

# Datenbanken Vertiefung

## Anfrageoptimierung

Nikolaus Augsten

nikolaus.augsten@sbg.ac.at

FB Computerwissenschaften  
Universität Salzburg

Wintersemester 2013/14

## Inhalt

- 1 Überblick
- 2 Äquivalenzregeln
- 3 Äquivalenzumformungen
- 4 Kostenbasierte Optimierung

## Literatur und Quellen

Lektüre zum Thema "Anfrageoptimierung":

- Kapitel 8 (außer 8.2) aus Kemper und Eickler: Datenbanksysteme: Eine Einführung. 9. Auflage, Oldenbourg Verlag, 2013.

**In Fachbereichsbibliothek in Papierform verfügbar.**

### Literaturquellen

- Silberschatz, Korth, and Sudarshan: Database System Concepts, McGraw Hill, 2006.
- Elmasri and Navathe: Fundamentals of Database Systems. Fourth Edition, Pearson Addison Wesley, 2004.

Danksagung Die Vorlage zu diesen Folien wurde entwickelt von:

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

## Inhalt

- 1 Überblick
- 2 Äquivalenzregeln
- 3 Äquivalenzumformungen
- 4 Kostenbasierte Optimierung

## Schritte der Anfragebearbeitung

## 1. Parser

- input: SQL Anfrage
- output: Relationaler Algebra Ausdruck

## 2. Optimierer

- input: Relationaler Algebra Ausdruck
- output: Auswertungsplan

## 3. Execution Engine

- input: Auswertungsplan
- output: Ergebnis der SQL Anfrage

## 1. Parser

Parser:

- **Input:** SQL Anfrage vom Benutzer  
Beispiel: `SELECT balanace  
FROM account  
WHERE balance < 2500`
- **Output:** Relationaler Algebra Ausdruck  
Beispiel:  $\sigma_{balance < 2500}(\Pi_{balance}(account))$
- Algebra Ausdruck **nicht eindeutig!**  
Beispiel: folgende Ausdrück sind äquivalent
  - $\sigma_{balance < 2500}(\Pi_{balance}(account))$
  - $\Pi_{balance}(\sigma_{balance < 2500}(account))$
- **Kanonische Übersetzung** führt zu algebraischer Normalform (eindeutig)

## Parser: Kanonische Übersetzung

- SQL Anfrage: `SELECT  $A_1, A_2, \dots, A_n$   
FROM  $R_1, R_2, \dots, R_k$   
WHERE  $\theta$`

- Algebraische Normalform:

$$\pi_{A_1, A_2, \dots, A_n}(\sigma_{\theta}(R_1 \times R_2 \times \dots \times R_k))$$

- Prädikat  $\theta$  kann sowohl Selektions- als auch Join-Bedingungen enthalten

## 2. Optimierer

Optimierer:

- **Input:** Relationaler Algebra Ausdruck  
Beispiel:  $\Pi_{balance}(\sigma_{balance < 2500}(account))$
- **Output:** Auswertungsplan  
Beispiel:
 
$$\begin{array}{c} \Pi_{balance} \\ | \\ \sigma_{balance < 2500} \\ \text{use index 1} \\ | \\ account \end{array}$$
- Auswertungsplan wird in drei Schritten konstruiert:
  - A) **Logische Optimierung:** Äquivalenzumformungen
  - B) **Physische Optimierung:** Annotation der relationalen Algebra Operatoren mit physischen Operatoren
  - C) **Kostenabschätzung** für verschiedene Auswertungspläne

## A) Logische Optimierung: Äquivalenzumformungen

- **Äquivalenz** relationaler Algebra Ausdrücke:
  - **äquivalent**: zwei Ausdrücke erzeugen dieselbe Menge von Tupeln auf allen legalen Datenbankinstanzen
  - **legal**: Datenbankinstanz erfüllt alle Integritätsbedingungen des Schemas
- **Äquivalenzregeln**:
  - **umformen** eines relationalen Ausdrucks **in einen äquivalenten Ausdruck**
  - analog zur Algebra auf reelle Zahlen, z.B.:  
 $a + b = b + a$ ,  $a(b + c) = ab + ac$ , etc.
- **Warum** äquivalente Ausdrücke erzeugen?
  - äquivalente Ausdrücke erzeugen **dasselbe Ergebnis**
  - jedoch die **Ausführungszeit unterscheidet sich signifikant**

## Äquivalenzregeln – Beispiele

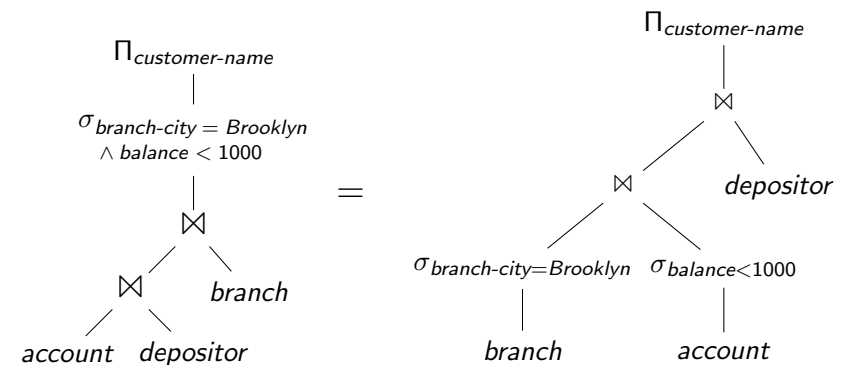
- **Selektionen** sind untereinander **vertauschbar**:  
 $\sigma_{\theta_1}(\sigma_{\theta_2}(E)) = \sigma_{\theta_2}(\sigma_{\theta_1}(E))$ 
  - $E$  relationaler Ausdruck (im einfachsten Fall eine Relation)
  - $\theta_1$  und  $\theta_2$  sind Prädikate auf die Attribute von  $E$  z.B.  $E.salary < 2500$
  - $\sigma_{\theta}$  ergibt alle Tupel welche die Bedingung  $\theta$  erfüllen
- **Natürlicher Join ist assoziativ**:  $(E_1 \bowtie E_2) \bowtie E_3 = E_1 \bowtie (E_2 \bowtie E_3)$ 
  - das Join Prädikat im natürlichen Join ist "Gleichheit" auf allen Attributen zweier Ausdrücke mit gleichem Namen  
Beispiel:  $R[A, B], S[B, C]$ , Prädikat ist  $R.B = S.B$
  - falls zwei Ausdrücke keine gemeinsamen Attribute haben, wird der natürliche Join zum Kreuzprodukt  
Beispiel:  $R[A, B], S[C, D]$ ,  $R \bowtie S = R \times S$

## Äquivalenzregeln – Beispiel Anfrage

- **Schema**:  
branch(branch-name, branch-city, assets)  
account(account-number, branch-name, balance)  
depositor(customer-name, account-number)
- **Anfrage**:  
SELECT customer-name  
FROM branch, account, depositor  
WHERE branch-city='Brooklyn' AND  
balance < 1000 AND  
branch.branch-name = account.branch-name AND  
account.account-number = depositor.account-number

## Äquivalenzregeln – Beispiel Anfrage

- **Äquivalente relationale Algebra Ausdrücke** (als Operatorbäume dargestellt):

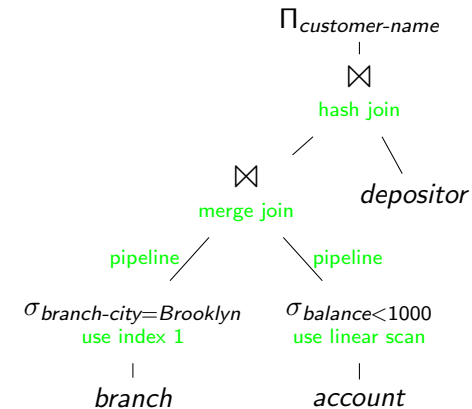


## B) Annotation der relationalen Algebra Ausdrücke

- Ein Algebraausdruck ist noch kein **Ausführungsplan**.
- **Zusätzliche Entscheidungen** müssen getroffen werden:
  - welche Indices sollen verwendet werden, z.B. für Selektion oder Join?
  - welche Algorithmen sollen verwendet werden, z.B. Nested-Loop oder Hash Join?
  - sollen Zwischenergebnisse materialisiert oder "pipelined" werden?
  - usw.
- Für jeden Algebra Ausdruck können **mehrere Ausführungspläne** erzeugt werden.
- Alle Pläne ergeben dieselbe Relation, **unterscheiden sich jedoch in der Ausführungszeit**.

## Beispiel: Ausführungsplan

- Ausführungsplan für die vorige Beispielanfrage:
  - *account* ist physisch sortiert nach *branch-name*
  - index 1 ist ein  $B^+$ -Baum Index auf (*branch-city*, *branch-name*)



## C) Kostenabschätzung

- Welches ist der beste (=schnellste) Ausführungsplan?
- Schwieriges Problem:
  - Kosten für Ausführungsplan können nur abgeschätzt werden
  - es gibt eine sehr große Zahl von möglichen Ausführungsplänen

## Datenbankstatistik für Kostenabschätzung

- Katalog: Datenbanksystem pflegt Statistiken über Daten
- Beispiel Statistiken:
  - Anzahl der Tupel pro Relation
  - Anzahl der Blöcke pro Relation
  - Anzahl der unterschiedlichen Werte für ein Attribut
  - Histogramm der Attributwerte
- Statistik wird verwendet um Kosten von Operationen abzuschätzen, z.B.:
  - Kardinalität des Ergebnisses einer Selektion
  - Kosten für Nested-Loop vs. Hash-Join
  - Kosten für sequentielles Lesen der Tabelle vs. Zugriff mit Index
- Beachte: Statistik wird nicht nach jeder Änderung aktualisiert und ist deshalb möglicherweise nicht aktuell

### 3. Execution Engine

#### Die Execution Engine

- erhält den Ausführungsplan vom Optimierer
- führt den Plan aus, indem die entsprechenden Algorithmen aufgerufen werden
- liefert das Ergebnis an den Benutzer zurück

### Integrierte Übung

- Welche der folgenden Operatoren sind "blocking" bzw. "non-blocking"?
  - Selektion
  - Projektion
  - Sortierung
  - Gruppierung+Aggregation
  - Block Nested-loop Join
  - Index Nested-Loop Join
  - Hash Join
  - Merge Join, Sort-Merge Join

### Materialisierung und Pipelining

- **Materialisierung:**
  - Operator speichert gesamtes Zwischenergebnis (z.B. auf Platte)
  - nächster Operator liest Zwischenergebnis und verarbeitet es weiter
- **Pipelining:**
  - sobald ein Tupel erzeugt wird, wird es an den nächsten Operator weitergeleitet
  - kein Zwischenspeichern erforderlich
  - Benutzer sieht erste Ergebnisse, bevor gesamte Anfrage berechnet ist
- **Blocking vs. Non-Blocking:**
  - Blocking: Operator muss gesamten Input lesen, bevor erstes Output Tuple erzeugt werden kann
  - Non-Blocking: Operator liefert erstes Tuple zurück sobald ein kleiner Teil des Input gelesen ist

### Iteratoren

- **Demand-driven vs. Producer-driven Pipeline:**
  - Demand-driven: Operator erzeugt Tuple erst wenn von Eltern-Knoten angefordert; Auswertung beginnt bei Wurzelknoten
  - Producer-driven: Operatoren produzieren Tuple und speichern sie in einen Buffer; Eltern-Knoten bedient sich aus Buffer (Producer-Consumer Modell)
- **Demand-driven Pipelining:** relationale Operatoren werden oft als **Iteratoren** mit folgenden Funktionen implementiert:
  - open(): initialisiert den Operator  
z.B. Table Scan: Datei öffnen und Cursor auf ersten Datensatz setzen
  - next(): liefert nächstes Tuple  
z.B. Table Scan: Tuple an Cursorposition lesen und Cursor weitersetzen
  - close(): abschließen  
z.B. Table Scan: Datei schließen
- Im Iteratormodell fragt der Wurzelknoten seine Kinder so lange nach Tupeln, bis keine Tuple mehr geliefert werden.

## Inhalt

- 1 Überblick
- 2 Äquivalenzregeln
- 3 Äquivalenzumformungen
- 4 Kostenbasierte Optimierung

## Überblick

- nur eine Auswahl von Äquivalenzregeln (equivalence rules, ER) wird präsentiert
- die Auswahl ist nicht minimal, d.h., einige der Regeln können aus anderen hergeleitet werden
- Notation:
  - $E, E_1, E_2 \dots$  sind relationale Algebra Ausdrücke
  - $\theta, \theta_1, \theta_2 \dots$  sind Prädikate (z.B.  $A < B \wedge C = D$ )

## Definition von relationalen Algebra Ausdrücken

- Ein **elementarer Ausdruck** der relationalen Algebra ist
  - eine Relation in der Datenbank (z.B. Konten)
- **Zusammengesetzte Ausdrücke**: Falls  $E_1$  und  $E_2$  relationale Algebra Ausdrücke sind, dann lassen sich durch relationale Operatoren weitere Ausdrücke bilden, z.B.:
  - $E_1 \cup E_2$
  - $E_1 - E_2$
  - $E_1 \times E_2$
  - $\sigma_\theta(E_1)$ ,  $\theta$  ist ein Prädikat in  $E_1$
  - $\pi_A(E_1)$ ,  $A$  ist eine Liste von Attributen aus  $E_1$
- **Geschlossenheit der relationalen Algebra**: elementare und zusammengesetzte Ausdrücke können gleich behandelt werden

## Äquivalenzregeln/1

## Selektion und Projektion:

- **ER1** Konjunktive Selektionsprädikate können in mehrere Selektionen aufgebrochen werden:

$$\sigma_{\theta_1 \wedge \theta_2}(E) = \sigma_{\theta_1}(\sigma_{\theta_2}(E))$$

- **ER2** Selektionen sind untereinander vertauschbar:

$$\sigma_{\theta_1}(\sigma_{\theta_2}(E)) = \sigma_{\theta_2}(\sigma_{\theta_1}(E))$$

- **ER3** Geschachtelte Projektionen können eliminiert werden:

$$\pi_{A_1}(\pi_{A_2}(\dots(\pi_{A_n}(E))\dots)) = \pi_{A_1}(E)$$

( $A_i$  sind Listen von Attributen)

- **ER4** Selektion kann mit Kreuzprodukt und  $\theta$ -Join kombiniert werden:

$$(a) \sigma_\theta(E_1 \times E_2) = E_1 \bowtie_\theta E_2$$

$$(b) \sigma_{\theta_1}(E_1 \bowtie_{\theta_2} E_2) = E_1 \bowtie_{\theta_1 \wedge \theta_2} E_2$$

## Äquivalenzregeln/2

## Kommutativität und Assoziativität von Joins:

- ER5 Theta-Join und natürlicher Join sind **kommutativ**:

$$E_1 \bowtie_{\theta} E_2 = E_2 \bowtie_{\theta} E_1$$

$$E_1 \bowtie E_2 = E_2 \bowtie E_1$$

- ER6 Joins und Kreuzprodukte sind **assoziativ**:

- (a) Natürliche Joins sind assoziativ:

$$(E_1 \bowtie E_2) \bowtie E_3 = E_1 \bowtie (E_2 \bowtie E_3)$$

- (b) Theta-Joins sind assoziativ:

$$(E_1 \bowtie_{\theta_1} E_2) \bowtie_{\theta_2 \wedge \theta_3} E_3 = E_1 \bowtie_{\theta_1 \wedge \theta_3} (E_2 \bowtie_{\theta_2} E_3)$$

( $\theta_2$  enthält nur Attribute von  $E_2$  und  $E_3$ )

- (c) Jedes Prädikat  $\theta_i$  im Theta-Join kann leer sein, also sind auch Kreuzprodukte assoziativ.

## Äquivalenzregeln/3

- ER7 Selektion kann bedingt an Join vorbeigeschoben werden:

- (a)  $\theta_1$  enthält nur Attribute eines Ausdrucks ( $E_1$ ):

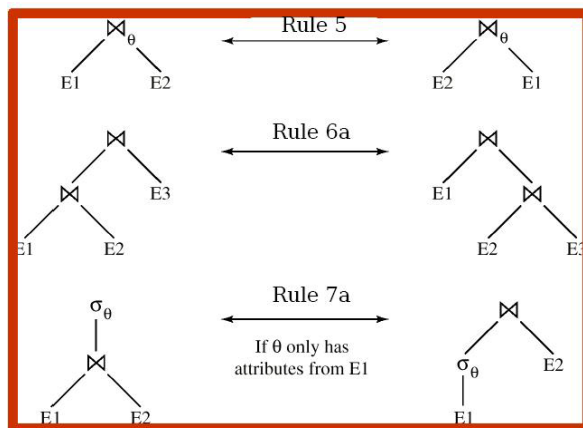
$$\sigma_{\theta_1}(E_1 \bowtie_{\theta} E_2) = \sigma_{\theta_1}(E_1) \bowtie_{\theta} E_2$$

- (b)  $\theta_1$  enthält nur Attribute von  $E_1$  und  $\theta_2$  enthält nur Attribute von  $E_2$ :

$$\sigma_{\theta_1 \wedge \theta_2}(E_1 \bowtie_{\theta} E_2) = \sigma_{\theta_1}(E_1) \bowtie_{\theta} \sigma_{\theta_2}(E_2)$$

## Beispiel: Äquivalenzregeln

- Darstellung einiger Äquivalenzregeln als Operatorbaum



## Äquivalenzregeln/4

- ER8 Projektion kann an Join und Selektion vorbeigeschoben werden:

- $A_1$  und  $A_2$  sind jeweils Attribute von  $E_1$  und  $E_2$ .

- (a) Join:  $\theta$  enthält nur Attribute aus  $A_1 \cup A_2$ :

$$\pi_{A_1 \cup A_2}(E_1 \bowtie_{\theta} E_2) = \pi_{A_1}(E_1) \bowtie_{\theta} \pi_{A_2}(E_2)$$

- (b) Join:  $\theta$  enthält Attribute die nicht in  $A_1 \cup A_2$  vorkommen:

- $A_3$  sind Attribute von  $E_1$  die in  $\theta$  vorkommen, aber nicht in  $A_1 \cup A_2$
- $A_4$  sind Attribute von  $E_2$  die in  $\theta$  vorkommen, aber nicht in  $A_1 \cup A_2$

$$\pi_{A_1 \cup A_2}(E_1 \bowtie_{\theta} E_2) = \pi_{A_1 \cup A_2}(\pi_{A_1 \cup A_3}(E_1) \bowtie_{\theta} \pi_{A_2 \cup A_4}(E_2))$$

- (c) Selektion:  $\theta$  enthält nur Attribute aus  $A_1$ :

$$\pi_{A_1}(\sigma_{\theta}(E_1)) = \sigma_{\theta}(\pi_{A_1}(E_1))$$

- (d) Selektion:  $\theta$  enthält Attribute  $A_3$  die nicht in  $A_1$  vorkommen:

$$\pi_{A_1}(\sigma_{\theta}(E_1)) = \pi_{A_1}(\sigma_{\theta}(\pi_{A_1 \cup A_3}(E_1)))$$

## Äquivalenzregeln/5

## Mengenoperationen:

- ER9 Vereinigung und Schnittmenge sind kommutativ:

$$E_1 \cup E_2 = E_2 \cup E_1$$

$$E_1 \cap E_2 = E_2 \cap E_1$$

- ER10 Vereinigung und Schnittmenge sind assoziativ.

$$(E_1 \cup E_2) \cup E_3 = E_1 \cup (E_2 \cup E_3)$$

$$(E_1 \cap E_2) \cap E_3 = E_1 \cap (E_2 \cap E_3)$$

## Integrierte Übung

Stellen Sie die folgenden relationalen Algebra Ausdrücke als Operatorbäume dar:

- $RA1 = \pi_A(R1 \bowtie \sigma_{X=Y}(R2 \bowtie \pi_{B,C}(R3 - R4) \bowtie R5))$
- $RA2 = \pi_A(R1) \cup \sigma_{X>5}(R2)$

## Äquivalenzregeln/6

- ER11 Selektion kann an  $\cup$ ,  $\cap$  und  $-$  vorbeigeschoben werden:

$$\sigma_\theta(E_1 - E_2) = \sigma_\theta(E_1) - \sigma_\theta(E_2)$$

$$\sigma_\theta(E_1 \cup E_2) = \sigma_\theta(E_1) \cup \sigma_\theta(E_2)$$

$$\sigma_\theta(E_1 \cap E_2) = \sigma_\theta(E_1) \cap \sigma_\theta(E_2)$$

Für  $\cap$  und  $-$  gilt außerdem:

$$\sigma_\theta(E_1 \cap E_2) = \sigma_\theta(E_1) \cap E_2$$

$$\sigma_\theta(E_1 - E_2) = \sigma_\theta(E_1) - E_2$$

- ER12 Projektion kann an Vereinigung vorbeigeschoben werden:

$$\pi_L(E_1 \cup E_2) = \pi_L(E_1) \cup \pi_L(E_2)$$

## Integrierte Übung

Folgende Äquivalenzregeln sind **falsch**. Zeigen Sie dies durch ein Gegenbeispiel:

1.  $\pi_A(R - S) = \pi_A(R) - \pi_A(S)$
2.  $R - S = S - R$
3.  $(R - S) - T = R - (S - T)$
4.  $\sigma_\theta(E_1 \cup E_2) = \sigma_\theta(E_1) \cup E_2$



## Inhalt

- 1 Überblick
- 2 Äquivalenzregeln
- 3 Äquivalenzumformungen
- 4 Kostenbasierte Optimierung

## Effiziente Aufzählungstechniken

- **Speicher sparen:** Ausdrücke teilen sich gemeinsame Teilausdrücke:
  - Wenn  $E_2$  aus  $E_1$  durch eine Äquivalenzumformung entsteht, bleiben die tieferliegenden Teilbäume gleich und brauchen nicht doppelt abgelegt zu werden.
- **Zeit sparen:** Aufgrund von Kostenabschätzungen werden einige Ausdrücke gar nie erzeugt.
  - Wenn für einen Teilausdruck  $E'$  ein äquivalenter Teilausdruck  $E''$  gefunden wird, der schneller ist, brauchen keine Ausdrücke die  $E'$  enthalten berücksichtigt werden.
- **Heuristik:** Wende Heuristiken an um viel versprechende Ausdrücke zu erzeugen:
  - Selektionen möglichst weit nach unten
  - Projektionen möglichst weit nach unten
  - Joins mit kleinem zu erwartenden Ergebnis zuerst berechnen

## Aufzählung Äquivalenter Ausdrücke

- **Optimierer** verwenden die Äquivalenzregeln um systematisch äquivalente Ausdrücke zu erzeugen.
- **Aufzählung** aller äquivalenten Ausdrücke von  $E$ :
  - $X = \{E\}$  ( $X$  ist die Menge aller äquivalenten Ausdrücke)
  - repeat**
  - for each**  $E_i \in X$ :
  - wende alle möglichen Äquivalenzumformungen an
  - speichere erhaltene Ausdrücke in  $X$
  - until** keine weiteren Ausdrücke können gefunden werden
- Sehr **zeit- und speicherintensiver** Ansatz.

## Heuristische Optimierung/1

- **Heuristische Optimierung** transformiert den Operatorbaum nach einer Reihe von Heuristiken, welche die Ausführung normalerweise (jedoch nicht in allen Fällen) beschleunigen.
- **Ziel der Heuristiken:** Größe der Zwischenergebnisse so früh als möglich (d.h. nahe an den Blättern des Operatorbaums) klein machen.
- Einige (**alte**) **Systeme** verwenden nur heuristische Optimierung.
- Modern Systeme kombinieren **Heuristiken** (nur einige Ausdrücke werden betrachtet) mit **kostenbasierter Optimierung** (schätze die Kosten für jeden betrachteten Ausdruck ab).

## Heuristische Optimierung/2

- **Typischer Ansatz** der heuristischen Optimierung:
  1. Transformiere alle konjunktiven Selektionen in eine Reihe verschachtelter Selektionen (ER1).
  2. Schiebe Selektionen so weit als möglich im Operatorbaum nach unten (ER2, ER7(a), ER7(b), ER11).
  3. Ersetze Kreuzprodukte, welche von einer Selektion gefolgt sind, durch Joins (ER4(a)).
  4. Führe Joins und Selektionen mit starker Selektivität zuerst aus (ER6).
  5. Schiebe Projektionen so weit nach unten als möglich und erzeuge neue Projektionen, sodass kein Attribut weitergeleitet wird, das nicht mehr gebraucht wird (ER3, ER8, ER12).
  6. Identifiziere die Teilbäume, für die Pipelining möglich ist, und führe diese mit Pipelining aus.

## Äquivalenzumformung: Beispieltabellen

- **Schemas der Beispieltabellen:**
  - $branch(branch\text{-}name, branch\text{-}city, assets)$
  - $account(account\text{-}number, branch\text{-}name, balance)$
  - $depositor(customer\text{-}name, account\text{-}number)$
- **Fremdschlüsselbeziehungen:**
  - $\pi_{branch\text{-}name}(account) \subseteq \pi_{branch\text{-}name}(branch)$
  - $\pi_{account\text{-}number}(depositor) \subseteq \pi_{account\text{-}number}(account)$

## Beispiele Äquivalenzumformungen/1

- **Beispiel 1:** Selektion nach unten schieben.
- **Anfrage:** Finde die Namen aller Kunden die ein Konto in einer Filiale in Brooklyn haben.  

$$\pi_{customer\text{-}name}(\sigma_{branch\text{-}city='Brooklyn'}(branch \bowtie (account \bowtie depositor)))$$
- Der Join wird für die Konten und Kunden aller Filialen berechnet, obwohl wir nur an den Filialen in Brooklyn interessiert sind.
- **Umformung** unter Verwendung von ER7(a):  

$$\pi_{customer\text{-}name}(\sigma_{branch\text{-}city='Brooklyn'}(branch) \bowtie (account \bowtie depositor))$$
- Die Selektion wird vorgezogen, damit sich die Größe der Relationen, auf die ein Join berechnet werden muss, reduziert.

## Beispiele Äquivalenzumformungen/2

- **Beispiel 2:** Oft sind mehrere Umformungen notwendig.
- **Anfrage:** Finde die Namen aller Kunden mit einem Konto in Brooklyn, deren Kontostand kleiner als 1000 ist.  

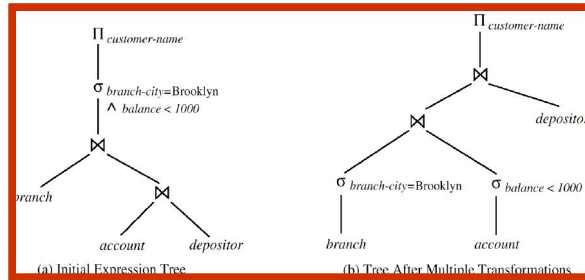
$$\pi_{customer\text{-}name}(\sigma_{branch\text{-}city='Brooklyn' \wedge balance < 1000}(branch \bowtie (account \bowtie depositor)))$$
- **Umformung 1:** ER6(a) (Join Assoziativität):  

$$\pi_{customer\text{-}name}(\sigma_{branch\text{-}city='Brooklyn' \wedge balance < 1000}(((branch \bowtie account) \bowtie depositor)))$$
- **Umformung 2:** ER7(a) und (b) (Selektion nach unten schieben)  

$$\pi_{customer\text{-}name}(\sigma_{branch\text{-}city='Brooklyn'}(branch) \bowtie \sigma_{balance < 1000}(account) \bowtie depositor)$$

## Beispiele Äquivalenzumformungen/3

- Beispiel 2 (Fortsetzung)
  - Operatorbaum vor und nach den Umformungen.



## Beispiele Äquivalenzumformungen/4

- Beispiel 3: Projektion
- Anfrage: (wie Beispiel 1)
 
$$\pi_{customer-name}((\sigma_{branch-city='Brooklyn'}(branch) \bowtie account) \bowtie depositor)$$
- Join  $\sigma_{branch-city='Brooklyn'}(branch) \bowtie account$  ergibt folgendes Schema:
 
$$(branch-name, branch-city, assets, account-number, balance)$$
- Nur 1 Attribute wird gebraucht: *account-number* für Join mit *depositor*.
- Umformung: ER8(b) (Projektion nach unten schieben):
 
$$\pi_{customer-name}(\pi_{account-number}(\sigma_{branch-city='Brooklyn'}(branch) \bowtie account) \bowtie depositor)$$

## Integrierte Übung:

- Verwenden Sie die Äquivalenzregeln, um die Projektionen so weit als möglich nach unten zu schieben:

$$\pi_{customer-name}(\pi_{account-number}(\sigma_{branch-city='Brooklyn'}(branch) \bowtie account) \bowtie depositor)$$

- Lösung:

- Anwendung von ER8(b):  $A_1 = \emptyset$ ,  $A_2 = \{account-number\}$ ,  $A_3 = A_4 = \{branch-name\}$

$$\pi_{customer-name}(\pi_{account-number}(\pi_{branch-name}(\sigma_{branch-city='Brooklyn'}(branch)) \bowtie \pi_{account-number,branch-name}(account)) \bowtie depositor)$$

- Anwendung von ER8(d):  $A_1 = \{branch-name\}$ ,  $A_3 = \{branch-city\}$

$$\pi_{customer-name}(\pi_{account-number}(\pi_{branch-name}(\sigma_{branch-city='Brooklyn'}(\pi_{branch-name,branch-city}(branch))) \bowtie \pi_{account-number,branch-name}(account)) \bowtie depositor)$$

## Beispiele Äquivalenzumformungen/5

- Beispiel 4: Joinreihenfolge
- Für alle Relationen  $r_1, r_2, r_3$  gilt (Assoziativität):
 
$$(r_1 \bowtie r_2) \bowtie r_3 = r_1 \bowtie (r_2 \bowtie r_3)$$
- Falls  $r_2 \bowtie r_3$  groß ist und  $r_1 \bowtie r_2$  klein, wählen wir die Reihenfolge
 
$$(r_1 \bowtie r_2) \bowtie r_3$$
 sodass nur ein kleines Zwischenergebnis berechnet und evtl. zwischengespeichert werden muss.

## Beispiele Äquivalenzumformungen/6

- Beispiel 5: Joinreihenfolge

- Anfrage:

$$\pi_{customer-name}(\sigma_{branch-city='Brooklyn'}(branch) \bowtie account \bowtie depositor)$$

- Welcher Join soll zuerst berechnet werden?

- $\sigma_{branch-city='Brooklyn'}(branch) \bowtie depositor$
- $\sigma_{branch-city='Brooklyn'}(branch) \bowtie account$
- $account \bowtie depositor$

- (a) ist ein Kreuzprodukt, da *branch* und *depositor* keine gemeinsamen Attribute haben  
→ sollte vermieden werden
- (b) ist vermutlich kleiner als (c), da (b) nur die Konten in Brooklyn berücksichtigt, (c) jedoch alle Konten.

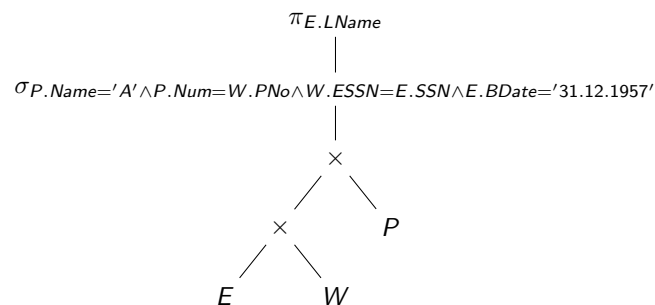
## Integrierte Übung

Stellen Sie die folgende Anfrage als Operatorbaum dar und führen Sie günstige Äquivalenzumformungen durch:

```
select E.LName
from Employee E, WorksOn W, Project P
where P.PName = 'A'
and P.PNum = W.PNo
and W.ESSN = E.SSN
and E.BDate = '31.12.1957'
```

## Integrierte Übung – Lösung/1

Operatorbaum (algebraische Normalform):



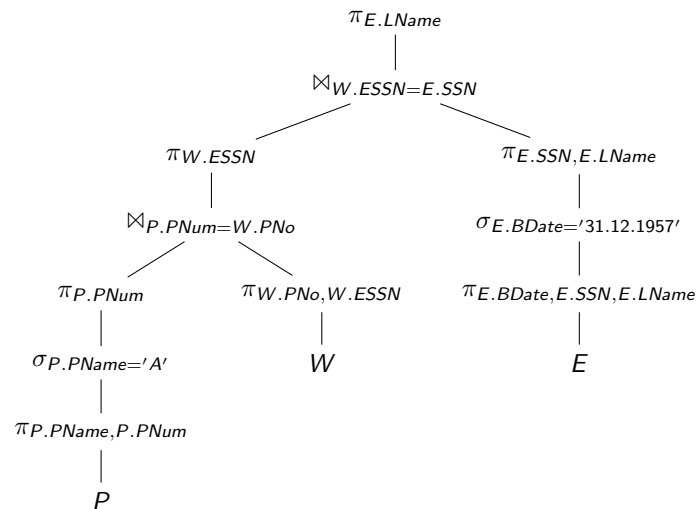
## Integrierte Übung – Lösung/2

Anwendung der Äquivalenzregeln:

- Konjunktive Selektionen in verschachtelte Selektionen umwandeln
- Selektionen möglichst weit nach unten schieben
- Kreuzprodukte wenn möglich in Joins umwandeln
- Welcher Join soll als erstes ausgeführt werden?
  - $E \bowtie_{\theta} P$  wäre ein Kreuzprodukt (da  $\theta = \emptyset$ ) und kommt nicht in Frage
  - beide anderen Möglichkeiten sind sinnvoll, da je eine volle Relation (*W*) mit einer selektierten Relation (*P* bzw. *E*) verbunden wird
  - mit der Annahme, dass es mehr Leute mit gleichem Geburtsdatum als mit gleichem Namen gibt, wurde *W* als erstes mit *P* verbunden
- Projektionen möglichst weit nach unten schieben

## Integrierte Übung – Lösung/3

Operatorbaum nach Anwendung der Äquivalenzregeln:



## Inhalt

- 1 Überblick
- 2 Äquivalenzregeln
- 3 Äquivalenzumformungen
- 4 **Kostenbasierte Optimierung**

## Kostenbasierte Optimierung

- **Kostenbasierte Optimierer** schätzen die Kosten aller möglichen Anfragepläne ab und wählen den billigsten (=schnellsten).
- **Kostenabschätzung** erfolgt aufgrund von
  - Datenbankstatistik (im Katalog gespeichert)
  - Wissen über die Kosten der Operatoren (z.B. Hash Join braucht  $3(b_r + b_s)$  Blockzugriffe für  $r \bowtie s$ )
  - Wissen über die Interaktion der Operatoren (z.B. sortiertes Lesen mit einem Index ermöglicht Merge Join statt Sort-Merge Join)

## Kombination von Kosten mit Heuristiken

- **kostenbasierte Optimierung**: durchsuche alle Pläne und suche den billigsten
- **heuristische Optimierung**: erzeuge einen vielversprechenden Plan nach heuristischen Regeln
- Praktische Optimierer **kombinieren beide Techniken**:
  - erzeuge eine Menge vielversprechender Pläne
  - wähle den billigsten
  - Plan wird sofort bewertet, sobald er erzeugt wird (und evtl. verworfen)

## Teilpläne bewerten

- Optimierer kann **Teilpläne bewerten** und langsame, äquivalente Teilpläne verwerfen.
  - Dadurch reduziert sich die Menge der Teilpläne, die betrachtet werden müssen.
  - Es reicht jedoch nicht, nur den jeweils schnellsten Teilbaum zu behalten.
- **Beispiel:**
  - Hash Join ist schneller als Merge Join
  - es kann dennoch besser sein, den Merge Join zu verwenden, wenn die Ausgabe sortiert sein muss
  - der Merge Join liefert ein sortiertes Ergebnis und man spart sich einen zusätzlichen Sortierschritt

## Datenbankstatistik/1

- **Katalog** (Datenbankverzeichnis) speichert u.A. Informationen über die gespeicherten Daten.
- **Statistik über Index:** Anzahl der Ebenen in Index  $i$
- **Statistik über Tabelle**  $R(A_1, A_2, \dots, A_n)$ :
  - $n_R$ : Anzahl der Tuple in  $R$
  - $b_R$ : Anzahl der Blöcke, auf denen  $R$  gespeichert ist
  - $V(R, A) = |\pi_A(R)|$ : Anzahl der unterschiedlichen Werte in den Attribut  $A$
- **Beispiel:**  $V(R, A_1) = 1$ ,  $V(R, A_2) = 3$ ,  $V(R, A_3) = 2$

$A_1$	$A_2$	$A_3$
a	b	c
a	x	d
a	y	c

## Join Reihenfolgen/1

- Kostenbasierte Optimierung kann verwendet werden, um die **beste Join Reihenfolge** herauszufinden.
- Join Reihenfolgen der Relationen entstehen durch:
  - **Assoziativgesetz:**  $(r_1 \bowtie r_2) \bowtie r_3 = r_1 \bowtie (r_2 \bowtie r_3)$
  - **Kommutativgesetz:**  $r_1 \bowtie r_2 = r_2 \bowtie r_1$
- Die Join Reihenfolge hat **große Auswirkung auf Effizienz:**
  - Größe der Zwischenergebnisse
  - Auswahlmöglichkeit der Algorithmen (z.B. vorhandene Indices verwenden)

## Join Reihenfolgen/2

Wieviele Reihenfolgen gibt es für  $R_1 \bowtie R_2 \bowtie \dots \bowtie R_m$ ?

- **Assoziativgesetz:**
  - Operatorbaum: es gibt  $C_{m-1}$  binäre Bäume mit  $m$  Blättern (anders ausgedrückt: es gibt  $C_{m-1}$  Klammerungen von  $m$  Operanden)
  - dabei ist  $C_n$  die Catalan-Zahl:

$$C_n = \frac{1}{n+1} \binom{2n}{n} = \frac{(2n)!}{(n+1)!n!} \quad n \geq 0$$

- **Kommutativgesetz:**
  - Blätter des Operatorbaums sind die Relationen  $r_1, r_2, \dots, r_m$
  - für jeden Operatorbaum gibt es  $m!$  Permutationen
- **Anzahl der Join-Reihenfolgen** für  $m$  Relationen:

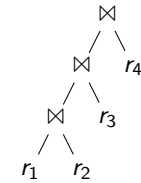
$$m! C_{m-1} = \frac{(2(m-1))!}{(m-1)!}$$

## Join Reihenfolgen/3

- Anzahl der Join-Reihenfolgen wächst sehr schnell an:
  - $m = 3$ : 12 Reihenfolgen
  - $m = 7$ : 665.280 Reihenfolgen
  - $m = 10$ : > 17.6 Milliarden Reihenfolgen
- Dynamic Programming Ansatz:
  - Laufzeit Komplexität:  $O(3^m)$
  - Speicher Komplexität:  $O(2^m)$
- Beispiel:  $m = 10$ 
  - Anzahl der Join-Reihenfolgen:  $17.6 \times 10^9$
  - Dynamic Programming:  $3^m = 59049$
- Trotz Dynamic Programming bleibt Aufzählung der Join-Reihenfolgen teuer.

## Join Reihenfolgen/4

- Left-deep Join Reihenfolgen
  - rechter Join-Operator ist immer eine Relation (nicht Join-Ergebnis)
  - dadurch ergeben sich sog. left-deep Operatorbäume (im Gegensatz zu "bushy", wenn alle Operatorbäume erlaubt sind)
- Anzahl der left-deep Join Reihenfolgen für  $m$  Relationen:  $O(m!)$
- Dynamic Programming: Laufzeit  $O(m 2^m)$ .
- Vergleich für  $m$  Relationen und Beispiel  $m = 10$ :



	left-deep	bushy	$m = 10$	left-deep	bushy
#Baumformen	1	$C_{m-1}$		1	4.862
#Join Reihenfolgen	$m!$	$\frac{(2(m-1))!}{(m-1)!}$		$3.63 \times 10^6$	$1.76 \times 10^{10}$
Dynamic Programming	$O(m 2^m)$	$O(3^m)$		10.240	59.049

## Greedy Algorithms für Join Reihenfolgen/1

- Ansatz: In jedem Schritt wird der Join mit dem kleinsten Zwischenergebnis verwendet.
- Überblick: Greedy Algorithms für Join Reihenfolge
  - nur left-deep Join Reihenfolgen werden betrachtet
  - Relationen-Paar mit dem kleinsten Join Ergebnis kommt zuerst dran
  - in jedem weiteren Schritt wird jene Relation dazugegeben, die mit dem vorhanden Operatorbaum das kleinste Join-Ergebnis erzeugt
- Algorithmus: Join Reihenfolge von  $S = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ 
  1.  $O \leftarrow R_i \bowtie R_j$ , sodass  $|R_i \bowtie R_j|$  minimal ist
  2.  $S \leftarrow S - \{R_i, R_j\}$
  3. **while**  $S \neq \emptyset$  **do**
    - a. wähle  $R_i \in S$  sodass  $|O \bowtie R_i|$  minimal ist
    - b.  $O \leftarrow O \bowtie R_i$
    - c.  $S \leftarrow S - \{R_i\}$
  4. **return** Operatorbaum  $O$

## Greedy Algorithms für Join Reihenfolgen/2

- Greedy Algorithms benötigt Abschätzung für Join Kardinalität.
- Abschätzung erfolgt aufgrund der Anzahl der unterschiedlichen Werte für die Join Attribute, z.B.  $V(R, A)$ .
- Abschätzung für  $|R \bowtie S|$  mit dem Join Attribut  $A$ :

$$|R \bowtie S| \approx \frac{|R| \cdot |S|}{\max(V(R, A), V(S, A))}$$

- Annahmen über die Werte der Attribute:
  - Gleichverteilung: Jeder der Werte in  $\pi_A(R)$  bzw.  $\pi_A(S)$  kommt mit der gleichen Wahrscheinlichkeit vor.
  - Teilmenge:  $V(R, A) \leq V(S, A) \Rightarrow \pi_A(R) \subseteq \pi_A(S)$
  - Werterhaltung: falls Attribut  $B$  in  $R$  vorkommt aber nicht in  $S$  (d.h.  $B$  ist kein Join-Attribut), dann gilt:  $V(R \bowtie S, B) = V(R, B)$

## Greedy Algorithms für Join Reihenfolgen/3

- **Beispiel:** schätze  $|R \bowtie S|$  ab, wobei folgende Statistik gegeben ist.

$R(A, B)$	$S(B, C)$
$n_R = 1000$	$n_S = 2000$
$V(R, B) = 20$	$V(S, B) = 500$

- **Abschätzung:**

$$|R \bowtie S| \approx \frac{n_R \cdot n_S}{\max(V(R, B), V(S, B))} = \frac{1000 \cdot 2000}{500} = 4000$$

## Greedy Algorithms für Join Reihenfolgen/4

- **Bisherige Abschätzung ist limitiert** auf 1 Join-Attribut zwischen 2 Relationen.
- Für den Greedy Algorithmus muss die Abschätzung verallgemeinert werden:
  - $m$  Relationen  $R_1, R_2, \dots, R_m$
  - beliebig viele Join-Attribute ( $A$  ist Join-Attribut wenn es in mindestens zwei Relationen vorkommt)
- **Verallgemeinerung** der Abschätzung:
  1. starte mit der Größe des Kreuzproduktes  $|R_1| \cdot |R_2| \cdot \dots \cdot |R_m|$
  2. für jedes Join-Attribut: dividiere durch alle  $V(R_i, A)$  außer durch das kleinste

## Greedy Algorithms für Join Reihenfolgen/5

- **Beispiel:** schätze  $|R \bowtie S \bowtie T|$  ab, wobei folgende Statistik gegeben ist.

$R(A, B, C)$	$S(B, C, D)$	$T(B, E)$
$n_R = 1000$	$n_S = 2000$	$n_T = 5000$
$V(R, A) = 100$		
$V(R, B) = 20$	$V(S, B) = 50$	$V(T, B) = 200$
$V(R, C) = 200$	$V(S, C) = 100$	
	$V(S, D) = 400$	
		$V(S, E) = 500$

- **Abschätzung:**

$$|R \bowtie S \bowtie T| \approx \frac{n_R \cdot n_S \cdot n_T}{V(S, B) \cdot V(T, B) \cdot V(S, C)} = 5000$$

## Integrierte Übung

Eine Datenbank mit folgenden Relationen ist gegeben:

- $|R_1(A, B, C)| = 1000, V(R_1, C) = 900$
- $|R_2(C, D, E)| = 1500, V(R_2, C) = 1100, V(R_2, D) = 50, V(R_2, E) = 50$
- $|R_3(D, E)| = 750, V(R_3, D) = 50, V(R_3, E) = 100$

Finden Sie eine effiziente Join Reihenfolge für den Join  $R_1 \bowtie R_2 \bowtie R_3$  und berechnen Sie die Kardinalität des Join-Ergebnisses.



# PostgreSQL Anfrageoptimierung/1

Query - boehlen on local socket - [/home/boehlen/Teaching/DBS10/code/q4.sql] \*

```
SELECT COUNT(*)
FROM r1 r, r2 s
WHERE r.unique1 = s.unique1
AND r.unique1 > 70000;
```

Scratch pad

Output pane

Data Output Explain Messages History

OK. Unix Ln 4 Col 15 Ch 77 7 rows. 6 ms

# PostgreSQL Anfrageoptimierung/2

Query - boehlen on local socket - [/home/boehlen/Teaching/DBS10/code/q4.sql] \*

```
SELECT COUNT(*)
FROM r1 r, r2 s
WHERE r.unique1 = s.unique1
AND r.unique1 > 70000;
```

Scratch pad

Output pane

Data Output Explain Messages History

QUERY PLAN  
text

1	Aggregate (cost=125743.81..125743.82 rows=1 width=0)
2	-> Hash Join (cost=55330.18..123406.99 rows=934725 width=0)
3	Hash Cond: (r.unique1 = s.unique1)
4	-> Seq Scan on r1 r (cost=0.00..41911.12 rows=934725 width=4)
5	Filter: (unique1 > 70000)
6	-> Hash (cost=39412.08..39412.08 rows=1000008 width=4)
7	-> Seq Scan on r2 s (cost=0.00..39412.08 rows=1000008 width=4)

OK. Unix Ln 4 Col 15 Ch 77 7 rows. 6 ms

# PostgreSQL Anfrageoptimierung/3

Query - boehlen on local socket - [/home/boehlen/Teaching/DBS10/code/q4.sql] \*

```
SELECT COUNT(*)
FROM r1 r, r2 s
WHERE r.unique1 = s.unique1
AND r.unique1 > 70000;
```

Scratch pad

Output pane

Data Output Explain Messages History

OK. Unix Ln 4 Col 22 Ch 84 9 rows. 8 ms

# PostgreSQL Anfrageoptimierung/4

Query - boehlen on local socket - [/home/boehlen/Teaching/DBS10/code/q4.sql] \*

```
SELECT COUNT(*)
FROM r1 r, r2 s
WHERE r.unique1 = s.unique1
AND r.unique1 > 70000;
```

Scratch pad

Output pane

Data Output Explain Messages History

QUERY PLAN  
text

1	Aggregate (cost=103409.52..103409.53 rows=1 width=0)
2	-> Hash Join (cost=43633.16..102659.08 rows=300177 width=0)
3	Hash Cond: (s.unique1 = r.unique1)
4	-> Seq Scan on r2 s (cost=0.00..39412.08 rows=1000008 width=4)
5	-> Hash (cost=38854.95..38854.95 rows=300177 width=4)
6	-> Bitmap Heap Scan on r1 r (cost=5690.73..38854.95 rows=300177 width=4)
7	Recheck Cond: (unique1 > 700000)
8	-> Bitmap Index Scan on i1 (cost=0.00..5615.69 rows=300177 width=0)
9	Index Cond: (unique1 > 700000)

OK. Unix Ln 4 Col 22 Ch 84 9 rows. 8 ms