



Gunter
Saake

Kai-Uwe
Sattler

Andreas
Heuer

3. Auflage

Datenbanken

Implementierungstechniken

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	v
Inhaltsverzeichnis	ix
1 Aufgaben und Prinzipien von Datenbanksystemen	1
1.1 Wiederholung der Datenbank-Grundbegriffe	2
1.1.1 Architektur eines Datenbanksystems	2
1.1.2 Neun Funktionen nach Codd	5
1.1.3 Datenbankmodelle und Datendefinition	6
1.1.4 Anfrage- und Änderungsoperationen	9
1.1.5 Sprachen und Sichten	11
1.2 Wann kommt was?	12
1.2.1 Optimierer	13
1.2.2 Dateioorganisation und Zugriffspfade	14
1.2.3 Transaktionen	17
1.2.4 Recovery und Datensicherheit	18
1.3 Vertiefende Literatur	18
1.4 Übungen	19
2 Architektur von Datenbanksystemen	21
2.1 Betrachtete Fragestellungen	22
2.2 Schichtenmodell eines relationalen DBMS	24
2.3 Hardware und Betriebssystem	27
2.4 Pufferverwaltung	29
2.5 Speichersystem	31
2.6 Zugriffssystem	33
2.7 Datensystem	37
2.8 Katalog und Data Dictionary	37
2.9 Vertiefende Literatur	40
2.10 Übungen	41

3	Verwaltung des Hintergrundspeichers	43
3.1	Speichermedien	44
3.1.1	Speicherhierarchie	44
3.1.2	Cache, Hauptspeicher und Sekundärspeicher	47
3.1.3	Die Magnetplatte	48
3.1.4	Flash-Laufwerke	51
3.1.5	Speicherkapazität, Geschwindigkeit und Kosten	55
3.2	Speicher-Arrays: RAID	57
3.2.1	Ziele von RAID-Systemen	57
3.2.2	RAID-Levels	58
3.3	Sicherungsmedien: Tertiärspeicher	64
3.3.1	Optische Platten	65
3.3.2	Bänder	65
3.3.3	Jukeboxes und Roboter	66
3.3.4	Langzeitarchivierung	67
3.4	Verwaltung des Hintergrundspeichers	68
3.4.1	Betriebssystemdateien	69
3.4.2	Abbildung der konzeptuellen Ebene auf interne Strukturen	70
3.4.3	Einpassen von Datensätzen auf Blöcke	71
3.4.4	Modell des Sekundärspeichers	73
3.5	Seiten, Sätze und Adressierung	73
3.5.1	Struktur der Seiten	74
3.5.2	Satztypen	75
3.5.3	Adressierung von Datensätzen	81
3.5.4	Alternative Speichermodelle: DSM und PAX	83
3.6	Kompression von Daten	86
3.7	Speicherorganisation und physische Datendefinition in SQL-Systemen	93
3.8	Vertiefende Literatur	96
3.9	Übungen	99
4	Pufferverwaltung	101
4.1	Einordnung und Motivation	102
4.2	Suche von Seiten und Speicherzuteilung	105
4.2.1	Suchen einer Seite	105
4.2.2	Speicherzuteilung im Puffer	106
4.3	Seitenersetzungsstrategien	106
4.3.1	Merkmale gängiger Strategien	109
4.3.2	Konkrete Seitenersetzungsstrategien	110
4.3.3	Fazit	122
4.4	Vertiefende Literatur	124
4.5	Übungen	124

5	Dateiorganisation und Zugriffsstrukturen	127
5.1	Klassifikation der Speichertechniken	128
5.1.1	Primärschlüssel vs. Sekundärschlüssel	129
5.1.2	Primärindex vs. Sekundärindex	130
5.1.3	Dateiorganisationsform vs. Zugriffspfad	131
5.1.4	Dünn besetzter vs. dicht besetzter Index	133
5.1.5	Gecusterter vs. nicht-geclusterter Index	135
5.1.6	Schlüsselzugriff vs. Schlüsseltransformation	136
5.1.7	Ein-Attribut- vs. Mehr-Attribut-Index	137
5.1.8	Eindimensionale vs. mehrdimensionale Zugriffsstruktur	137
5.1.9	Nachbarschaftserhaltende vs. streuende Zugriffsstruktur	139
5.1.10	Statische vs. dynamische Zugriffsstruktur	139
5.1.11	Beispiele für Klassifikationen	140
5.1.12	Alternative Klassifikationen von Zugriffsverfahren . . .	140
5.1.13	Anforderungen an Speichertechniken	141
5.2	Sequenzielle und indexierte Dateien	143
5.2.1	Heap-Organisation	143
5.2.2	Sequenzielle Speicherung	147
5.2.3	Indexsequenzielle Dateiorganisation	148
5.2.4	Indexiert-nichtsequenzieller Zugriffspfad	153
5.3	Suchbäume	157
5.3.1	B-Bäume	158
5.3.2	B-Bäume und Varianten in Datenbanken	166
5.3.3	B-Bäume in der Praxis	173
5.4	Hashverfahren	176
5.4.1	Grundprinzipien von Hashverfahren	176
5.4.2	Hashverfahren für Datenbanken	178
5.5	Cluster-Bildung	182
5.5.1	Index-organisierte Tabellen	183
5.5.2	Cluster für Verbundanfragen	184
5.6	Partitionierung	187
5.6.1	Fragmentierung und Allokation in verteilten Datenbanken	188
5.6.2	Formen der horizontalen Partitionierung	190
5.6.3	Bereichspartitionierung	191
5.6.4	Hash-Partitionierung	192
5.7	Vertiefende Literatur	193
5.8	Übungen	194
6	Spezielle Indexstrukturen	197
6.1	Dynamisches Hashing	198
6.1.1	Hashfunktionen mit erweiterbarem Bildbereich	198
6.1.2	Lineares Hashen	199

6.1.3	Erweiterbares Hashen	202
6.1.4	Spiralhashen	205
6.1.5	Kombinierte Methoden	208
6.2	Mehrdimensionale Speichertechniken	209
6.2.1	Mehrdimensionale Baumverfahren	210
6.2.2	Mehrdimensionales Hashen	215
6.2.3	Grid-File	220
6.2.4	UB-Baum	226
6.3	Geometrische Zugriffsstrukturen	228
6.3.1	Probleme und Aufgaben	229
6.3.2	Eignung klassischer Suchbäume und Indexstrukturen	232
6.3.3	Prinzipien nachbarschaftserhaltender Suchbäume	233
6.3.4	R-Bäume und Varianten	236
6.3.5	Rechteckspeicherung durch Punktdatenstrukturen	243
6.3.6	Klassifizierung und Vergleich	250
6.4	Hochdimensionale Daten	251
6.4.1	Hochdimensionale Feature-Vektoren	251
6.4.2	Operationen auf Feature-Vektoren	252
6.4.3	Metriken für Abstände	254
6.4.4	Nächster-Nachbar-Suche in R-Bäumen	256
6.4.5	Der X-Baum	259
6.4.6	Alternativen zu Baumverfahren	261
6.5	Bitmap-Indexe	263
6.5.1	Vor- und Nachteile von Bitmap-Indetzen	264
6.5.2	Varianten von Bitmap-Indetzen	265
6.5.3	Implementierung von Bitmap-Indetzen	266
6.6	Indexierung von Texten	267
6.6.1	Eignung von B-Bäumen: Probleme und Präfix-B-Baum	267
6.6.2	Digitale Bäume	268
6.6.3	Invertierte Listen	273
6.7	Relationenübergreifende Indexe	274
6.7.1	Verbundindexe	274
6.7.2	Multi-Join-Indexe	276
6.7.3	Pfadindexe	278
6.7.4	Zugriffsunterstützungsrelationen	279
6.7.5	Zugriffspfade für berechnete Werte	280
6.8	Vertiefende Literatur	281
6.9	Übungen	282
7	Basialgorithmen für Datenbankoperationen	285
7.1	Benötigte Grundalgorithmen	286
7.1.1	Parameter für Kostenbestimmung	286
7.1.2	Grundannahmen	288

7.1.3	Hauptspeicheralgorithmen	288
7.1.4	Zugriffe auf Datensätze	289
7.1.5	Externe und interne Sortieralgorithmen	290
7.2	Navigationsoperationen: Scans	293
7.2.1	Arten von Scans	294
7.2.2	Operationen auf Scans	295
7.2.3	Scan-Semantik	298
7.3	Unäre Operationen: Selektion, Projektion und Gruppierung	299
7.3.1	Selektion	299
7.3.2	Projektion	301
7.3.3	Aggregatfunktionen und Gruppierung	302
7.4	Binäre Operationen: Mengenoperationen	305
7.4.1	Techniken für binäre Operatoren	306
7.4.2	Klassen binärer Operatoren	307
7.4.3	Vereinigung mit Duplikateliminierung	308
7.5	Berechnung von Verbunden	310
7.5.1	Nested-Loops-Verbund	310
7.5.2	Merge-Techniken	312
7.5.3	Hashverbund	315
7.5.4	Vergleich der Techniken	319
7.6	Operationen für spezielle Anwendungen	320
7.6.1	Cube-Berechnung	320
7.6.2	Skyline-Operator	327
7.7	Vertiefende Literatur	332
7.8	Übungen	334
8	Optimierung von Anfragen	335
8.1	Grundprinzipien der Optimierung	336
8.2	Motivierende Beispiele	337
8.3	Phasen der Anfragebearbeitung	342
8.4	Anfrageübersetzung und -vereinfachung	345
8.4.1	Parsen und Analysieren der Anfrage	345
8.4.2	Übersetzung in Relationenalgebra	346
8.4.3	Auflösung von Sichten	348
8.4.4	Standardisierung und Vereinfachung von Ausdrücken	348
8.4.5	Entschachteln von Anfragen	350
8.5	Logische Optimierung	354
8.5.1	Algebraische Optimierung	355
8.5.2	Verbundoptimierung mit Tableaus	366
8.6	Physische Optimierung	380
8.6.1	Planoperatoren und Planrepräsentation	380
8.6.2	Plangenerierung und Suchstrategien	390
8.7	Kostenmodelle und Kostenabschätzung	394

8.7.1	Komponenten von Kostenmodellen	394
8.7.2	Histogramme	400
8.7.3	Kostenabschätzungen am Beispiel	407
8.7.4	Statistiken in DBMS	411
8.8	Strategien zur kostenbasierten Planauswahl	413
8.8.1	Greedy-Suche	414
8.8.2	Dynamische Programmierung	415
8.8.3	Anfragedekomposition	420
8.8.4	Iterative Improvement und Simulated Annealing	422
8.8.5	Optimierung mit genetischen Algorithmen	425
8.9	Beeinflussung von Anfrageoptimierern	429
8.9.1	Ausgabe von Plänen	429
8.9.2	Optimizer Hints	432
8.10	Vertiefende Literatur	435
8.11	Übungen	436
9	Transaktionsmodelle	439
9.1	Transaktionen im Mehrbenutzerbetrieb	439
9.2	Transaktionseigenschaften	441
9.3	Probleme im Mehrbenutzerbetrieb	443
9.3.1	Inkonsistentes Lesen: Nonrepeatable Read	443
9.3.2	Lesen inkonsistenter Zustände	444
9.3.3	Abhängigkeiten von nicht freigegebenen Daten: Dirty Read	444
9.3.4	Das Phantom-Problem	446
9.3.5	Verloren gegangene Änderungen: Lost Update	447
9.3.6	Integritätsverletzung durch Mehrbenutzer-Anomalie	447
9.3.7	Cursor-Referenzen	448
9.3.8	Problemklassifikation	449
9.4	Serialisierbarkeit	450
9.4.1	Einführung in die Serialisierbarkeitsthematik	450
9.4.2	Der Begriff des Schedules	455
9.4.3	Grundlegende Definitionen	458
9.4.4	Das Konzept der Serialisierbarkeit	460
9.4.5	Sichtserialisierbarkeit	460
9.4.6	Konfliktserialisierbarkeit	463
9.4.7	Graphbasierter Test auf Konfliktserialisierbarkeit	466
9.4.8	Abgeschlossenheitseigenschaften	468
9.5	Transaktionsabbruch und Fehlersicherheit	471
9.5.1	Rücksetzbarkeit	471
9.5.2	Vermeidung kaskadierender Abbrüche	472
9.5.3	Striktheit	473
9.5.4	Operationen für den Transaktionsabbruch	474

9.6	Mehrversionen-Serialisierbarkeit	475
9.7	Ausnutzung semantischer Informationen	485
9.7.1	Vertauschbarkeit von Operationen	485
9.7.2	Kompensierende Aktionen	489
9.8	Vertiefende Literatur	490
9.9	Übungen	491
10	Transaktionsverwaltung	495
10.1	Der Scheduler	495
10.2	Sperrmodelle	498
10.2.1	Sperrdisziplin	498
10.2.2	Verklemmungen	499
10.2.3	Livelock-Problem	500
10.3	Sperrprotokolle	501
10.3.1	Notwendigkeit von Sperrprotokollen	501
10.3.2	Zwei-Phasen-Sperrprotokoll	502
10.3.3	Striktes Zwei-Phasen-Sperrprotokoll	504
10.3.4	Aggressive und konservative Protokolle	504
10.4	Sperrgranulate	505
10.4.1	Hierarchisches Sperren	506
10.4.2	Baumprotokolle für Sperren in Indexstrukturen	510
10.5	Nichtsperrende Verfahren zur Synchronisation	512
10.5.1	Zeitmarkenverfahren	513
10.5.2	Serialisierbarkeitsgraphentester	516
10.5.3	Optimistische Verfahren	517
10.6	Mehrversionen-Synchronisation	519
10.6.1	Begrenzung der Anzahl der Versionen	520
10.6.2	Synchronisation von MV-Schedules	521
10.7	Commit-Protokolle	526
10.7.1	Verteiltes Commit	527
10.7.2	Das Zwei-Phasen-Commit-Protokoll	527
10.7.3	Lineares 2PC	531
10.7.4	Verteiltes 2PC	531
10.7.5	Hierarchisches 2PC	532
10.7.6	Das Drei-Phasen-Commit-Protokoll	533
10.8	Transaktionen in SQL-DBMS	536
10.8.1	Aufweichung von ACID in SQL-92: Isolationsebenen	536
10.8.2	Explizite Sperren in SQL	539
10.9	Vertiefende Literatur	540
10.10	Übungen	541

11 Wiederherstellung und Datensicherung	543
11.1 Beteiligte Systemkomponenten	544
11.2 Fehlerklassifikation und Recovery-Klassen	546
11.2.1 Fehlerklassifikation	546
11.2.2 Fehlerkategorien und zugehörige Recovery-Maßnahmen	549
11.3 Protokollierungsarten	550
11.3.1 Aufbau des Logbuchs	550
11.3.2 Physisches vs. logisches Logbuch	552
11.3.3 Sicherungspunkte	557
11.4 Recovery-Strategien	561
11.4.1 Seitenersetzungsstrategien	561
11.4.2 Propagierungsstrategien	562
11.4.3 Einbringstrategien	563
11.4.4 Konkrete Recovery-Strategien	563
11.4.5 Wiederanlauf nach einem Fehlerfall	566
11.4.6 Das REDO-Protokoll als konkrete Realisierung	567
11.4.7 Abbrüche im Recovery-Prozess	568
11.5 Das ARIES-Verfahren	569
11.5.1 Vorgehensweise in ARIES	569
11.5.2 Grundprinzipien und Datenstrukturen	570
11.5.3 Phasen des Wiederanlaufs	571
11.6 Schattenspeicherverfahren	573
11.7 Backup-Strategien und Archivierung	575
11.7.1 Backups und Archivierung	576
11.7.2 Spiegelung von Datenbanken	577
11.8 Vertiefende Literatur	578
11.9 Übungen	578
Abbildungsverzeichnis	580
Tabellenverzeichnis	589
Liste der Codefragmente	591
Sachindex	593
Schlüsselwortindex	605
Literaturverzeichnis	609