

*Gunter Saake
Andreas Heuer
Kai-Uwe Sattler*

Datenbanken Implementierungstechniken

2., aktualisierte und erweiterte Auflage



Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 2. Auflage	v
Vorwort	vii
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 Datenmodelle und Datendefinition	6
1.1.4 Anfrage- und Änderungsoperationen	9
1.1.5 Sprachen und Sichten	11
1.2 Überblick über behandelte Komponenten	14
1.2.1 Optimierer	14
1.2.2 Dateiorganisation und Zugriffspfade	19
1.2.3 Transaktionen	22
1.2.4 Recovery und Datensicherheit	29
1.2.5 Wann kommt was?	31
1.3 Beispielanwendung	32
1.4 Vertiefende Literatur	33
1.5 Übungen	34
2 Architektur von Datenbanksystemen	37
2.1 Betrachtete Fragestellungen	38
2.2 Schichtenmodell eines relationalen DBMS	40
2.3 Hardware und Betriebssystem	43
2.4 Pufferverwaltung	46
2.5 Speichersystem	48
2.6 Zugriffssystem	49
2.7 Datensystem	53
2.8 Varianten der Schichtenarchitektur	54
2.8.1 Client-Server-Systeme	54
2.8.2 Architekturen objektorientierter Datenbanksysteme	55
2.8.3 Weitere Architekturen	58

2.9	Katalog und Data Dictionary	61
2.10	Architekturen konkreter DBMS	63
2.11	Vertiefende Literatur	70
2.12	Übungen	70
3	Verwaltung des Hintergrundspeichers	73
3.1	Speichermedien	74
3.1.1	Speicherhierarchie	74
3.1.2	Cache, Hauptspeicher und Sekundärspeicher	77
3.1.3	Die Magnetplatte	77
3.1.4	Speicherkapazität, Geschwindigkeit und Kosten	80
3.2	Speicherarrays: RAID	84
3.2.1	Ziele von RAID-Systemen	84
3.2.2	RAID-Levels	85
3.3	Sicherungsmedien: Tertiärspeicher	91
3.3.1	Optische Platten	92
3.3.2	Bänder	93
3.3.3	Jukeboxes und Roboter	93
3.3.4	Langzeitarchivierung	94
3.4	Verwaltung des Hintergrundspeichers	95
3.4.1	Betriebssystemdateien	96
3.4.2	Abbildung der konzeptuellen Ebene auf interne Strukturen	97
3.4.3	Einpassen von Datensätzen auf Blöcke	98
3.4.4	Modell des Sekundärspeichers	100
3.5	Seiten, Sätze und Adressierung	100
3.5.1	Struktur der Seiten	100
3.5.2	Satztypen	102
3.5.3	Adressierung von Datensätzen	108
3.6	Pufferverwaltung im Detail	110
3.6.1	Die mangelnde Eignung des Betriebssystem-Puffers	111
3.6.2	Suchen einer Seite	113
3.6.3	Speicherzuteilung im Puffer	114
3.6.4	Seitenersetzungsstrategien	115
3.7	Einsatz kryptographischer Methoden	124
3.8	Speicherorganisation in konkreten DBMS	127
3.8.1	Oracle	127
3.8.2	DB2	131
3.8.3	SQL Server	133
3.8.4	Informix	135
3.9	Vertiefende Literatur	137
3.10	Übungen	138

4	Dateiorganisation und Zugriffsstrukturen	139
4.1	Klassifikation der Speichertechniken	140
4.1.1	Primärschlüssel vs. Sekundärschlüssel	141
4.1.2	Primärindex vs. Sekundärindex	142
4.1.3	Dateiorganisationsform vs. Zugriffspfad	143
4.1.4	Dünn besetzter vs. dicht besetzter Index	144
4.1.5	Geclusterter vs. nicht-geclusterter Index	145
4.1.6	Schlüsselzugriff vs. Schlüsseltransformation	147
4.1.7	Ein-Attribut- vs. Mehr-Attribut-Index	147
4.1.8	Eindimensionale vs. mehrdimensionale Zugriffsstruktur	148
4.1.9	Nachbarschaftserhaltende vs. streuende Zugriffsstruktur	149
4.1.10	Statische vs. dynamische Zugriffsstruktur	149
4.1.11	Beispiele für Klassifikationen	150
4.1.12	Alternative Klassifikationen von Zugriffsverfahren . . .	151
4.1.13	Anforderung an Speichertechniken	152
4.2	Sequenzielle und indexierte Dateien	153
4.2.1	Heap-Organisation	153
4.2.2	Sequenzielle Speicherung	155
4.2.3	Indexsequenzielle Dateiorganisation	156
4.2.4	Indexiert-nichtsequenzieller Zugriffspfad	160
4.3	Baumverfahren	163
4.3.1	B-Bäume	163
4.3.2	Varianten von B-Bäumen	171
4.3.3	Tries und Präfix-Bäume	175
4.3.4	B-Bäume in der Praxis	180
4.4	Hashverfahren	182
4.4.1	Grundprinzipien von Hashverfahren	182
4.4.2	Hashverfahren für Datenbanken	184
4.4.3	Hashfunktionen mit erweiterbarem Bildbereich	187
4.4.4	Lineares Hashen	188
4.4.5	Erweiterbares Hashen	191
4.4.6	Spiral-Hashen	194
4.4.7	Kombinierte Methoden	197
4.5	Mehrdimensionale Speichertechniken	198
4.5.1	Mehrdimensionale Baumverfahren	199
4.5.2	Mehrdimensionales Hashen	204
4.5.3	Grid-File	208
4.6	Cluster-Bildung und Partitionierung	215
4.6.1	Index-organisierte Tabellen	216
4.6.2	Cluster für Verbundanfragen	217
4.6.3	Weitere Formen der Cluster-Bildung	220
4.6.4	Partitionierung	220
4.7	Physische Datendefinition und Umsetzung in SQL-Systemen .	222

4.7.1	Oracle	222
4.7.2	DB2	225
4.7.3	SQL Server	227
4.7.4	PostgreSQL	229
4.7.5	Ingres	229
4.7.6	Informix	232
4.8	Vertiefende Literatur	233
4.9	Übungen	234
5	Zugriffsstrukturen für spezielle Anwendungen und Systeme	237
5.1	Hierarchische und Netzwerk-Datenbanken	238
5.1.1	Netzwerk-Datenbanken	239
5.1.2	Hierarchische Datenbanken	242
5.2	Zugriffsstrukturen für Objektdatenbanken	244
5.2.1	Konzepte objektorientierter Datenbankmodelle	244
5.2.2	Objektorientierte Datenbankmodelle	248
5.2.3	Aufbau der internen Ebene	253
5.2.4	Implementierung der Objektidentität	255
5.2.5	Konzepte für die Speicherung von Klassen	256
5.2.6	Konzepte für Klassenhierarchien	259
5.2.7	Zugriffspfade für Klassen, Klassenhierarchien, Kompo- nentenhierarchien und Methoden	260
5.2.8	Objektpuffer	269
5.2.9	Pointer Swizzling	269
5.3	Geometrische Zugriffsstrukturen	271
5.3.1	Probleme und Aufgaben	272
5.3.2	Eignung klassischer Suchbäume und Indexstrukturen	275
5.3.3	Prinzipien nachbarschaftserhaltender Suchbäume	276
5.3.4	R-Bäume und Varianten	279
5.3.5	Rechteckspeicherung durch Punktdatenstrukturen	286
5.3.6	Klassifizierung und Vergleich	293
5.4	Zugriffsstrukturen für Multimedia-Datenbanken	294
5.4.1	Spezielle Anforderungen in Multimedia-Datenbanken	294
5.4.2	Kontinuierliche Datentypen	296
5.4.3	Hochdimensionale Indexe	297
5.4.4	Speicherung von Bildern	307
5.4.5	Video-Daten	311
5.4.6	Audio-Daten	317
5.4.7	Zusammengesetzte Multimedia-Dokumente	318
5.5	Information Retrieval	318
5.5.1	Anfragen an Volltexte	319
5.5.2	Zugriffsstrukturen für inhaltsbasierte Suche	321
5.6	Data Warehouse	324

5.6.1	Konzepte und Modelle für OLAP und Data Warehouse	325
5.6.2	Anforderungen an Zugriffsstrukturen für Data Warehouse und OLAP	326
5.6.3	Data Warehouse und klassische Datenbanken	330
5.6.4	Bitmap-Index	334
5.6.5	UB-Baum	337
5.7	Vertiefende Literatur	340
5.8	Übungen	343
6	Basisalgorithmen für Datenbankoperationen	345
6.1	Benötigte Grundalgorithmen	346
6.1.1	Parameter für Kostenbestimmung	346
6.1.2	Grundannahmen	348
6.1.3	Hauptspeicheralgorithmen	348
6.1.4	Zugriffe auf Datensätze	349
6.1.5	Externe und interne Sortieralgorithmen	350
6.2	Navigationsoperationen: Scans	351
6.2.1	Arten des Scans	352
6.2.2	Operationen auf Scans	353
6.2.3	Scan-Semantik	356
6.3	Unäre Operationen: Selektion, Projektion und Gruppierung	357
6.3.1	Selektion	357
6.3.2	Projektion	359
6.3.3	Aggregatfunktionen und Gruppierung	359
6.4	Binäre Operationen: Mengenoperationen	363
6.4.1	Techniken für binäre Operatoren	363
6.4.2	Klassen binärer Operatoren	365
6.4.3	Vereinigung mit Duplikateliminierung	366
6.5	Berechnung von Verbunden	367
6.5.1	Nested-Loops-Verbund	368
6.5.2	Merge-Techniken	370
6.5.3	Hash-Verbund	372
6.5.4	Vergleich der Techniken	376
6.6	Vertiefende Literatur	378
6.7	Übungen	378
7	Optimierung von Anfragen	381
7.1	Grundprinzipien der Optimierung	382
7.2	Motivierende Beispiele	383
7.3	Phasen der Anfragebearbeitung	388
7.4	Anfrageübersetzung und -vereinfachung	391
7.4.1	Parsen und Analysieren der Anfrage	391
7.4.2	Übersetzung in Relationalalgebra	392

7.4.3	Auflösung von Sichten	394
7.4.4	Standardisierung und Vereinfachung von Ausdrücken	395
7.4.5	Entschachteln von Anfragen	397
7.5	Logische Optimierung	400
7.5.1	Algebraische Optimierung	401
7.5.2	Verbundoptimierung mit Tableaus	413
7.6	Physische Optimierung und kostenbasierte Auswahl	426
7.6.1	Planoperatoren und Planrepräsentation	427
7.6.2	Plangenerierung und Suchstrategien	436
7.6.3	Kostenmodelle und Kostenabschätzung	440
7.6.4	Strategien zur kostenbasierten Planauswahl	456
7.7	Konkrete Optimierer	472
7.7.1	Oracle	472
7.7.2	DB2	478
7.7.3	SQL Server	482
7.7.4	PostgreSQL	486
7.7.5	Ingres	488
7.7.6	Informix	490
7.7.7	Optimierer-Generatoren	491
7.8	Vertiefende Literatur	492
7.9	Übungen	494
8	Transaktionsmodelle	497
8.1	Transaktionen im Mehrbenutzerbetrieb	497
8.2	Transaktionseigenschaften	499
8.3	Probleme im Mehrbenutzerbetrieb	500
8.3.1	Inkonsistentes Lesen: Nonrepeatable Read	501
8.3.2	Lesen inkonsistenter Zustände	502
8.3.3	Abhängigkeiten von nicht freigegebenen Daten: Dirty Read	503
8.3.4	Das Phantom-Problem	503
8.3.5	Verloren gegangene Änderungen: Lost Update	504
8.3.6	Integritätsverletzung durch Mehrbenutzer-Anomalie	505
8.3.7	Cursor-Referenzen	506
8.3.8	Problemklassifikation	507
8.4	Serialisierbarkeit	508
8.4.1	Einführung in die Serialisierbarkeitsthematik	508
8.4.2	Der Begriff des Schedules	514
8.4.3	Grundlegende Definitionen	517
8.4.4	Das Konzept der Serialisierbarkeit	518
8.4.5	Sichtserialisierbarkeit	519
8.4.6	Konfliktserialisierbarkeit	521
8.4.7	Graphbasierter Test auf Konfliktserialisierbarkeit	524

8.4.8	Abgeschlossenheitseigenschaften	526
8.5	Transaktionsabbruch und Fehlersicherheit	529
8.5.1	Rücksetzbarkeit	529
8.5.2	Vermeidung kaskadierender Abbrüche	530
8.5.3	Striktheit	531
8.5.4	Operationen für den Transaktionsabbruch	532
8.6	Ausnutzung semantischer Informationen	534
8.6.1	Vertauschbarkeit von Operationen	534
8.6.2	Kompensierende Aktionen	537
8.7	Erweiterte Transaktionsmodelle	539
8.7.1	Probleme mit ACID-Transaktionen	540
8.7.2	Prinzipien erweiterter Transaktionsmodelle	541
8.7.3	Von Transaktionen zu Workflows	549
8.8	Formalisierung von Transaktionsmodellen	550
8.8.1	Spezifikation von Transaktionsmodellen in ACTA	551
8.8.2	Formalisierung von Inter-Transaktionsbeziehungen	556
8.9	Vertiefende Literatur	566
8.10	Übungen	568
9	Transaktionsverwaltung	573
9.1	Der Scheduler	573
9.2	Sperrmodelle	576
9.2.1	Sperrdisziplin	576
9.2.2	Verklemmungen	577
9.2.3	Livelock-Problem	579
9.3	Sperrprotokolle	579
9.3.1	Notwendigkeit von Sperrprotokollen	579
9.3.2	Zwei-Phasen-Sperrprotokoll	580
9.3.3	Striktes Zwei-Phasen-Sperr-Protokoll	581
9.3.4	Aggressive und konservative Protokolle	582
9.4	Sperrgranulate	583
9.4.1	Hierarchisches Sperren	584
9.4.2	Baumprotokolle für Sperren in Indexstrukturen	588
9.5	Nichtsperrrende Verfahren zur Synchronisation	590
9.5.1	Zeitmarkenverfahren	591
9.5.2	Serialisierbarkeitsgraphentester	594
9.5.3	Optimistische Verfahren	595
9.6	Multiversionen-Synchronisation	597
9.7	Transaktionen in SQL-Datenbanksystemen	600
9.7.1	Aufweichung von ACID in SQL-92: Isolationsebenen	600
9.7.2	Ingres	602
9.7.3	Oracle	605
9.7.4	DB2 und Informix	606

9.8	Vertiefende Literatur	607
9.9	Übungen	607
10	Wiederherstellung und Datensicherung	609
10.1	Beteiligte Systemkomponenten	610
10.2	Fehlerklassifikation und Recovery-Klassen	612
10.2.1	Fehlerklassifikation	612
10.2.2	Fehlerkategorien und zugehörige Recovery-Maßnahmen	615
10.3	Protokollierungsarten	615
10.3.1	Aufbau des Logbuchs	616
10.3.2	Physisches versus logisches Logbuch	618
10.3.3	Sicherungspunkte	621
10.4	Recovery-Strategien	623
10.4.1	Seitenersetzungsstrategien	624
10.4.2	Propagierungsstrategien	624
10.4.3	Einbringstrategien	625
10.4.4	Konkrete Recovery-Strategien	626
10.4.5	Wiederanlauf nach einem Fehlerfall	628
10.4.6	Das REDO-Protokoll als konkrete Realisierung	629
10.4.7	Abbrüche im Recovery-Prozess	630
10.5	Das ARIES-Verfahren	631
10.5.1	Vorgehensweise in ARIES	631
10.5.2	Grundprinzipien und Datenstrukturen	632
10.5.3	Phasen des Wiederanlaufs	633
10.6	Schattenspeicherverfahren	635
10.7	Backup-Strategien und Archivierung	637
10.7.1	Backups und Archivierung	638
10.7.2	Spiegelung von Datenbanken	640
10.8	Recovery in SQL-DBMS	640
10.8.1	DB2	640
10.8.2	Oracle	641
10.8.3	SQL Server	642
10.8.4	PostgresSQL	642
10.8.5	Ingres	642
10.8.6	Informix	643
10.9	Vertiefende Literatur	643
10.10	Übungen	644
11	Verteilte Datenbanken	645
11.1	Architekturvarianten	646
11.1.1	Anforderungen an verteilte Datenhaltung	647
11.1.2	Spektrum der Realisierungsmöglichkeiten	648
11.2	Schema-Architektur für verteilte Datenbanken	650

11.3	Fragmentierung, Replikation und Allokation	653
11.3.1	Fragmentierung	654
11.3.2	Replikation und Allokation	658
11.3.3	Verteilter Katalog	663
11.4	Verteilte Anfragebearbeitung	663
11.4.1	Relationenalgebra auf Fragmenten	664
11.4.2	Lokalisierung von Operationen	665
11.4.3	Verteilter Verbund	666
11.4.4	Optimierung in verteilten Datenbanksystemen	670
11.5	Verteilte Transaktionen	671
11.5.1	Verteiltes Commit	671
11.5.2	Verteilte Synchronisation	681
11.5.3	Transaktionen auf Replikaten	685
11.5.4	Verteilte Deadlock-Erkennung	686
11.6	Verteilte SQL-Systeme	689
11.6.1	Prototypen	689
11.6.2	Oracle	690
11.6.3	Realisierungen in weiteren kommerziellen Systemen	692
11.7	Transaktionsmonitore	693
11.8	Vertiefende Literatur	695
11.9	Übungen	696
12	Föderierte und parallele Datenbanken	697
12.1	Heterogenität und Autonomie	699
12.1.1	Heterogenität	699
12.1.2	Autonomie	700
12.2	Architektur föderierter Datenbanksysteme	701
12.2.1	Fünf-Ebenen-Schema-Architektur nach Sheth und Larson	701
12.2.2	Alternative Ansätze für Schema-Architekturen	704
12.2.3	Mediatoren versus Föderationen	706
12.2.4	Einbindung weiterer Datenquellen	708
12.3	Implementierungsaspekte: Anfragen, Integrität, Transaktionen	710
12.3.1	Anfragen in FDBS	711
12.3.2	Integritätssicherung in FDBS	712
12.3.3	Transaktionen	713
12.4	Multidatenbanksysteme und -sprachen	718
12.5	Parallele Datenbanksysteme	720
12.5.1	Architektur paralleler DBMS	720
12.5.2	Partitionierungsstrategien	721
12.5.3	Parallele Anfragebearbeitung	721
12.6	Datenbankmaschinen	724
12.6.1	Ansatzpunkte für Spezial-Hardware	725

12.6.2	Spezielle Datenstrukturen und Algorithmen	726
12.6.3	Einige bekannte Systeme	727
12.7	Vertiefende Literatur	727
12.8	Übungen	729
13	Neuere Entwicklungen und Ausblick	731
13.1	Erweiterbare Datenbanksysteme	732
13.1.1	Ebenen der Erweiterbarkeit	732
13.1.2	Realisierung der Erweiterbarkeit	733
13.1.3	Erweiterbarkeit in kommerziellen Systemen	735
13.2	Verarbeitung von Datenströmen	739
13.2.1	Datenmodelle und Anfragesprachen	742
13.2.2	Anfrageoperatoren	745
13.2.3	Anfrageoptimierung und Scheduling	749
13.2.4	Konkrete Systeme	754
13.3	Massiv verteiltes Datenmanagement	755
13.3.1	Peer-to-Peer-Systeme	755
13.3.2	Unstrukturierte P2P-Systeme	757
13.3.3	Strukturierte P2P-Systeme	763
13.3.4	Schemabasierte P2P-Systeme	770
13.4	Vertiefende Literatur	774
A	Beispieldatenbank	777
B	Physischer Datenbankentwurf und Tuning	779
C	Verzeichnis der Abkürzungen	783
	Verzeichnis der Abbildungen	787
	Verzeichnis der Tabellen	797
	Literaturverzeichnis	799
	Sachindex	839
	Personenindex	861
	Schlüsselwortindex	865