

*Gunter Saake  
Kai-Uwe Sattler  
Andreas Heuer*

# **Datenbanken Implementierungstechniken**

**Dritte Auflage**



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>v</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>1 Aufgaben und Prinzipien von Datenbanksystemen</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Architektur von Datenbanksystemen</b>	<b>21</b>
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

<b>3</b>	<b>Verwaltung des Hintergrundspeichers</b>	<b>43</b>
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
<b>4</b>	<b>Pufferverwaltung</b>	<b>101</b>
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

<b>5</b>	<b>Dateiorganisation und Zugriffsstrukturen</b>	<b>127</b>
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	Geclusterter 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 Datenban- ken . . . . .	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
<b>6</b>	<b>Spezielle Indexstrukturen</b>	<b>197</b>
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-Indexen . . . . .	264
6.5.2	Varianten von Bitmap-Indexen . . . . .	265
6.5.3	Implementierung von Bitmap-Indexen . . . . .	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
<b>7</b>	<b>Basisalgorithmen für Datenbankoperationen</b> . . . . .	<b>285</b>
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
<b>8</b>	<b>Optimierung von Anfragen</b>	<b>335</b>
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
<b>9</b>	<b>Transaktionsmodelle</b>	<b>439</b>
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
<b>10</b>	<b>Transaktionsverwaltung</b>	<b>495</b>
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

<b>11 Wiederherstellung und Datensicherung</b>	<b>543</b>
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
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>580</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>589</b>
<b>Liste der Codefragmente</b>	<b>591</b>
<b>Sachindex</b>	<b>593</b>
<b>Schlüsselwortindex</b>	<b>605</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>609</b>