Session 14 – Transaktionen & ACID

> **Session-Typ:** Vorlesung **Dauer:** 90 Minuten **Lernziele:** ACID verstehen, Transaktionssteuerung anwenden, Isolation Levels vergleichen

Willkommen zu Session 14! Heute geht es um eines der fundamentalsten Konzepte relationaler Datenbanksysteme: Transaktionen und ACID. Wir haben bisher viel über SQL-Abfragen, Modellierung und komplexe Queries gelernt – aber was passiert, wenn mehrere Nutzer gleichzeitig auf dieselben Daten zugreifen? Wie garantieren wir Konsistenz bei Systemausfällen? Diese Fragen beantworten Transaktionen.

Motivation: Warum Transaktionen?

Szenario: Geldüberweisung zwischen Konten

Stellen Sie sich vor, Sie überweisen 100 Euro von Konto A nach Konto B. Das klingt simpel, aber technisch sind das zwei separate Operationen: Erst wird Konto A belastet, dann Konto B gutgeschrieben. Was passiert, wenn zwischen diesen beiden Schritten der Server abstürzt? Oder wenn eine andere Transaktion genau in diesem Moment auf Konto A zugreift?

Ohne Transaktionen: Probleme

```sql
-- Schritt 1: 100 Euro von Konto A abziehen
UPDATE accounts SET balance = balance - 100 WHERE id = 'A';

-- ❌ Server-Crash hier!

-- Schritt 2: 100 Euro auf Konto B gutschreiben (wird nie ausgeführt)
UPDATE accounts SET balance = balance + 100 WHERE id = 'B';
```

Ergebnis: 100 Euro sind verschwunden! Konto A ist belastet, aber Konto B wurde nie gutgeschrieben.

Genau solche Inkonsistenzen verhindern Transaktionen. Eine Transaktion ist eine logische Arbeitseinheit, die garantiert, dass entweder alle Operationen erfolgreich durchgeführt werden – oder gar keine. Das ist das „Alles-oder-Nichts“-Prinzip.

Mit Transaktionen: Atomar & Sicher

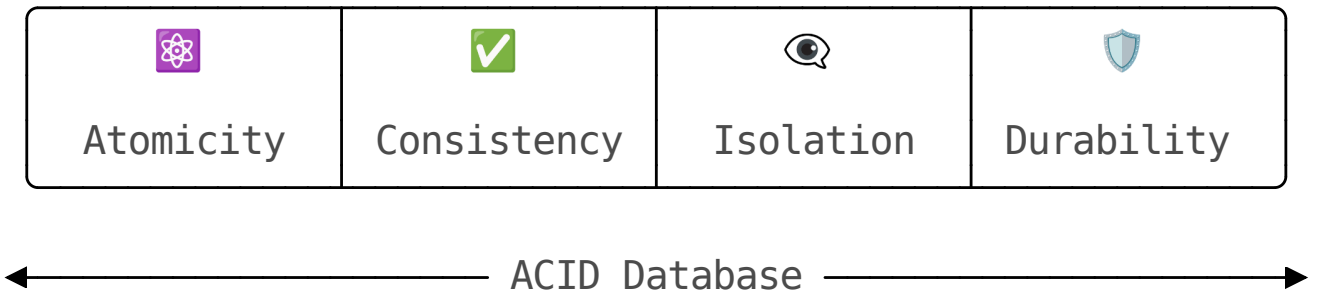
```sql
BEGIN TRANSACTION;

-- Schritt 1: 100 Euro von Konto A abziehen
UPDATE accounts SET balance = balance - 100 WHERE id = 'A';

-- Schritt 2: 100 Euro auf Konto B gutschreiben
UPDATE accounts SET balance = balance + 100 WHERE id = 'B';
```

```
COMMIT; -- Erst jetzt werden beide Änderungen dauerhaft gespeichert
```

Garantie: Wenn `COMMIT` erfolgreich ist, sind beide Änderungen persistent. Bei einem Fehler vor `COMMIT` wird automatisch `ROLLBACK` ausgeführt – keine Änderung bleibt bestehen.
Eine Transaktion ist also ein Paket mit Garantiesiegel: Entweder kommt alles an – oder gar nichts. Damit sind wir schon beim ersten Buchstaben von ACID.

ACID-Eigenschaften

ACID ist ein Akronym für vier fundamentale Eigenschaften, die jede Datenbanktransaktion erfüllen sollte: Atomicity, Consistency, Isolation und Durability. Diese Eigenschaften wurden in den 1980ern von Jim Gray definiert und sind bis heute der Goldstandard für transaktionale Systeme.



A – Atomicity (Atomarität)

Atomarität bedeutet: Eine Transaktion ist eine unteilbare Einheit. Entweder werden alle Operationen ausgeführt – oder keine. Es gibt keine Zwischenzustände, die nach außen sichtbar sind.

Metapher: Wie ein Atom (griech. „átomos“ = unteilbar) ist eine Transaktion eine Einheit, die nicht weiter zerlegbar ist.

Beispiel:

Aktion	Ohne Atomarität	Mit Atomarität
UPDATE accounts A	✅ Erfolg	✅ Erfolg
❌ Server-Crash	💥 Inkonsistenter Zustand	✅ Automatisches ROLLBACK
UPDATE accounts B	❌ Wird nie ausgeführt	❌ Beide Updates rückgängig

C – Consistency (Konsistenz)

Konsistenz bedeutet: Eine Transaktion überführt die Datenbank von einem gültigen Zustand in einen anderen gültigen Zustand. Alle Constraints, Trigger und Integritätsbedingungen werden eingehalten – vor und nach der Transaktion.

Beispiel:

```
-- Constraint: Balance darf nie negativ werden
ALTER TABLE accounts ADD CONSTRAINT balance_positive CHECK (balance >= 0);

BEGIN TRANSACTION;
UPDATE accounts SET balance = balance - 1000 WHERE id = 'A';
-- ❌ Fehler: Constraint verletzt → automatisches ROLLBACK
COMMIT; -- wird nie erreicht
```

Garantie: Die Datenbank bleibt in einem konsistenten Zustand – Constraints werden *immer* durchgesetzt.

I – Isolation

Isolation bedeutet: Parallel laufende Transaktionen beeinflussen sich nicht gegenseitig. Jede Transaktion hat die Illusion, als wäre sie allein auf der Datenbank. Wie stark diese Isolation ist, können wir über Isolation Levels steuern – dazu gleich mehr.

Beispiel: Ticketbuchung

Zeitpunkt	Nutzer A	Nutzer B
T1	`SELECT * FROM tickets WHERE seat = '12A'`	
T2		`SELECT * FROM tickets WHERE seat = '12A'`
T3	`UPDATE tickets SET reserved = true WHERE seat = '12A'`	
T4		`UPDATE tickets SET reserved = true WHERE seat = '12A'`

Ohne Isolation: Beide sehen Sitz 12A als frei → Doppelbuchung!
Mit Isolation: Nutzer B muss warten, bis Nutzer A seine Transaktion abgeschlossen hat.

D – Durability (Dauerhaftigkeit)

Dauerhaftigkeit bedeutet: Sobald eine Transaktion mit COMMIT bestätigt wurde, sind die Änderungen dauerhaft gespeichert – selbst wenn direkt danach ein Stromausfall oder Server-Crash passiert.

Technische Umsetzung:

- **Write-Ahead Log (WAL):** Änderungen werden zuerst in ein Log geschrieben (auf Festplatte), bevor die Datenbank-Seiten aktualisiert werden.
- **Crash Recovery:** Nach einem Neustart liest die Datenbank das WAL und stellt den Zustand wieder her.

Garantie: Nach `COMMIT` geht keine Änderung verloren – auch bei Hardware-Ausfällen.

Diese vier Eigenschaften zusammen machen Transaktionen zum Rückgrat relationaler Datenbanksysteme. Aber wie steuern wir Transaktionen konkret in SQL?

Transaktionssteuerung in SQL

Basic Commands

In SQL steuern wir Transaktionen mit vier grundlegenden Befehlen: BEGIN zum Starten, COMMIT zum Bestätigen, ROLLBACK zum Rückgängigmachen und SAVEPOINT für partielle Rollbacks.

`BEGIN` / `START TRANSACTION`

Startet eine neue Transaktion. Ab jetzt werden alle Änderungen zunächst nur temporär gespeichert.

```
BEGIN TRANSACTION;
-- oder: START TRANSACTION;
```

`COMMIT`

Bestätigt alle Änderungen seit BEGIN. Ab jetzt sind sie dauerhaft und für andere sichtbar.

```
COMMIT;
```

`ROLLBACK`

Macht alle Änderungen seit BEGIN rückgängig. Die Datenbank kehrt zum Zustand vor BEGIN zurück.

```
ROLLBACK;
```

`SAVEPOINT`

Setzt einen Zwischenpunkt innerhalb einer Transaktion. Erlaubt partielle Rollbacks.

```
BEGIN;
UPDATE accounts SET balance = balance - 100 WHERE id = 'A';

SAVEPOINT transfer_step1;
```

```
UPDATE accounts SET balance = balance + 100 WHERE id = 'B';
-- Fehler! Konto B existiert nicht

ROLLBACK TO transfer_step1; -- Nur Schritt 2 rückgängig, Schritt 1 bleibt
COMMIT;
```

Live-Demo: Geldüberweisung

Schauen wir uns das Ganze in Aktion an. Ich starte mit einer einfachen Konten-Tabelle und zeige, was mit und ohne Transaktion passiert.

```
1  CREATE TABLE accounts (
2      id TEXT PRIMARY KEY,
3      owner TEXT,
4      balance INTEGER CHECK (balance >= 0)
5  );
6
7  INSERT INTO accounts VALUES
8      ('A', 'Alice', 500),
9      ('B', 'Bob', 300);
10
11 SELECT * FROM accounts;
```

CREATE TABLE accounts (
id TEXT PRIMARY KEY,
owner TEXT,
balance INTEGER CHECK (balance >= 0)
)

ok

INSERT INTO accounts VALUES
('A', 'Alice', 500),
('B', 'Bob', 300)

ok

SELECT * FROM accounts

#	id	owner	balance
1	A	Alice	500
2	B	Bob	300

2 rows

Jetzt führen wir eine Überweisung ohne Transaktion durch – und simulieren einen Fehler nach dem ersten UPDATE.

```
-- Ohne Transaktion: Gefährlich!
UPDATE accounts SET balance = balance - 100 WHERE id = 'A';
-- ❌ Fehler: System-Crash simuliert
-- UPDATE accounts SET balance = balance + 100 WHERE id = 'B';

SELECT * FROM accounts;
-- Ergebnis: A hat 400 Euro, B hat 300 Euro → 100 Euro verschwunden!
```

-- Ohne Transaktion: Gefährlich!
UPDATE accounts SET balance = balance - 100 WHERE id = 'A'

ok

-- ❌ Fehler: System-Crash simuliert
-- UPDATE accounts SET balance = balance + 100 WHERE id = 'B';

SELECT * FROM accounts

#	id	owner	balance
1	B	Bob	300
2	A	Alice	400

2 rows

-- Ergebnis: A hat 400 Euro, B hat 300 Euro → 100 Euro verschwunden!

ok

Und jetzt dasselbe mit Transaktion. Wenn ein Fehler auftritt, wird automatisch ein ROLLBACK durchgeführt.

```
-- Reset
UPDATE accounts SET balance = 500 WHERE id = 'A';

BEGIN TRANSACTION;

UPDATE accounts SET balance = balance - 100 WHERE id = 'A';

-- Fehler simulieren (ungültige Constraint-Verletzung)
UPDATE accounts SET balance = balance + 100 WHERE id = 'Z'; -- Konto
  existiert nicht

ROLLBACK; -- Manuell rückgängig gemacht

```

```
13 SELECT * FROM accounts;
14 -- Ergebnis: A hat 500 Euro, B hat 300 Euro → Alles wie vorher!
```

-- Reset
UPDATE accounts SET balance = 500 WHERE id = 'A'

ok

BEGIN TRANSACTION

ok

UPDATE accounts SET balance = balance - 100 WHERE id = 'A'

ok

-- Fehler simulieren (ungültige Constraint-Verletzung)
UPDATE accounts SET balance = balance + 100 WHERE id = 'Z'

ok

-- Konto existiert nicht

ROLLBACK

ok

-- Manuell rückgängig gemacht

SELECT * FROM accounts

#	id	owner	balance
1	B	Bob	300
2	A	Alice	500

2 rows

-- Ergebnis: A hat 500 Euro, B hat 300 Euro → Alles wie vorher!

ok

Perfekt! Mit Transaktionen haben wir Atomarität garantiert. Aber was passiert, wenn mehrere Transaktionen parallel laufen? Hier kommen Isolation Levels ins Spiel.

Isolation Levels

Zeit	Transaction A	Transaction B

T1	`SELECT balance FROM accounts`
	`WHERE id = 'A'`
	Ergebnis → 100
		`SELECT balance FROM accounts`
		`WHERE id = 'A'`

Probleme bei parallelen Transaktionen

Isolation ist die komplizierteste der vier ACID-Eigenschaften. Warum? Weil perfekte Isolation extrem teuer ist – sie würde bedeuten, dass immer nur eine Transaktion gleichzeitig laufen darf. Deshalb gibt es verschiedene Isolation Levels, die einen Trade-off zwischen Konsistenz und Performance erlauben.

Welche Probleme können auftreten?

Wenn Transaktionen parallel laufen, gibt es vier klassische Anomalien:

1. Dirty Read (Schmutziges Lesen)

Transaktion A liest Daten, die von Transaktion B geändert, aber noch nicht committed wurden.

Zeit	Transaktion A	Transaktion B
T1		`UPDATE accounts SET balance = 1000` `WHERE id = 'A'`

T2	`SELECT balance FROM accounts`
	`WHERE id = 'A'`
	→ Ergebnis: 1000	

T3		`ROLLBACK;`
T4	– A hat 1000 gelesen, aber das war nie committed!	

Problem: A hat einen Wert gelesen, der nie existiert hat.

2. Non-Repeatable Read (Nicht-wiederholbares Lesen)

Transaktion A liest denselben Datensatz zweimal und bekommt unterschiedliche Werte.

Zeit	Transaktion A	Transaktion B
T1	`SELECT balance FROM accounts` `WHERE id = 'A'` → Ergebnis: 500	
T2		`UPDATE accounts SET balance = 1000` `WHERE id = 'A';` `COMMIT;`
T3	`SELECT balance FROM accounts` `WHERE id = 'A'` → Ergebnis: 1000	

Problem: A liest zweimal – und bekommt unterschiedliche Ergebnisse innerhalb derselben Transaktion.

3. Phantom Read (Phantom-Lesen)

Transaktion A führt dieselbe Abfrage zweimal aus und findet beim zweiten Mal zusätzliche Zeilen.

Zeit	Transaktion A	Transaktion B
T1	`SELECT * FROM tickets` `WHERE reserved = false` → Ergebnis: 5 Tickets	
T2		`INSERT INTO tickets` `VALUES ('12F', false);` `COMMIT;`
T3	`SELECT * FROM tickets` `WHERE reserved = false` → Ergebnis: 6 Tickets	

Problem: Plötzlich sind neue Zeilen aufgetaucht – wie ein Phantom.

4. Lost Update (Verlorenes Update)

Zwei Transaktionen lesen denselben Wert, ändern ihn parallel – und eine Änderung geht verloren.

Zeit	Transaktion A	Transaktion B
T1	`SELECT balance FROM accounts WHERE id = 'A'` → Ergebnis: 500	`SELECT balance FROM accounts WHERE id = 'A'` → Ergebnis: 500
T2	balance = 500 - 100 = 400	balance = 500 + 200 = 700
T3	`UPDATE accounts SET balance = 400 WHERE id = 'A'; COMMIT;`	
T4		`UPDATE accounts SET balance = 700 WHERE id = 'A'; COMMIT;`

Problem: A's Update (400) wurde von B's Update (700) überschrieben. Die -100 sind verloren!

Die vier Isolation Levels

Um diese Probleme zu adressieren, definiert der SQL-Standard vier Isolation Levels – von schwach (schnell, aber unsicher) bis stark (sicher, aber langsam).

Isolation Level	Dirty Read	Non-Repeatable Read	Phantom Read	Lost Update
`READ UNCOMMITTED`	⚠️ Möglich	⚠️ Möglich	⚠️ Möglich	⚠️ Möglich
`READ COMMITTED`	✅ Verhindert	✅ Verhindert	⚠️ Möglich	⚠️ Möglich
`REPEATABLE READ`	✅ Verhindert	✅ Verhindert	⚠️ Möglich	✅ Verhindert
`SERIALIZABLE`	✅ Verhindert	✅ Verhindert	✅ Verhindert	✅ Verhindert

Standard in PostgreSQL: `READ COMMITTED`
Standard in MySQL: `REPEATABLE READ`

Wie setzen wir das in SQL? Mit dem SET TRANSACTION Befehl.

```sql
-- Isolation Level für die nächste Transaktion setzen
SET TRANSACTION ISOLATION LEVEL SERIALIZABLE;

BEGIN TRANSACTION;
-- Alle Operationen hier laufen mit SERIALIZABLE Isolation
COMMIT;
```

In der Praxis reicht `READ COMMITTED` für die meisten Anwendungen. Nur bei kritischen Operationen wie Ticketbuchungen oder Finanztransaktionen brauchen wir stärkere Isolation.

Praktische Beispiele

Szenario 1: Ticketbuchung

Schauen wir uns ein klassisches Concurrency-Problem an: Zwei Nutzer wollen gleichzeitig denselben Sitzplatz buchen.

```sql
CREATE TABLE tickets (
    seat TEXT PRIMARY KEY,
    reserved BOOLEAN DEFAULT false
);
```

```
);

INSERT INTO tickets VALUES ('12A', false), ('12B', false), ('12C', fa

-- Transaktion 1 (Nutzer Alice)
BEGIN TRANSACTION;
SELECT * FROM tickets WHERE seat = '12A' AND reserved = false;
-- Ergebnis: Sitz ist frei

-- 💥 Gleichzeitig startet Transaktion 2 (Nutzer Bob)
-- BEGIN TRANSACTION;
-- SELECT * FROM tickets WHERE seat = '12A' AND reserved = false;
-- Ergebnis: Sitz ist frei (falls READ COMMITTED)

UPDATE tickets SET reserved = true WHERE seat = '12A';
COMMIT;

-- Transaktion 2 würde jetzt ebenfalls versuchen:
-- UPDATE tickets SET reserved = true WHERE seat = '12A';
-- ❌ Mit SERIALIZABLE: Fehler oder Warten
-- ⚠️ Mit READ COMMITTED: Überschreibt still (Doppelbuchung!)
```

```
CREATE TABLE tickets (
    seat TEXT PRIMARY KEY,
    reserved BOOLEAN DEFAULT false
)
```

ok

```
INSERT INTO tickets VALUES ('12A', false), ('12B', false), ('12C', false)
```

ok

```
-- Transaktion 1 (Nutzer Alice)
BEGIN TRANSACTION
```

ok

```
SELECT * FROM tickets WHERE seat = '12A' AND reserved = false
```

#	seat	reserved
1	12A	false

1 rows

```
-- Ergebnis: Sitz ist frei

-- 💥 Gleichzeitig startet Transaktion 2 (Nutzer Bob)
-- BEGIN TRANSACTION;
-- SELECT * FROM tickets WHERE seat = '12A' AND reserved = false;
-- Ergebnis: Sitz ist frei (falls READ COMMITTED)

UPDATE tickets SET reserved = true WHERE seat = '12A'
```

ok

```
COMMIT
```

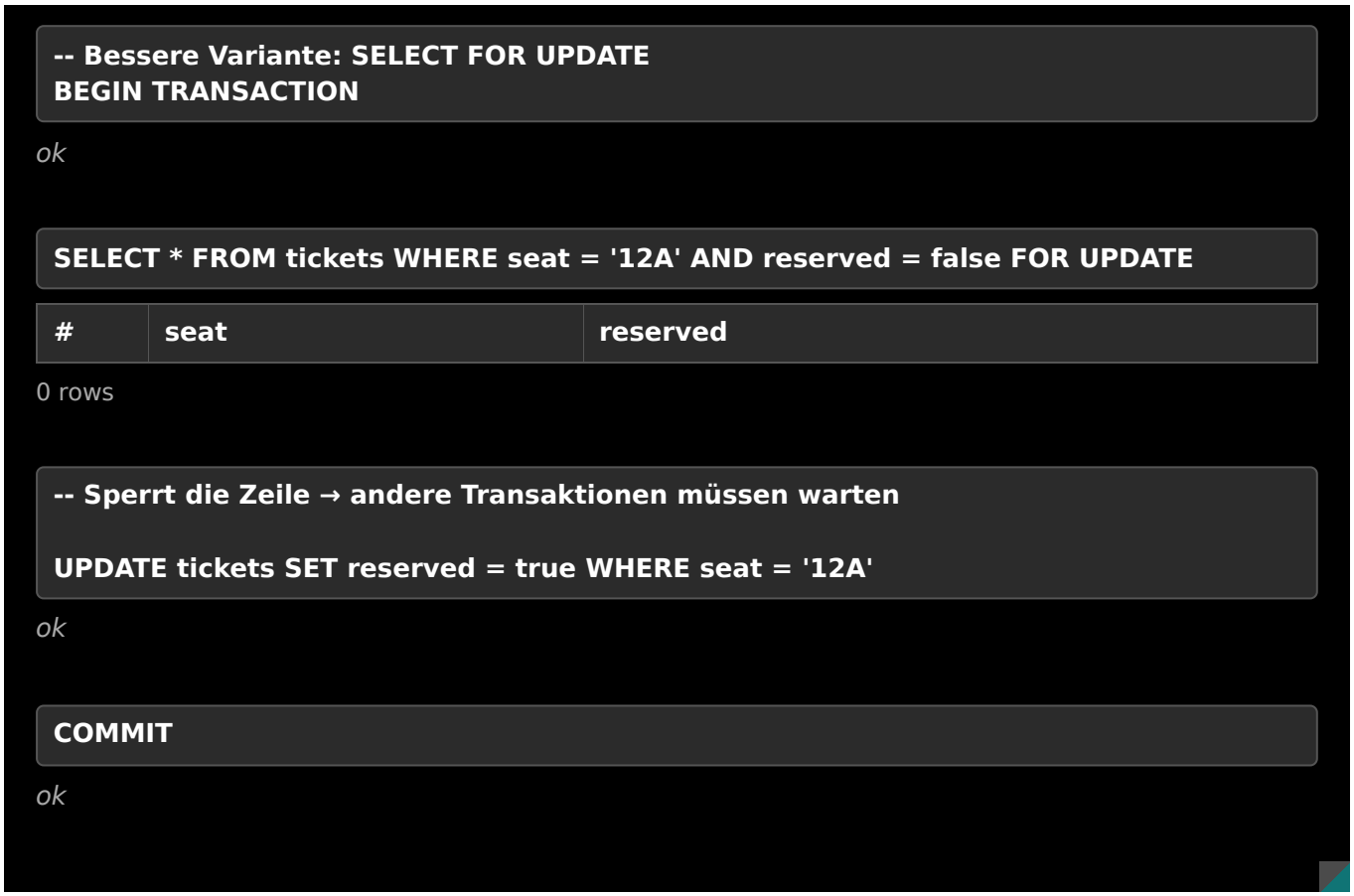
ok

```
-- Transaktion 2 würde jetzt ebenfalls versuchen:
-- UPDATE tickets SET reserved = true WHERE seat = '12A';
-- ❌ Mit SERIALIZABLE: Fehler oder Warten
-- ⚠️ Mit READ COMMITTED: Überschreibt still (Doppelbuchung!)
```

ok

Lösung: Verwende SERIALIZABLE oder SELECT FOR UPDATE, um den Sitz zu locken.

```sql
-- Bessere Variante: SELECT FOR UPDATE
BEGIN TRANSACTION;
SELECT * FROM tickets WHERE seat = '12A' AND reserved = false FOR UPDA
-- Sperrt die Zeile → andere Transaktionen müssen warten

UPDATE tickets SET reserved = true WHERE seat = '12A';
COMMIT;
```



Szenario 2: Inventarverwaltung

Ein weiteres Beispiel: Ein Online-Shop aktualisiert den Lagerbestand, während parallel eine Bestellung aufgegeben wird.

```sql
CREATE TABLE inventory (
    product_id TEXT PRIMARY KEY,
    stock INTEGER CHECK (stock >= 0)
);

INSERT INTO inventory VALUES ('laptop_123', 5);

-- Transaktion 1: Kunde kauft 2 Laptops
BEGIN TRANSACTION;
UPDATE inventory SET stock = stock - 2 WHERE product_id = 'laptop_123
COMMIT;

-- Transaktion 2: Lieferung kommt (3 neue Laptops)
```

```
14 BEGIN TRANSACTION;
15 UPDATE inventory SET stock = stock + 3 WHERE product_id = 'laptop_123
16 COMMIT;
17
18 SELECT * FROM inventory;
19 -- Ergebnis: stock = 6 (5 - 2 + 3)
```

```
CREATE TABLE inventory (
    product_id TEXT PRIMARY KEY,
    stock INTEGER CHECK (stock >= 0)
)
```

ok

```
INSERT INTO inventory VALUES ('laptop_123', 5)
```

ok

```
-- Transaktion 1: Kunde kauft 2 Laptops
BEGIN TRANSACTION
```

ok

```
UPDATE inventory SET stock = stock - 2 WHERE product_id = 'laptop_123'
```

ok

```
COMMIT
```

ok

```
-- Transaktion 2: Lieferung kommt (3 neue Laptops)
BEGIN TRANSACTION
```

ok

```
UPDATE inventory SET stock = stock + 3 WHERE product_id = 'laptop_123'
```

ok

```
COMMIT
```

ok

```
SELECT * FROM inventory
```

#	product_id	stock
1	laptop_123	6

1 rows

```
-- Ergebnis: stock = 6 (5 - 2 + 3)
```

```
ok
```

Hier ist READ COMMITTED ausreichend, da beide Transaktionen unabhängig sind – keine Konflikte.

Deadlocks

Ein Deadlock entsteht, wenn zwei Transaktionen gegenseitig aufeinander warten. Klassisches Beispiel: Transaktion A sperrt Zeile 1 und will Zeile 2, während Transaktion B Zeile 2 sperrt und Zeile 1 will.

Was ist ein Deadlock?

Zeit	Transaktion A	Transaktion B
T1	`UPDATE accounts SET balance = balance - 100 WHERE id = 'A'` → Sperrt Zeile A	`UPDATE accounts SET balance = balance - 50 WHERE id = 'B'` → Sperrt Zeile B
T2	`UPDATE accounts SET balance = balance + 100 WHERE id = 'B'` ⏳ Wartet auf Lock von B	`UPDATE accounts SET balance = balance + 50 WHERE id = 'A'` ⏳ Wartet auf Lock von A
T3	💀 Deadlock!	💀 Deadlock!

Beide warten ewig aufeinander.

Die Datenbank erkennt Deadlocks automatisch (über einen Deadlock Detector) und bricht eine der Transaktionen ab.

Deadlock-Erkennung

```
ERROR:  deadlock detected
DETAIL:  Process 1234 waits for ShareLock on transaction 5678;
         blocked by process 5678.
HINT:  See server log for query details.
```

Eine Transaktion wird automatisch mit ROLLBACK abgebrochen, die andere kann fortfahren.

Wie vermeiden wir Deadlocks? Konsistente Lock-Reihenfolge!

Deadlock-Vermeidung

Falsch (kann Deadlock verursachen):

```
-- Transaktion A
UPDATE accounts SET ... WHERE id = 'A';
UPDATE accounts SET ... WHERE id = 'B';

-- Transaktion B
UPDATE accounts SET ... WHERE id = 'B';
UPDATE accounts SET ... WHERE id = 'A';
```

Richtig (immer alphabetische Reihenfolge):

```
-- Transaktion A
UPDATE accounts SET ... WHERE id = 'A';
UPDATE accounts SET ... WHERE id = 'B';

-- Transaktion B
UPDATE accounts SET ... WHERE id = 'A'; -- Wartet auf A
UPDATE accounts SET ... WHERE id = 'B';
```

Regel: Immer Ressourcen in derselben Reihenfolge sperren.

Best Practices

Zum Abschluss noch ein paar praktische Tipps für den Umgang mit Transaktionen.

1. Transaktionen kurz halten

Warum? Lange Transaktionen sperren Ressourcen → andere müssen warten → Performance leidet.

Falsch:

```
BEGIN;
SELECT * FROM orders WHERE status = 'pending'; -- 10.000 Zeilen
-- 💤 Jetzt 5 Minuten warten, während Nutzer Eingaben macht...
UPDATE orders SET status = 'processed' WHERE id = 123;
COMMIT;
```

Richtig:

```
-- Lesen außerhalb der Transaktion
SELECT * FROM orders WHERE status = 'pending';

-- Transaktion nur für Updates
BEGIN;
UPDATE orders SET status = 'processed' WHERE id = 123;
COMMIT;
```

2. Explizites COMMIT/ROLLBACK

Warum? Autocommit ist praktisch für Ad-hoc-Queries, aber gefährlich in Produktionscode.

```
-- Explizit ist besser als implizit
BEGIN TRANSACTION;
-- Operationen
COMMIT;
```

3. Passenden Isolation Level wählen

Faustregel:

Anwendungsfall	Empfohlener Level
Analytics (Read-only)	`READ COMMITTED`
Standard CRUD	`READ COMMITTED`
Ticketbuchung, Sitzplätze	`SERIALIZABLE`
Finanztransaktionen	`SERIALIZABLE`
High-throughput Logging	`READ UNCOMMITTED` (sehr selten!)

4. Fehlerbehandlung mit ROLLBACK

```
// Create a table with sample data
await db.exec(`
  CREATE TABLE accounts (
      id TEXT,
      name TEXT,
      balance INTEGER CHECK (balance >= 0)
  );

  INSERT INTO accounts VALUES
      ('A', 'Alice', 1500),
      ('B', 'Bob', 2300);
`);

try {
    await db.exec("BEGIN TRANSACTION;");
    await db.exec("UPDATE accounts SET balance = balance - 100 WHERE
      'A';");
    // Simuliere einen Fehler
    //throw new Error("Simulierter Fehler während der Transaktion");
    await db.exec("UPDATE accounts SET balance = balance - 10000 WHER
```

```
      'B';");
    await db.exec("COMMIT;");
} catch (error) {
    await db.exec("ROLLBACK;");
    console.error(JSON.stringify(error, null, 2) || error.message);
}

let result = await db.query("SELECT * FROM accounts;");

console.debug(JSON.stringify(result, null, 2))
```

```
{
  "length": 226,
  "name": "error",
  "severity": "ERROR",
  "code": "23514",
  "detail": "Failing row contains (B, Bob, -7700).",
  "schema": "public",
  "table": "accounts",
  "constraint": "accounts_balance_check",
  "file": "execMain.c",
  "line": "2039",
  "routine": "ExecConstraints",
  "query": "UPDATE accounts SET balance = balance - 10000 WHERE id =
'B';"
}
{
  "rows": [
    {
      "id": "A",
      "name": "Alice",
      "balance": 1500
    },
    {
      "id": "B",
      "name": "Bob",
      "balance": 2300
    }
  ],
  "fields": [
    {
      "name": "id",
      "dataTypeID": 25
    },
    {
      "name": "name",
      "dataTypeID": 25
    },
    {
      "name": "balance",
      "dataTypeID": 23
    }
```

```
  ],
  "affectedRows": 0
}
```

5. Vermeide SELECT ohne WHERE in Transaktionen

Warum? Sperrt potenziell die ganze Tabelle.

```sql
-- ❌ Gefährlich
BEGIN;
SELECT * FROM orders FOR UPDATE; -- Sperrt alle Zeilen!
-- ...
COMMIT;

-- ✅ Besser
BEGIN;
SELECT * FROM orders WHERE id = 123 FOR UPDATE;
-- ...
COMMIT;
```

Zusammenfassung

Was haben wir heute gelernt? Transaktionen sind das Fundament für konsistente Datenbanken – sie garantieren ACID-Eigenschaften auch bei parallelen Zugriffen und Systemausfällen.

Kernpunkte

1. **Transaktionen** = Logische Arbeitseinheit („Alles oder Nichts“)
2. **ACID** = Atomicity, Consistency, Isolation, Durability
3. **SQL-Commands:** `BEGIN`, `COMMIT`, `ROLLBACK`, `SAVEPOINT`
4. **Isolation Levels:** Trade-off zwischen Konsistenz und Performance
   - `READ COMMITTED`: Standard, verhindert Dirty Reads
   - `SERIALIZABLE`: Maximale Isolation, aber teuer
5. **Probleme:** Dirty Reads, Non-Repeatable Reads, Phantom Reads, Lost Updates
6. **Deadlocks:** Automatisch erkannt, vermeidbar durch konsistente Lock-Reihenfolge
7. **Best Practices:** Kurze Transaktionen, explizite Steuerung, passender Isolation Level

---

Referenzen & Quellen

Dokumentation

- PostgreSQL: Transaction Isolation
- MySQL: InnoDB Locking
- SQLite: Transactions

Bücher

- Martin Kleppmann: „Designing Data-Intensive Applications“ (Kapitel 7: Transactions)
- Abraham Silberschatz et al.: „Database System Concepts“ (Kapitel 14: Transactions)

Papers

- Jim Gray: „The Transaction Concept: Virtues and Limitations“ (1981)
- ISO/IEC 9075: SQL Standard (Transaction Management)

Tools

- PostgreSQL EXPLAIN Visualizer
- SQL Fiddle – Test Isolation Levels online

Nächste Session: Performance Optimization – Indexe, Query Plans & Concurrency Control