

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur vierten Auflage	v
Inhaltsverzeichnis	xi
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	12
1.1.5 Sprachen und Sichten	13
1.2 Wann kommt was?	15
1.2.1 Optimierer	15
1.2.2 Dateioorganisation und Zugriffspfade	17
1.2.3 Transaktionen	20
1.2.4 Recovery und Datensicherheit	20
1.3 Vertiefende Literatur	21
1.4 Übungen	22
2 Architektur von Datenbanksystemen	23
2.1 Betrachtete Fragestellungen	24
2.2 Schichtenmodell eines relationalen DBMS	26
2.3 Hardware und Betriebssystem	29
2.4 Pufferverwaltung	31
2.5 Speichersystem	34
2.6 Zugriffssystem	35
2.7 Datensystem	39
2.8 Katalog und Data Dictionary	40
2.9 Vertiefende Literatur	42
2.10 Übungen	43

I	Speichermodelle und Zugriffspfade	45
3	Verwaltung des Hintergrundspeichers	47
3.1	Speichermedien	48
3.1.1	Speicherhierarchie	48
3.1.2	Cache, Hauptspeicher und Sekundärspeicher	51
3.1.3	Die Magnetplatte	52
3.1.4	Flash-Laufwerke	55
3.1.5	Speicherkapazität, Geschwindigkeit und Kosten	59
3.2	Speicher-Arrays: RAID	61
3.2.1	Ziele von RAID-Systemen	61
3.2.2	RAID-Levels	62
3.3	Sicherungsmedien: Tertiärspeicher	68
3.3.1	Optische Platten	69
3.3.2	Bänder	70
3.3.3	Jukeboxes und Roboter	70
3.3.4	Langzeitarchivierung	71
3.4	Modell des Hintergrundspeichers	72
3.4.1	Betriebssystemdateien	72
3.4.2	Abbildung der konzeptuellen Ebene auf interne Strukturen	74
3.4.3	Einpassen von Datensätzen auf Blöcke	75
3.4.4	Modell des Sekundärspeichers	77
3.5	Seiten, Sätze und Adressierung	78
3.5.1	Struktur der Seiten	78
3.5.2	Satztypen	79
3.5.3	Adressierung von Datensätzen	85
3.5.4	Alternative Speichermodelle und Kompression	87
3.6	Speicherorganisation und physische Datendefinition in SQL-Systemen	89
3.7	Vertiefende Literatur	93
3.8	Übungen	94
4	Pufferverwaltung	97
4.1	Einordnung und Motivation	98
4.2	Suche von Seiten und Speicherzuteilung	101
4.2.1	Suchen einer Seite	101
4.2.2	Speicherzuteilung im Puffer	102
4.3	Seitenersetzungsstrategien	102
4.3.1	Merkmale gängiger Strategien	105
4.3.2	Konkrete Seitenersetzungsstrategien	106
4.3.3	Fazit	118
4.4	Vertiefende Literatur	120

4.5	Übungen	120
5	Dateiorganisation und Zugriffsstrukturen	123
5.1	Klassifikation der Speichertechniken	124
5.1.1	Primärschlüssel vs. Sekundärschlüssel	125
5.1.2	Primärindex vs. Sekundärindex	126
5.1.3	Dateiorganisationsform vs. Zugriffspfad	127
5.1.4	Dünn besetzter vs. dicht besetzter Index	129
5.1.5	Geclusterter vs. nicht-geclusterter Index	131
5.1.6	Schlüsselzugriff vs. Schlüsseltransformation	132
5.1.7	Ein-Attribut- vs. Mehr-Attribut-Index	133
5.1.8	Eindimensionale vs. mehrdimensionale Zugriffsstruktur	133
5.1.9	Nachbarschaftserhaltende vs. streuende Zugriffsstruktur	134
5.1.10	Statische vs. dynamische Zugriffsstruktur	135
5.1.11	Beispiele für Klassifikationen	136
5.1.12	Alternative Klassifikationen von Zugriffsverfahren . . .	137
5.1.13	Anforderungen an Speichertechniken	139
5.2	Sequenzielle und indexierte Dateien	140
5.2.1	Heap-Organisation	140
5.2.2	Sequenzielle Speicherung	144
5.2.3	Indexsequenzielle Dateiorganisation	145
5.2.4	Indexiert-nichtsequenzieller Zugriffspfad	150
5.3	Suchbäume	154
5.3.1	B-Bäume	155
5.3.2	B-Bäume und Varianten in Datenbanken	163
5.3.3	B-Bäume in der Praxis	170
5.4	Hashverfahren	173
5.4.1	Grundprinzipien von Hashverfahren	173
5.4.2	Hashverfahren für Datenbanken	175
5.5	Cluster-Bildung	179
5.5.1	Index-organisierte Tabellen	180
5.5.2	Cluster für Verbundanfragen	181
5.6	Partitionierung	184
5.6.1	Fragmentierung und Allokation in verteilten Datenban- ken	185
5.6.2	Formen der horizontalen Partitionierung	187
5.6.3	Bereichspartitionierung	188
5.6.4	Hash-Partitionierung	189
5.7	Vertiefende Literatur	190
5.8	Übungen	191

6	Spezielle Indexstrukturen	193
6.1	Dynamisches Hashing	194
6.1.1	Hashfunktionen mit erweiterbarem Bildbereich	194
6.1.2	Lineares Hashen	195
6.1.3	Erweiterbares Hashen	198
6.1.4	Spiralhashen	201
6.1.5	Kombinierte Methoden	204
6.2	Mehrdimensionale Speichertechniken	205
6.2.1	Mehrdimensionale Baumverfahren	206
6.2.2	Mehrdimensionales Hashen	212
6.2.3	Grid-File	216
6.2.4	UB-Baum	222
6.3	Geometrische Zugriffsstrukturen	225
6.3.1	Probleme und Aufgaben	225
6.3.2	Eignung klassischer Suchbäume und Indexstrukturen	228
6.3.3	Prinzipien nachbarschaftserhaltender Suchbäume	229
6.3.4	R-Bäume und Varianten	233
6.3.5	Rechteckspeicherung durch Punktdatenstrukturen	239
6.3.6	Klassifizierung und Vergleich	246
6.4	Hochdimensionale Daten	247
6.4.1	Hochdimensionale Feature-Vektoren	247
6.4.2	Operationen auf Feature-Vektoren	248
6.4.3	Metriken für Abstände	250
6.4.4	Nächster-Nachbar-Suche in R-Bäumen	252
6.4.5	Der X-Baum	255
6.4.6	Alternativen zu Baumverfahren	257
6.5	Bitmap-Indexe	259
6.5.1	Vor- und Nachteile von Bitmap-Indexen	260
6.5.2	Varianten von Bitmap-Indexen	261
6.5.3	Implementierung von Bitmap-Indexen	262
6.6	Indexierung von Texten	263
6.6.1	Eignung von B-Bäumen: Probleme und Präfix-B-Baum	263
6.6.2	Digitale Bäume	264
6.6.3	Invertierte Listen	269
6.7	Relationenübergreifende Indexe	270
6.7.1	Verbundindexe	270
6.7.2	Multi-Join-Indexe	272
6.7.3	Pfadindexe	273
6.7.4	Zugriffsunterstützungsrelationen	275
6.7.5	Zugriffspfade für berechnete Werte	276
6.8	Vertiefende Literatur	277
6.9	Übungen	278

7	Basisalgorithmen für Datenbankoperationen	283
7.1	Benötigte Grundalgorithmen	285
7.1.1	Parameter für Kostenbestimmung	285
7.1.2	Grundannahmen	286
7.1.3	Hauptspeicheralgorithmen	287
7.1.4	Zugriffe auf Datensätze	287
7.1.5	Externe und interne Sortieralgorithmen	288
7.2	Navigationsoperationen: Scans	292
7.2.1	Arten von Scans	292
7.2.2	Operationen auf Scans	293
7.2.3	Scan-Semantik	296
7.3	Unäre Operationen: Selektion, Projektion und Gruppierung	297
7.3.1	Selektion	297
7.3.2	Projektion	299
7.3.3	Aggregatfunktionen und Gruppierung	300
7.4	Binäre Operationen: Mengenoperationen	303
7.4.1	Techniken für binäre Operatoren	304
7.4.2	Klassen binärer Operatoren	305
7.4.3	Vereinigung mit Duplikateliminierung	306
7.5	Berechnung von Verbunden	308
7.5.1	Nested-Loops-Verbund	308
7.5.2	Merge-Techniken	310
7.5.3	Hashverbund	312
7.5.4	Vergleich der Techniken	316
7.6	Operationen für spezielle Anwendungen	318
7.6.1	Cube-Berechnung	319
7.6.2	Skyline-Operator	325
7.7	Vertiefende Literatur	331
7.8	Übungen	332
8	Optimierung von Anfragen	333
8.1	Grundprinzipien der Optimierung	335
8.2	Motivierende Beispiele	336
8.3	Phasen der Anfragebearbeitung	341
8.4	Anfrageübersetzung und -vereinfachung	343
8.4.1	Parsen und Analysieren der Anfrage	343
8.4.2	Übersetzung in Relationenalgebra	345
8.4.3	Auflösung von Sichten	346
8.4.4	Standardisierung und Vereinfachung von Ausdrücken	347
8.4.5	Entschachteln von Anfragen	349
8.5	Weitere Phasen der Optimierung	353

8.6	Vertiefende Literatur	354
8.7	Übungen	355
9	Logische Optimierung	357
9.1	Algebraische Optimierung	358
9.1.1	Entfernen redundanter Operationen	359
9.1.2	Änderung der Reihenfolge von Operationen	360
9.1.3	Optimierungsregeln	361
9.1.4	Ein einfacher Optimierungsalgorithmus	364
9.1.5	Vorgruppierungen	367
9.1.6	Erkennung gemeinsamer Teilanfragen	369
9.1.7	Ergebnis der algebraischen Optimierung	370
9.2	Verbundoptimierung mit Tableaus	370
9.2.1	Tableaus – Eine informale Einführung	371
9.2.2	Formale Definition einer Tableau-Anfrage	373
9.2.3	Konstruktion einer Tableau-Anfrage	376
9.2.4	Äquivalenz von Tableau-Anfragen	379
9.2.5	Minimalität	380
9.2.6	Optimierung von Tableau-Anfragen	381
9.2.7	Erweiterung der Tableau-Optimierung	384
9.3	Semantische Optimierung	385
9.3.1	Darstellungsvarianten für Anfragen	386
9.3.2	Berücksichtigung von Integritätsbedingungen	387
9.3.3	Äquivalenz von Anfragen unter Integritätsbedingungen	390
9.3.4	Tableau-Optimierung mit CHASE	391
9.4	Vertiefende Literatur	395
9.5	Übungen	396
10	Interne Optimierung und kostenbasierte Planauswahl	399
10.1	Physische oder interne Optimierung	400
10.1.1	Planoperatoren und Planrepräsentation	401
10.1.2	Plangenerierung und Suchstrategien	412
10.2	Kostenmodelle und Kostenabschätzung	416
10.2.1	Komponenten von Kostenmodellen	416
10.2.2	Histogramme	422
10.2.3	Kostenabschätzungen am Beispiel	429
10.2.4	Statistiken in DBMS	433
10.3	Strategien zur kostenbasierten Planauswahl	435
10.3.1	Greedy-Suche	436
10.3.2	Dynamische Programmierung	438
10.3.3	Anfragedekomposition	442
10.3.4	Iterative Improvement und Simulated Annealing	445
10.3.5	Optimierung mit genetischen Algorithmen	448

10.4	Beeinflussung von Anfrageoptimierern	450
10.4.1	Ausgabe von Plänen	451
10.4.2	Optimizer Hints	454
10.5	Vertiefende Literatur	457
10.6	Übungen	458

III Transaktionsverarbeitung und Recovery 461

11	Transaktionsmodelle	463
11.1	Transaktionen im Mehrbenutzerbetrieb	463
11.2	Transaktionseigenschaften	465
11.3	Probleme im Mehrbenutzerbetrieb	467
11.3.1	Inkonsistentes Lesen: Nonrepeatable Read	468
11.3.2	Lesen inkonsistenter Zustände	469
11.3.3	Abhängigkeiten von nicht freigegebenen Daten: Dirty Read	469
11.3.4	Das Phantom-Problem	471
11.3.5	Verloren gegangene Änderungen: Lost Update	471
11.3.6	Integritätsverletzung durch Mehrbenutzer-Anomalie	472
11.3.7	Cursor-Referenzen	473
11.3.8	Problemklassifikation	474
11.3.9	Isolation: Serialisierbarkeit oder Snapshot Isolation	475
11.4	Serialisierbarkeit	476
11.4.1	Einführung in die Serialisierbarkeitsthematik	476
11.4.2	Der Begriff des Schedules	481
11.4.3	Grundlegende Definitionen	484
11.4.4	Das Konzept der Serialisierbarkeit	485
11.4.5	Sichtserialisierbarkeit	486
11.4.6	Konfliktserialisierbarkeit	489
11.4.7	Graphbasierter Test auf Konfliktserialisierbarkeit	491
11.4.8	Abgeschlossenheitseigenschaften	493
11.5	Transaktionsabbruch und Fehlersicherheit	496
11.5.1	Rücksetzbarkeit	497
11.5.2	Vermeidung kaskadierender Abbrüche	498
11.5.3	Striktheit	498
11.5.4	Rigoreuse Striktheit oder Strenge	500
11.5.5	Operationen für den Transaktionsabbruch	502
11.6	Mehrversionen-Serialisierbarkeit	504
11.6.1	Idee des MVCC	504
11.6.2	Ein- und Mehrversionen-Schedules	505
11.6.3	Serialisierbarkeitsgraph für MV-Schedules	508
11.6.4	Serielle und serialisierbare MV-Schedules	508

11.6.5	Mehrversionen-Serialisierbarkeitsgraph	510
11.6.6	MVCC in DBMS	513
11.7	Snapshot Isolation	514
11.7.1	Definition der Snapshot Isolation	515
11.7.2	Vergleich zur Serialisierbarkeit	516
11.7.3	Serialisierbare Snapshot Isolation	519
11.8	Ausnutzung semantischer Informationen	520
11.8.1	Vertauschbarkeit von Operationen	520
11.8.2	Kompensierende Aktionen	523
11.9	Vertiefende Literatur	525
11.10	Übungen	526
12	Transaktionsverwaltung	529
12.1	Der Scheduler	529
12.2	Sperrmodelle	532
12.2.1	Sperrdisziplin	532
12.2.2	Verklemmungen	533
12.2.3	Livelock-Problem	534
12.3	Sperrprotokolle	535
12.3.1	Notwendigkeit von Sperrprotokollen	535
12.3.2	Zwei-Phasen-Sperrprotokoll	536
12.3.3	Striktes und strenges Zwei-Phasen-Sperrprotokoll	538
12.3.4	Aggressive und konservative Protokolle	538
12.4	Sperrgranulate	539
12.4.1	Hierarchisches Sperren	540
12.4.2	Prädikatsperren	544
12.4.3	Baumprotokolle für Sperren in Indexstrukturen	545
12.5	Nichtsperrende Verfahren zur Synchronisation	549
12.5.1	Zeitmarkenverfahren	550
12.5.2	Serialisierbarkeitsgraphentester	553
12.5.3	Optimistische Verfahren	554
12.6	Mehrversionen-Synchronisation	557
12.6.1	Begrenzung der Anzahl der Versionen	557
12.6.2	Synchronisation von MV-Schedules	559
12.7	Commit-Protokolle	564
12.7.1	Verteiltes Commit	564
12.7.2	Das Zwei-Phasen-Commit-Protokoll	565
12.7.3	Lineares 2PC	568
12.7.4	Verteiltes 2PC	570
12.7.5	Hierarchisches 2PC	571
12.7.6	Das Drei-Phasen-Commit-Protokoll	572
12.8	Transaktionen in SQL-DBMS	575
12.8.1	Aufweichung von ACID in SQL-92: Isolationsebenen	575

12.8.2	Explizite Sperren in SQL	577
12.9	Vertiefende Literatur	579
12.10	Übungen	579
13	Wiederherstellung und Datensicherung	581
13.1	Beteiligte Systemkomponenten	582
13.2	Fehlerklassifikation und Recovery-Klassen	584
13.2.1	Fehlerklassifikation	584
13.2.2	Fehlerkategorien und zugehörige Recovery-Maßnahmen	587
13.3	Protokollierungsarten	588
13.3.1	Aufbau des Logbuchs	588
13.3.2	Physisches vs. logisches Logbuch	591
13.3.3	Sicherungspunkte	595
13.4	Recovery-Strategien	599
13.4.1	Seitenersetzungsstrategien	599
13.4.2	Propagierungsstrategien	600
13.4.3	Einbringstrategien	601
13.4.4	Konkrete Recovery-Strategien	602
13.4.5	Wiederanlauf nach einem Fehlerfall	604
13.4.6	Das REDO-Protokoll als konkrete Realisierung	605
13.4.7	Abbrüche im Recovery-Prozess	606
13.5	Das ARIES-Verfahren	607
13.5.1	Vorgehensweise in ARIES	607
13.5.2	Grundprinzipien und Datenstrukturen	608
13.5.3	Phasen des Wiederanlaufs	609
13.6	Schattenspeicherverfahren	611
13.7	Backup-Strategien und Archivierung	613
13.7.1	Backups und Archivierung	614
13.7.2	Spiegelung von Datenbanken	616
13.8	Vertiefende Literatur	616
13.9	Übungen	617
IV	Aktuelle Entwicklungen	619
14	Moderne Datenbanksystem-Architekturen	621
14.1	Alternative Speichermodelle: DSM und PAX	622
14.2	Kompression von Daten	625
14.3	Multicore- und Spezialprozessoren	632
14.3.1	Hashverbunde für Multicore-Systeme	633
14.3.2	GPGPU-Beschleunigung von Datenbankoperationen	635
14.4	Alternative transaktionale Garantien	638
14.4.1	Von ACID zu BASE	639
14.4.2	Das CAP-Theorem	640

14.4.3	Abgeschwächte Konsistenzmodelle	642
14.5	Vertiefende Literatur	644
	Laufendes Beispiel	647
	Abbildungsverzeichnis	651
	Tabellenverzeichnis	660
	Liste der Codefragmente	663
	Sachindex	665
	Literaturverzeichnis	679