschen

- Löschen eines Suchschlüssels  $K$ 
  1. suche Bucket  $j$  für Suchschlüssel  $K$
  2. entferne alle Datensätze mit Suchschlüssel  $K$
  3. Bucket  $j$  kann mit Nachbarbucket(s) verschmelzen falls
    - alle Suchschlüssel in einem Bucket Platz finden
    - die Buckets dieselbe lokale Tiefe  $i_j$  haben
    - die  $i_j - 1$  Prefixe der entsprechenden Hash-Werte identisch ist
  4. Verzeichnis kann verkleinert werden, wenn  $i_j < i$  für alle Buckets  $j$

## Erweiterbares Hashing: Pro und Kontra

- Vorteile von erweiterbarem Hashing
  - bleibt effizient auch wenn Datei wächst
  - Overhead für Verzeichnis ist normalerweise klein im Vergleich zu den Einsparungen an Buckets
  - keine Buckets für zukünftiges Wachstum müssen reserviert werden
- Nachteile von erweiterbarem Hashing
  - zusätzliche Ebene der Indirektion – macht sich bemerkbar, wenn Verzeichnis zu groß für den Hauptspeicher wird
  - Verzeichnis vergrößern oder verkleinern ist relativ teuer

## Integrierte Übung 2.3

Betrachten Sie die folgende Hashfunktion:

Schlüssel	Hashwert
Brighton	0010
Downtown	1010
Mianus	1100
Perryridge	1111
Redwood	0011

Gehen Sie vom Ergebnis der vorigen Übung aus und führen Sie folgende Operationen durch:

- 1 Brighton und 1 Downtown löschen
- 1 Redwood löschen
- 2 Perryridge löschen

## $B^+$ -Baum vs. Hash Index

- Hash Index degeneriert wenn es sehr viele identische (Hashwerte für) Suchschlüssel gibt – Overflows!
- Im Average Case für Punktanfragen in  $n$  Datensätzen:
  - Hash index:  $O(1)$  (sehr gut)
  - $B^+$ -Baum:  $O(\log n)$
- Worst Case für Punktanfragen in  $n$  Datensätzen:
  - Hash index:  $O(n)$  (sehr schlecht)
  - $B^+$ -Baum:  $O(\log n)$
- Anfragetypen:
  - Punktanfragen: Hash und  $B^+$ -Baum
  - Mehrpunktanfragen: Hash und  $B^+$ -Baum
  - Bereichsanfragen: Hash Index nicht brauchbar

## Inhalt

## 1 Indexstrukturen für Dateien

- Grundlagen
- $B^+$ -Baum
- Statisches Hashing
- Dynamisches Hashing
- Mehrschlüssel Indices
- Indizes in SQL

## Zugriffe über mehrere Suchschlüssel/1

- Wie kann Index verwendet werden, um folgende Anfrage zu beantworten?

```
select AccNr
from account
where BranchName = "Perryridge" and Balance = 1000
```

- Strategien mit mehreren Indices (jeweils 1 Suchschlüssel):

- $BranchName = "Perryridge"$  mit Index auf  $BranchName$  auswerten; auf Ergebnis-Datensätzen  $Balance = 1000$  testen.
- $Balance = 1000$  mit Index auf  $Balance$  auswerten; auf Ergebnis-Datensätzen  $BranchName = "Perryridge"$  testen.
- Verwende  $BranchName$  Index um Pointer zu Datensätzen mit  $BranchName = "Perryridge"$  zu erhalten; verwende  $Balance$  Index für Pointer zu Datensätzen mit  $Balance = 1000$ ; berechne die Schnittmenge der beiden Pointer-Mengen.

## Zugriffe über mehrere Suchschlüssel/2

- Nur die dritte Strategie nützt das Vorhandensein mehrerer Indices.
- Auch diese Strategie kann eine schlechte Wahl sein:
  - es gibt viele Konten in der "Perryridge" Filiale
  - es gibt viele Konten mit Kontostand 1000
  - es gibt nur wenige Konten die beide Bedingungen erfüllen
- Effizientere Indexstrukturen müssen verwendet werden:
  - (traditionelle) Indices auf kombinierten Schlüsseln
  - spezielle mehrdimensionale Indexstrukturen, z.B., Grid Files, Quad-Trees, Bitmap Indices.

## Zugriffe über mehrere Suchschlüssel/3

- Annahme: Geordneter Index mit kombiniertem Suchschlüssel ( $BranchName, Balance$ )
- Kombinierte Suchschlüssel haben eine **Ordnung** ( $BranchName$  ist das erstes Attribut,  $Balance$  ist das zweite Attribut)
  - Folgende Bedingung wird effizient behandelt (alle Attribute):
 

```
where BranchName = "Perryridge" and Balance = 1000
```
  - Folgende Bedingung wird effizient behandelt (Prefix):
 

```
where BranchName = "Perryridge"
```
  - Folgende Bedingung ist ineffizient (kein Prefix der Attribute):
 

```
where Balance = 1000
```

## Inhalt

## 1 Indexstrukturen für Dateien

- Grundlagen
- $B^+$ -Baum
- Statisches Hashing
- Dynamisches Hashing
- Mehrschlüssel Indices
- Indizes in SQL

## Beispiel: Indices in PostgreSQL

- CREATE [UNIQUE] INDEX** name **ON** table\_name  
"(" col [DESC] { "," col [DESC] } ")" [...]
- Beispiele:**
  - CREATE INDEX** MajIdx **ON** Enroll (Major);
  - CREATE INDEX** MajIdx **ON** Enroll **USING HASH** (Major);
  - CREATE INDEX** MajMinIdx **ON** Enroll (Major, Minor);

## Index Definition in SQL

- SQL-92 definiert keine Syntax für Indices da diese nicht Teil des logischen Datenmodells sind.
- Jedoch alle Datenbanksystem stellen Indices zur Verfügung.
- Index erzeugen:**  
**create index** <IdxName> **on** <RelName> (<AttrList>)  
z.B. **create index** BrNalIdx **on** branch (branch-name)
- Create unique index** erzwingt eindeutige Suchschlüssel und definiert indirekt ein Schlüsselattribut.
- Primärschlüssel (**primary key**) und Kandidatenschlüssel (**unique**) werden in SQL bei der Tabellendefinition spezifiziert.
- Index löschen:**  
**drop index** <index-name>  
z.B. **drop index** BrNalIdx

## Indexes in Oracle

- $B^+$ -Baum Index in Oracle:**  
**CREATE [UNIQUE] INDEX** name **ON** table\_name  
"(" col [DESC] { "," col [DESC] } ")" **[pctfree n]** [...]
- Anmerkungen:**
  - pct\_free gibt an, wieviel Prozent der Knoten anfangs frei sein sollen.
  - UNIQUE sollte nicht verwendet werden, da es ein logisches Konzept ist.
  - Oracle erstellt einen  $B^+$ -Baum Index für jede **unique** oder **primary key** definition bei der Erstellung der Tabelle.
- Beispiele:**

```
CREATE TABLE BOOK (
    ISBN INTEGER, Author VARCHAR2 (30), ...);
CREATE INDEX book_auth ON book(Author);
```
- Hash-partitionierter Index in Oracle:**  
**CREATE INDEX** CustLNameIx **ON** customers (LName) **GLOBAL PARTITION BY HASH** (LName) **PARTITIONS** 4;

## Anmerkungen zu Indices in Datenbanksystemen

- Indices werden [automatisch nachgeführt](#) wenn Tupel eingefügt, geändert oder gelöscht werden.
- Indices [verlangsamen](#) deshalb Änderungsoperationen.
- Einen [Index zu erzeugen](#) kann lange dauern.
- Bulk Load:** Es ist (viel) effizienter, zuerst die Daten in die Tabelle einzufügen und nachher alle Indices zu erstellen als umgekehrt.

## Zusammenfassung

- [Index Typen:](#)
  - Primary, Clustering und Sekundär
  - Dense oder Sparse
- [B<sup>+</sup>-Baum:](#)
  - universelle Indexstruktur, auch für Bereichsanfragen
  - Garantien zu Tiefe, Füllgrad und Effizienz
  - Einfügen und Löschen
- [Hash Index:](#)
  - statisches und erweiterbares Hashing
  - kein Index für Primärschlüssel nötig
  - gut für Prädikate mit “=”
- [Mehrschlüssel Indices:](#) schwieriger, da es keine totale Ordnung in mehreren Dimensionen gibt
- [Indices in SQL](#)