3. Transaktionsmodelle

- **Ziel:**
  - Erweiterung/Modifikation des ACID-Transaktionsmodells
  - Beschreibungsverfahren, Nutzenbewertung, Einsatzbereiche
- **Kontrollbereiche – die Idee**
- **Beschreibung von Transaktionsmodellen**
  - Regelsprache
  - Regelstruktur und Regelsemantik
- **Gekettete Transaktionen**
  - Zusammenhang mit Sicherungspunkten
- **Geschachtelte Transaktionen**
  - Baumstruktur, Generalisierung von Sicherungspunkten
  - Vertiefung: Sperren
  - Freiheitsgrade
- **Verteilte Transaktionen**
- **Mehrebenen-Transaktionen**
  - offen geschachtelte Transaktionen
  - Einsatz von Kompensation bei offener Schachtelung
- **Langlebige Transaktionen**
  - Zerlegung in Mini-Batches
  - Sagas, geschachtelte Sagas

Klassifikation von Aktionstypen[1]

- **TA-Systeme**
  - brauchen nicht auf allen (Abstraktions-) Ebenen durch atomare Operationen aufgebaut werden
  - müssen nur durch geeignete Maßnahmen (Protokolle) ACID-Eigenschaften, wenn erforderlich, “nachbilden”

- **Ungeschützte Aktionen (UA)**
  - keine ACID-Eigenschaften, höchstens “ebenengerechte” Konsistenz
  - keine Atomarität: fast alles kann scheitern!
  - Beispiel: einfaches Schreiben

- **Geschützte Aktionen (GA)**
  - Ergebnisse “dringen nicht vor Beendigung” nach außen
  - sind rücksetzbar nach Fehlern
  - besitzen ACID-Eigenschaften

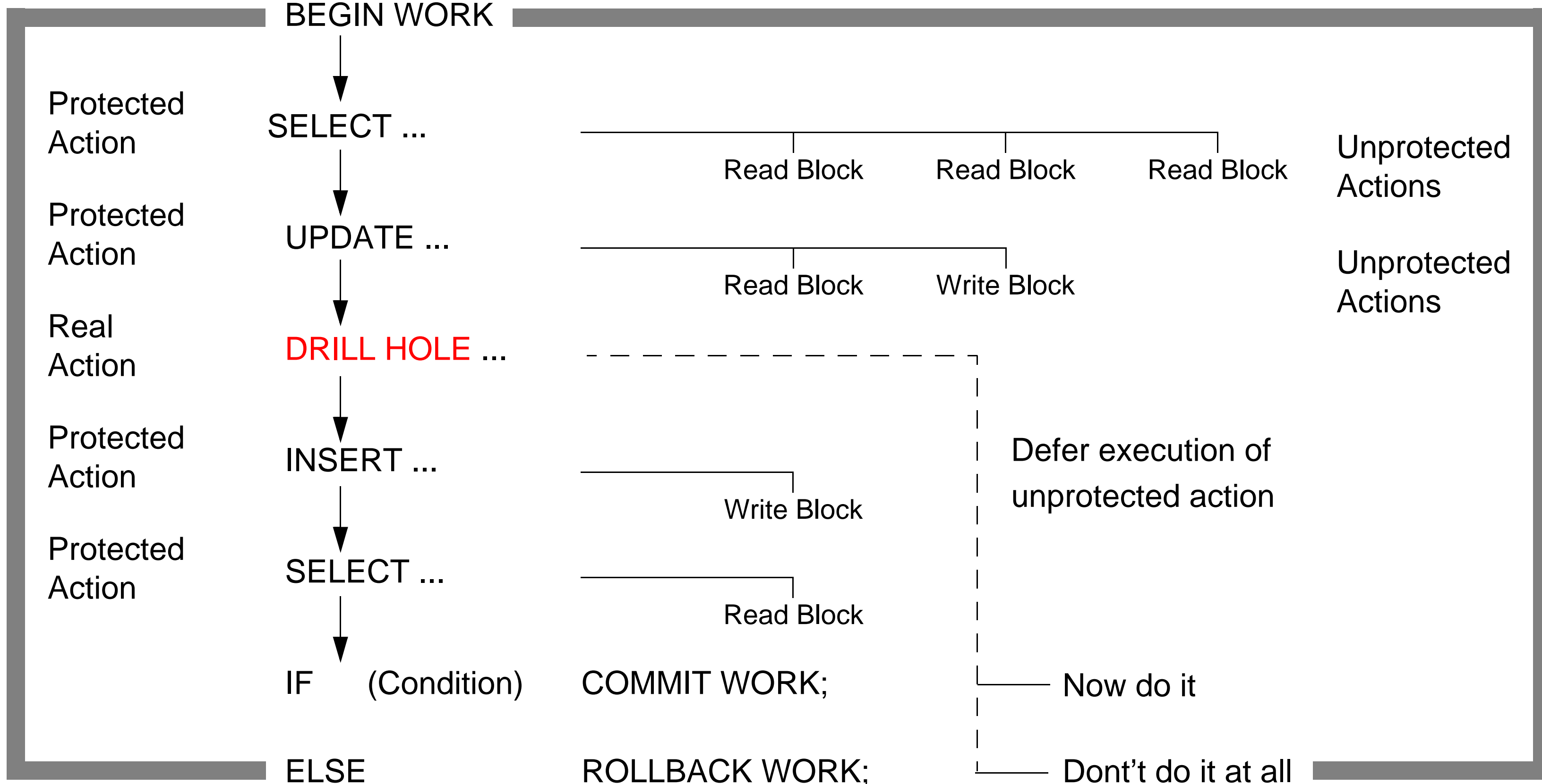
- **Reale Aktionen (RA)**
  - können konsistent sein und isoliert ablaufen: nach Ausführung sind sie dauerhaft
  - irreversibel in den meisten Fällen (Undo nicht möglich)

- **Daumenregeln**
  - UA müssen entweder von der Anwendungsumgebung kontrolliert werden oder in GA auf höherer Ebene eingebettet sein
  - GA sind die Bausteine für zuverlässige, verteilte Anwendungen
  - RA erfordern spezielle Behandlung: solange verzögern, bis die umgebende GA nicht mehr zurückgesetzt werden kann

---

1. Gray, J., Reuter, A.: Transaction Processing—Concepts and Techniques, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Mateo, CA., 1998 (5th printing)

Transaction



Recovery bei RA

- RA können meist nicht idempotent gemacht werden
- testbare und nicht-testbare RA: wichtig, um die richtigen Recovery-Aktionen durchzuführen

There is probably no good solution for non-testable real actions in any kind of environment (Gray, J., Reuter, A.)

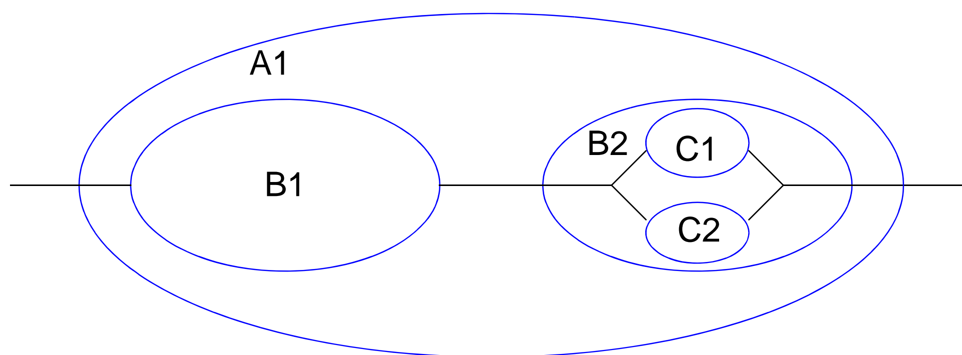
Kontrollbereiche – die Idee

- **Ausgangspunkt**

  Kontrolle von Programmausführungen in verteilten Mehrbenutzer-umgebungen bedeutet primär:

  - Auswirkungen beliebiger Operationen so lange begrenzen, bis sie mit Sicherheit nicht mehr zurückgesetzt werden müssen
  - Abhängigkeiten von Operationen voneinander aufzeichnen, um die Ausführungsfolge verfolgen zu können, falls zu irgendeinem Zeitpunkt fehlerhafte Daten gefunden werden

- **Spheres of Control (SoC)**: von Bjork und Davis, Anfang der 70-er



  - Unteilbare Prozesse: aus der Sicht der aufrufenden Schicht ununterbrechbare Operation
  - Zentrale Eigenschaft: Nebenwirkungsfreiheit unteilbarer Prozesse
  - Kontrollierte Übergabe von Änderungen (aus Kontrollbereich)
  - Informationen zugänglich für alle gleichzeitig ablaufenden Prozesse des nächstgrößeren Kontrollbereichs

  Â **Verzicht auf einseitiges Rücksetzen**

Kontrollbereiche – die Idee (2)

- **Definitionen**

  Prozesskontrolle

  - gewährleistet, dass Information, die von einem atomaren Prozess benötigt wird, nicht von anderen modifiziert wird
  - beschränkt Abhängigkeiten von Änderungen dieses Prozesses für andere Prozesse

  Prozess-Atomarität

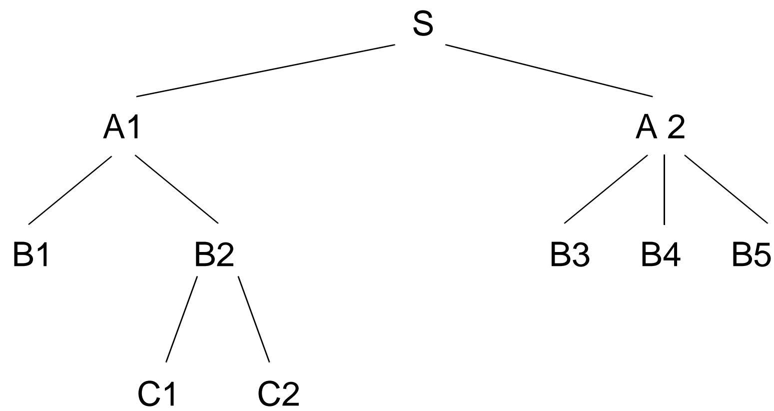
  - Verarbeitungsgranulat, als Einheit zu betrachten
  - von ihr eingeführte Verarbeitungskontrolle gestattet es, Operator als atomar auf einer Abstraktionsebene zu betrachten, auch wenn seine Implementierung aus vielen parallelen und/oder seriellen Operationen auf der nächst tieferen Ebene zusammengesetzt ist

  Prozessfreigabe

  - solange Funktion noch abgewickelt wird, bleiben ihre Zustandsänderungen lokal
  - solange Prozessfreigabe nicht erfolgt ist und Ergebnisse zurückgehalten (kontrolliert) werden, kann einseitiges Zurücksetzen (process undo) über viel größere Einheiten von Prozessen durchgeführt werden
  - Einseitiges Rücksetzen (unilateral backout) heißt hier: nicht von jedem Teilnehmer eines Prozesses muss ‘OK’ vorliegen
  - Kontrolle der Prozessfreigabe: Zurückhalten von Auswirkungen eines Prozesses, selbst über Prozessende hinaus.

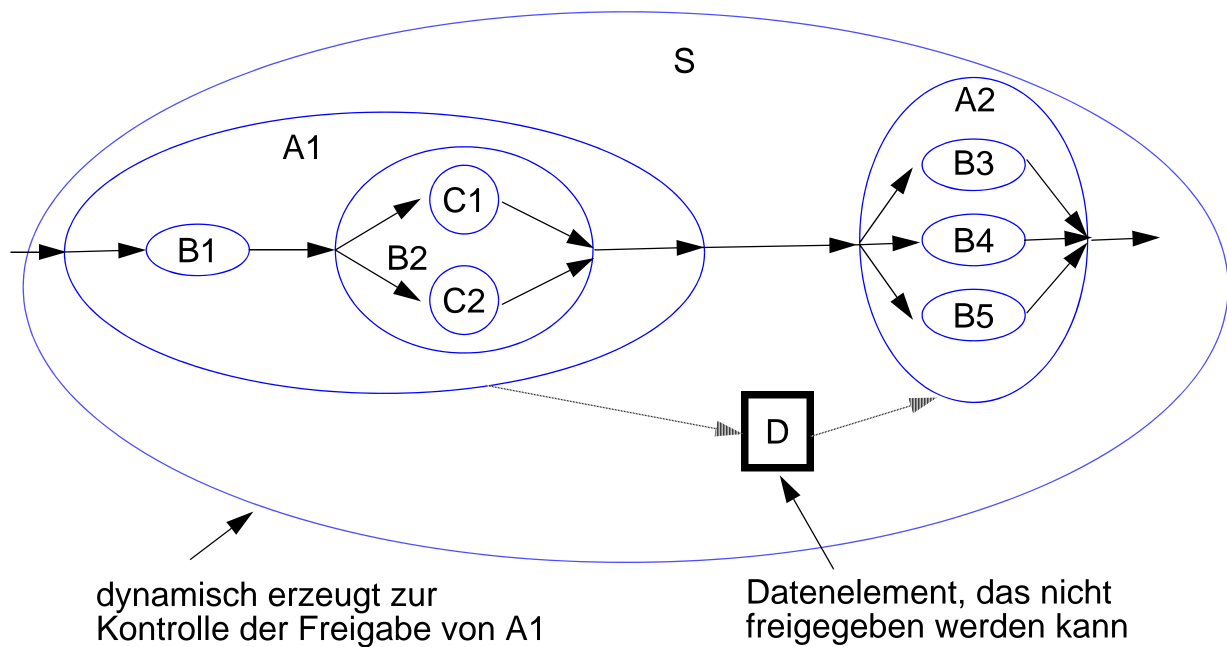
Kontrollbereiche

- **Beispiel: Hierarchie von SoC**



- **SoC-Darstellung**

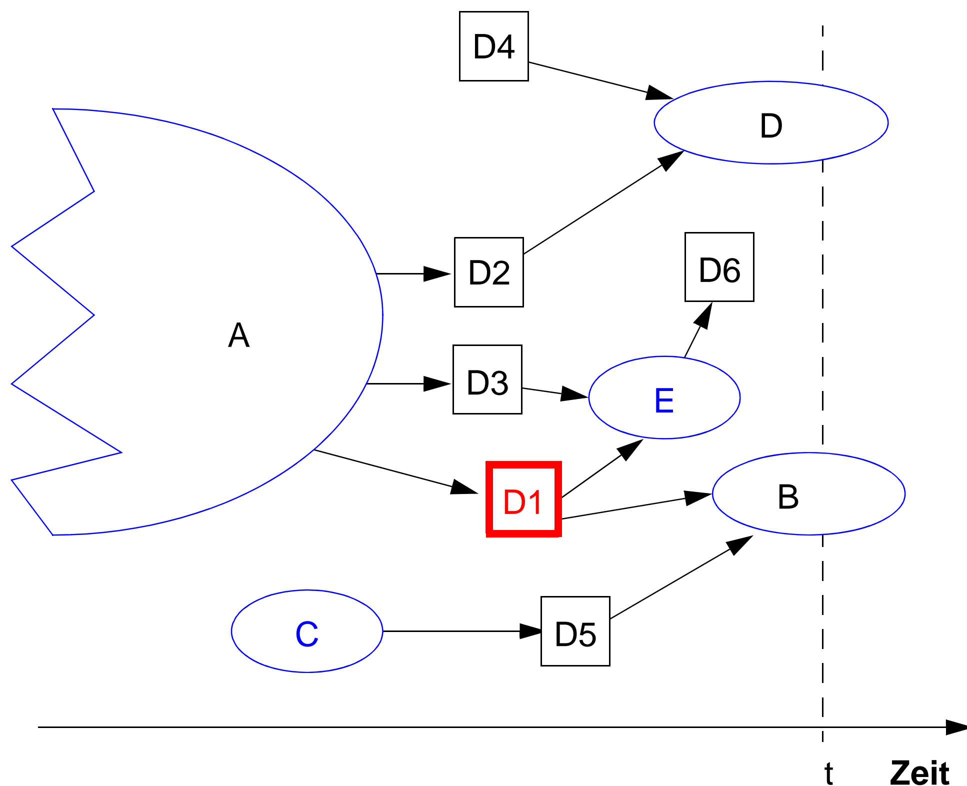
  Jede SoC ist aus der Sicht aller Prozesse auf gleicher oder höherer Kontrollebene eine atomare Aktion



Kontrollbereiche (2)

- **Zwei Arten von Kontrollbereichen**
  - ergibt sich durch **statische Strukturierung** des Systems in Hierarchie abstrakter Datentypen
  - resultiert aus **dynamischen Interaktionen** von SoCs auf gemeinsamen Daten, die noch nicht freigegeben werden können

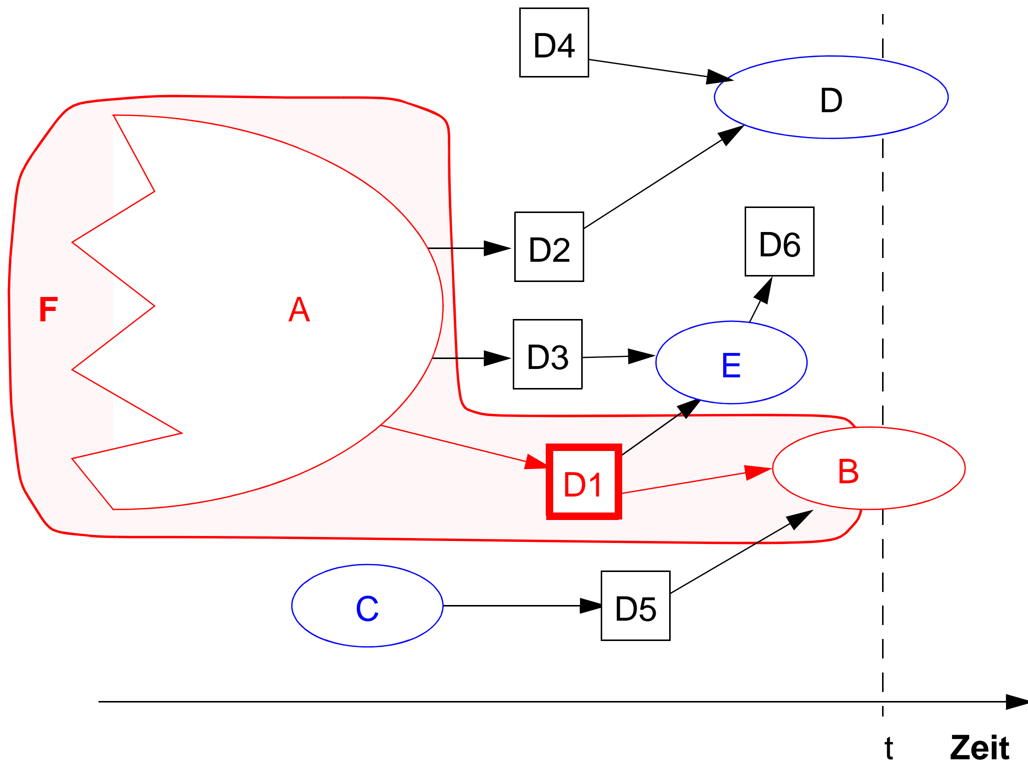
- **Szenario**
  - 1. Beginn: Austausch fehlerhafter Daten



- SoC A hat D1 erzeugt
- Annahme: in B wird Problem entdeckt, das von D1 herrührt

Kontrollbereiche (3)

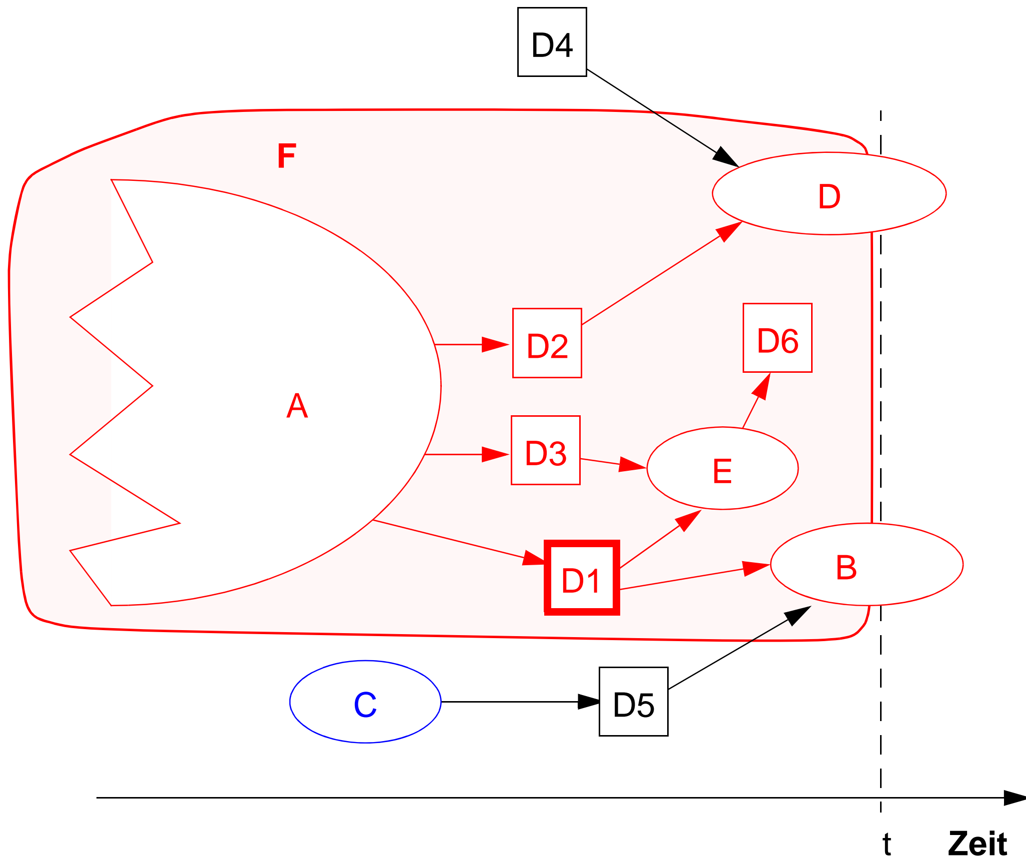
- **Szenario (Forts.)**
  - 2. zeitliches Zurückverfolgen der Abhängigkeiten



- dynamische SoC wird rückwärts aufgebaut, bis die SoC enthalten ist, die fehlerhaftes D1 erzeugt hat

Kontrollbereiche (4)

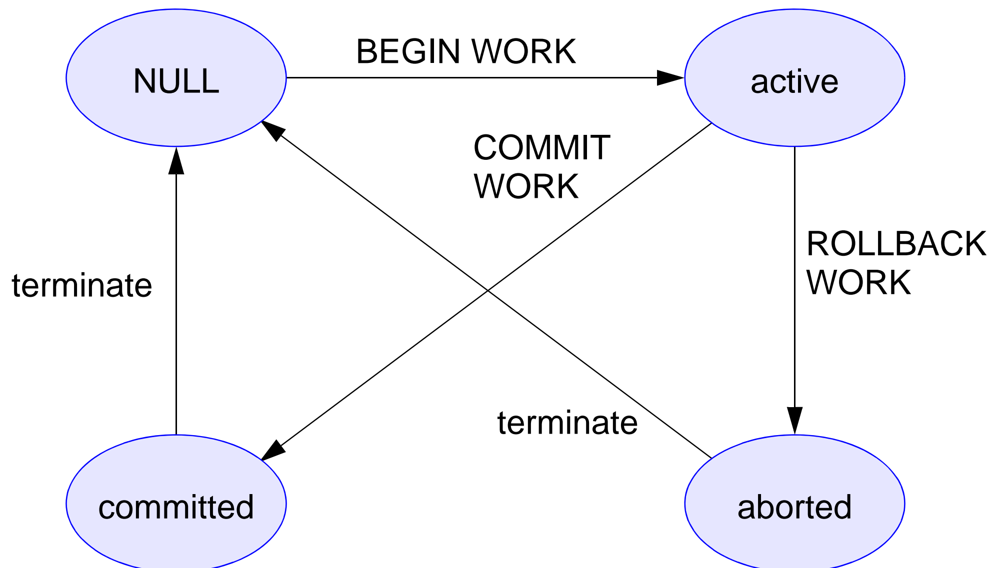
- **Szenario (Forts.)**
  - 3. Erzeugen aller dynamischen Abhängigkeiten, um alle Prozesse zu erfassen, die von der Fehlerkorrektur betroffen sind



- Recovery-SoC wird zeitlich gesehen 'vorwärts' expandiert; muss alle Prozesse umfassen, die *potenziell* von der Nutzung des fehlerhaften D1 betroffen sind

Beschreibung von TA-Modellen

- **Zustands-/Übergangsdiagramm**
  - für flache Transaktionen aus der Sicht der Anwendung



  - **Ist es erweiterbar?**

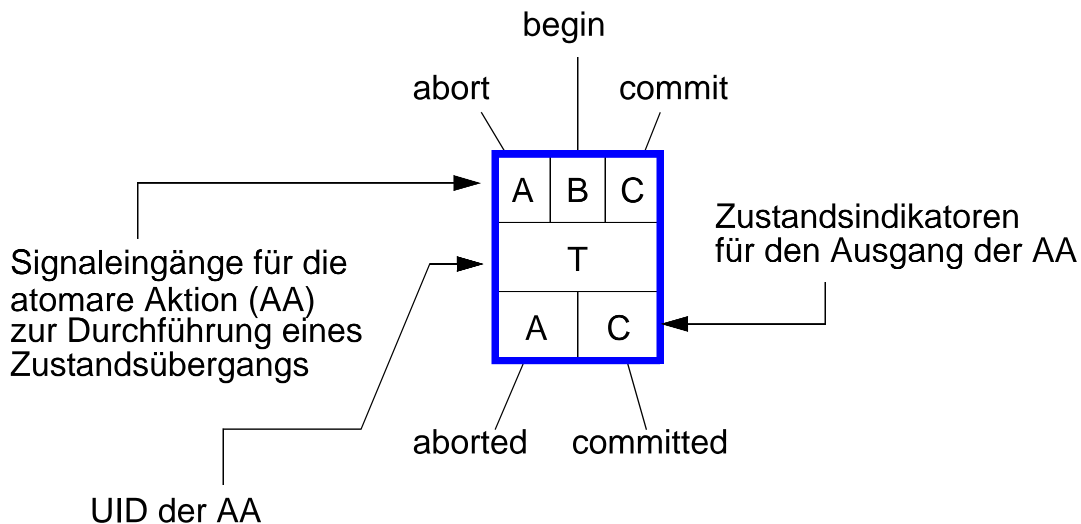
- **Abhängigkeiten zwischen Transaktionen**
  - **Strukturelle Abhängigkeiten**
    - beschreiben hierarchische Organisation des Systems als abstrakte Datentypen zunehmender Komplexität
    - festgelegt, da ‘Aufrufhierarchie im Code vorgegeben’
  - **Dynamische Abhängigkeiten**
    - durch Nutzung von gemeinsamen Daten
    - können eine beliebige Anzahl sonst unabhängiger atomarer Aktionen einhüllen

- **Strukturelle und dynamische Abhängigkeiten als Regeln beschreibbar!**

Beschreibung von TA-Modellen (2)

- **Regelaufbau**
  - **Aktiver Teil**
    - BEGIN WORK (B), ROLLBACK WORK (A, abort) und COMMIT WORK (C) verursachen Zustandsänderungen einer atomaren Aktion
    - Transaktionsmodelle können Bedingungen definieren, die diese Events auslösen
  - **Passiver Teil**
    - Abhängige atomare Aktionen dürfen bestimmte Zustandsübergänge nicht von selbst durchführen
    - Es sind Regeln erforderlich, welche die Bedingungen für diese Zustandsübergänge spezifizieren

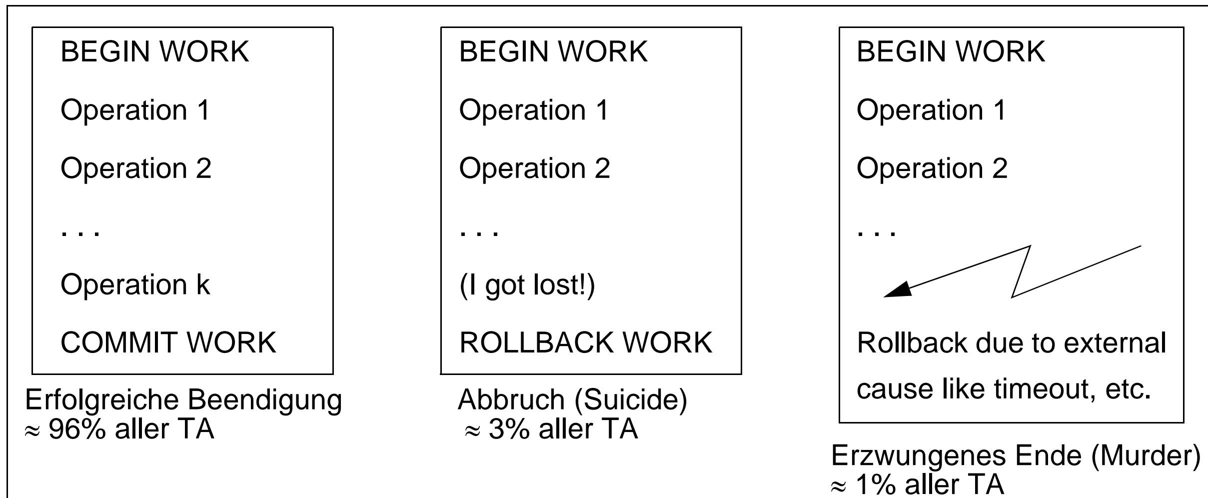
- **Graphische Notation**



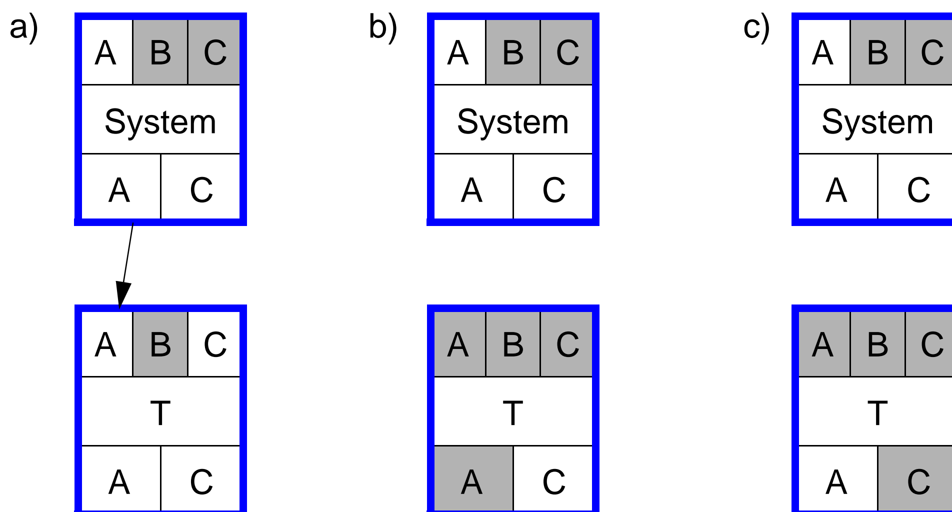
Zur graphischen Darstellung eines Transaktionsmodells wird jede Instanz einer AA als eine solche Box veranschaulicht. Schattierte Bereiche bezeichnen verbotene Ereignisse oder Ausgänge!

Beschreibung von TA-Modellen (3)

- **Flache Transaktionen**



- **System-TA beschreibt Ablaufumgebung**
  - immer aktiv, solange System “läuft”
  - führt kein Commit durch
  - führt Abort nur als Ergebnis eines System-Crashs durch
- **flache TA**
  - nur eine strukturelle Abhängigkeit:
    wenn System-TA Abort durchführt, muss sie es auch



Beschreibung von TA-Modellen (4)

- **Beobachtungen**
  - Beendete TA kann nicht mehr auf Events reagieren oder ihren Endzustand ändern
  - Flache TA taugen nicht zur Modellierung komplexer Berechnungen; sind vollständig unabhängig von ihrer Umgebung (bis auf Abort durch System-Crash); können sich zu beliebigen Zeitpunkten zurücksetzen oder Commit durchführen

- **Regelsprache**
  - **Regelstruktur**

```
<rule identifier> ":"
  [<preconditions>] "→"
    [<rule modifier list>] ","
    [<signal list>] ","
    <state transition>
```

  - **Regeln für:**

BEGIN WORK:	$S_B(T)$
ROLLBACK WORK:	$S_A(T)$
COMMIT WORK:	$S_C(T)$

S: Signal
T: UID der AA
Subskript: <state transition>

- **Regelsemantik**
  - Regel, die einem Signal zugeordnet ist, wird aktiviert, wenn entsprechendes Event auftritt; sie wird aber erst ausgeführt, wenn <preconditions> erfüllt ist
  - <preconditions> ist einfacher Prädikatsausdruck; oft Prädikate über den Zustand anderer TA, z. B. **A(T)** oder **C(T)**

Beschreibung von TA-Modellen (5)

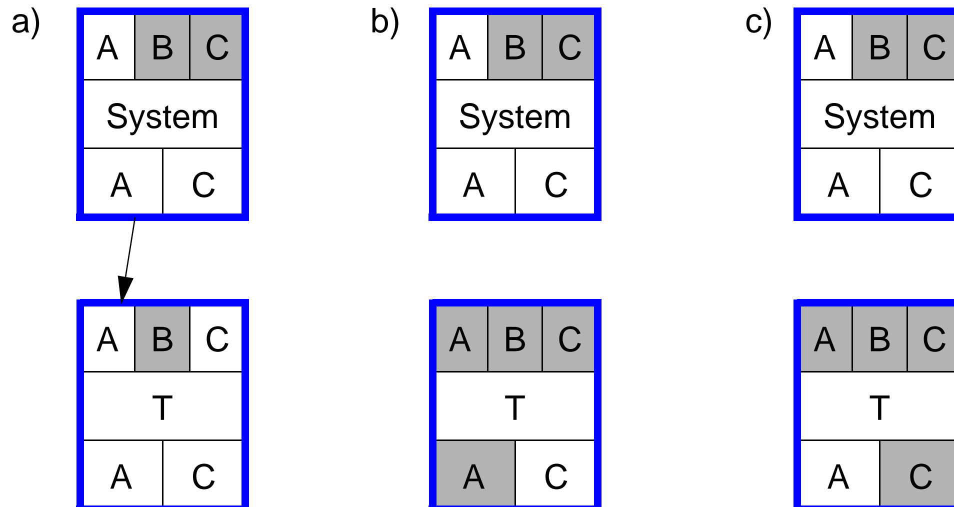
- **Regelsemantik (Forts.)**
  - <rule identifier> spezifiziert, zu welchem Signaleingang der Pfeil (in der graphischen Darstellung) zeigt. <preconditions> unterscheiden, woher das Signal kommt
  - <signal list> beschreibt, welche Signale bei der <state transition> generiert werden: sie sind Identifikatoren von Regeln, die durch das Signal aktiviert werden
    (in der graphischen Notation: Endpunkt eines Pfeils)
  - <rule modifier list> fügt zusätzliche Signale in (andere!) Regeln ein oder löscht sie (entsprechen Pfeilen in der graphischen Notation; delete blockiert eine Regel mit allen ihren Signalen)

```
<rule modifier> ::=
     "+" "(" <rule id> "|" <signal> ")"
   | "-" "(" <rule id> "|" <signal> ")"
   | "delete(" <rule id> ")"
```

- **Regelausführung**
  - wenn Event auftritt, identifizierte Regel überprüfen
  - <preconditions> nicht erfüllt: Regel nur markieren, um anzuzeigen, dass Event aufgetreten
  - andernfalls rechte Seite der Regel ausführen
    (erzeugt i. Allg. weitere Signale)
  - alle Aktionen, die von einem Event ausgelöst werden, atomar ausführen; d.h., die Kette abhängiger Events vollständig abwickeln, bevor unabhängiger (von außen kommender) Event betrachtet wird
  - wenn AA ihren Endzustand erreicht hat: alle Regeln löschen, alle ihre belegten Signaleingänge entfernen

Beschreibung von TA-Modellen (6)

- **Noch einmal flache Transaktionen**
  - Beschriebene Zustände



a) TA T ist aktiv;

b) TA T hat Commit ausgeführt; Endzustand C

c) TA T wurde zurückgesetzt; Endzustand A

- **Regeln**

$S_B(T)$: → (+(S_A(system) | S_A(T)), delete(S_B(T))), , BEGIN WORK

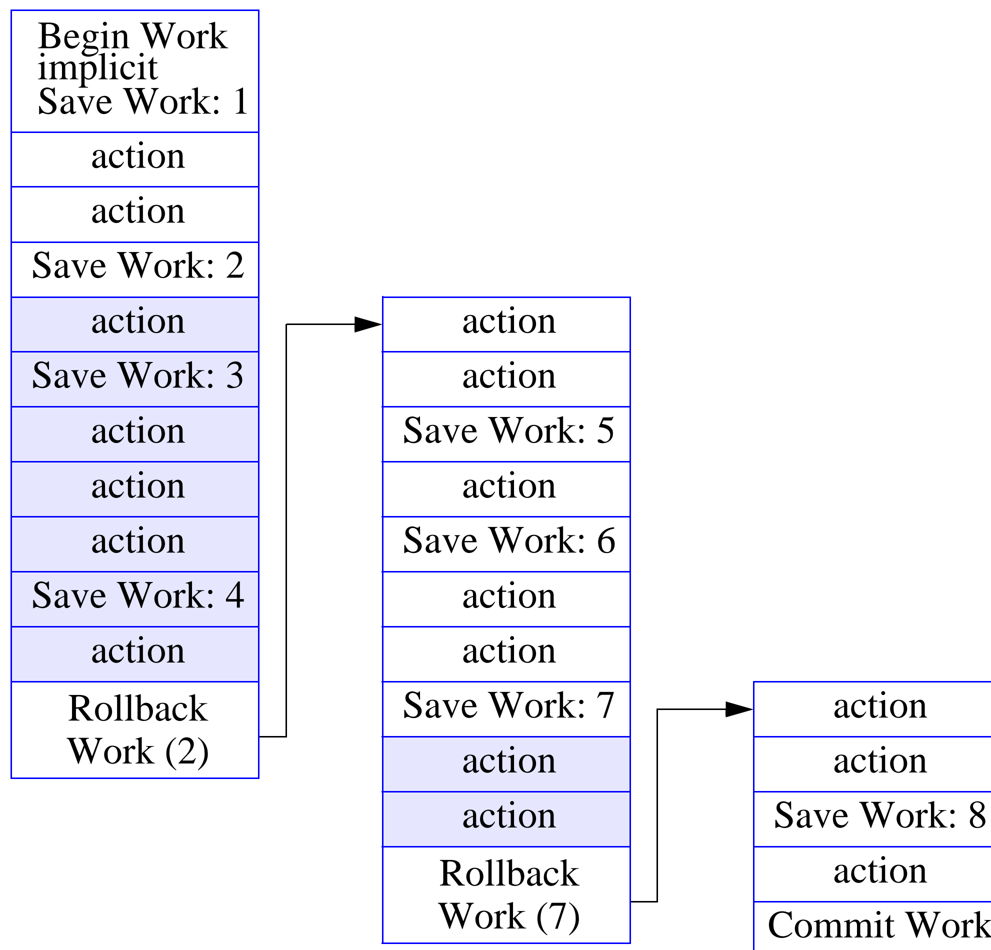
$S_C(T)$: → (delete(S_A(T)), delete(S_C(T))), , COMMIT WORK

$S_A(T)$: → (delete(S_A(T)), delete(S_C(T))), , ROLLBACK WORK

- **Achtung:**
  Im folgenden werden der Übersichtlichkeit halber die delete-Klauseln weggelassen, wenn die Situation offensichtlich ist

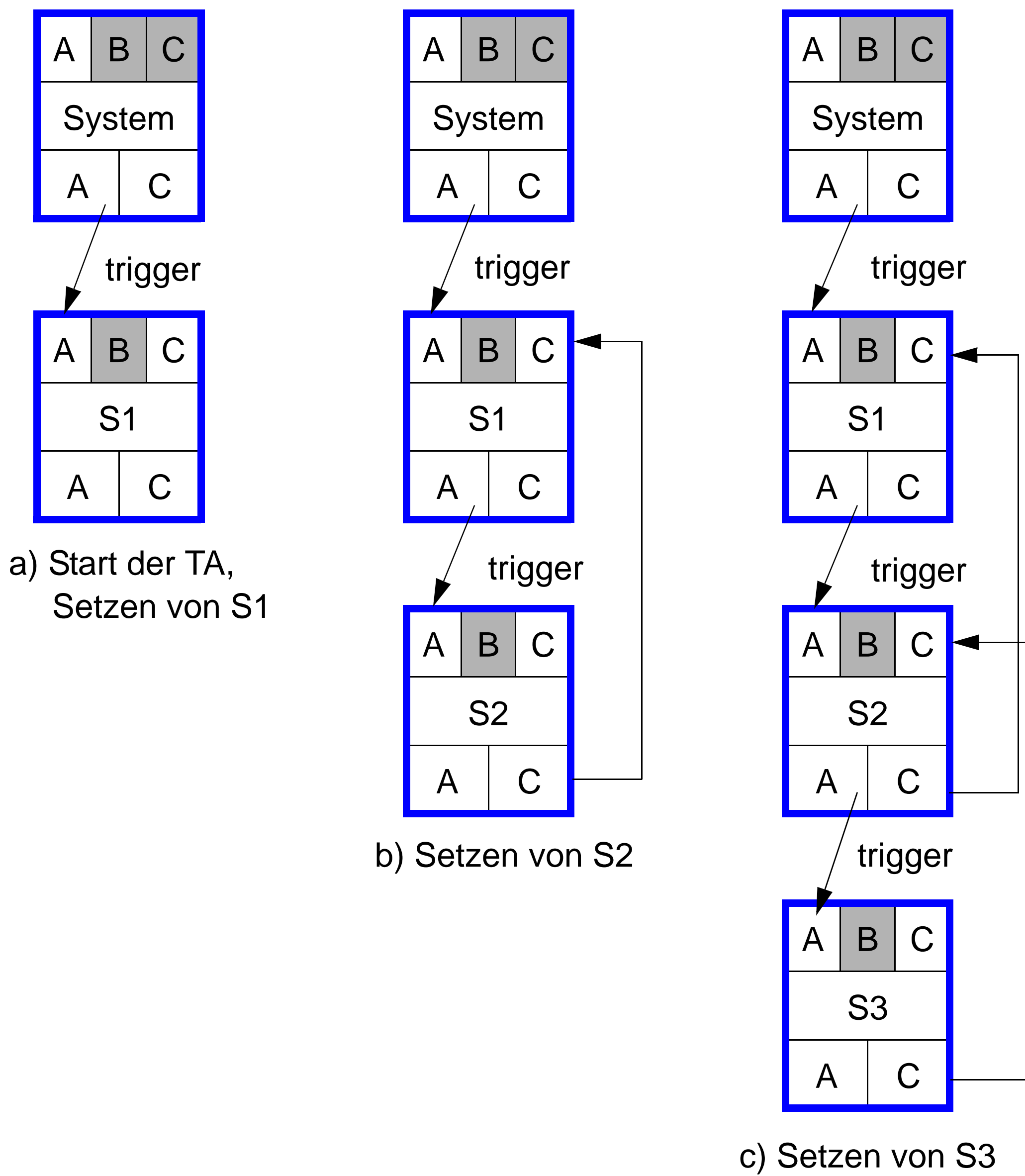
Beschreibung von TA-Modellen (7)

- **Flache Transaktionen mit Sicherungspunkten**
  - **Sicherungspunkte innerhalb einer TA**
    - werden explizit durch das Anwendungsprogramm gesetzt
    - modifiziertes Rollback benennt einen Sicherungspunkt



Beschreibung von TA-Modellen (8)

- **Flache Transaktionen mit Sicherungspunkten (Forts.)**
  - **Graphische Darstellung**



a) Start der TA, Setzen von S1

b) Setzen von S2

c) Setzen von S3

Beschreibung von TA-Modellen (9)

- **Flache Transaktionen mit Sicherungspunkten (Forts.)**

  - **Modell**

    - Folge von AA
    - verknüpft durch eine Folge von Commits (von der momentanen Position zurück zum TA-Beginn) und
    - verknüpft durch eine Folge von Aborts, ausgehend von der System-TA als Folge eines Crashs

  - **Regelmenge**

    - S_1 = UID der ersten AA, die ggf. Sicherungspunkt S_1 erzeugt
    - Ziel des Rollback: R (Parameter), spezifiziert als die UID der ältesten AA, bis zu deren Sicherungspunkt zurückzusetzen ist (wenn $R < S_1$, wird die gesamte TA zurückgesetzt)

      $S_B(S_1)$: $\rightarrow$ $+(S_A(\text{system}) \mid S_A(S_1))$, , BEGIN WORK

      $S_A(R)$: $(R < S_1)$ $\rightarrow$, , ROLLBACK WORK

      $S_C(S_1)$: $\rightarrow$, , COMMIT WORK

      $S_S(S_1)$: $\rightarrow$ $+(S_A(S_1) \mid S_A(S_2))$, $S_B(S_2)$,

    - Regelmenge für AA S_n, die ggf. Sicherungspunkt S_n erzeugt

      $S_B(S_n)$: $\rightarrow$, , BEGIN WORK

      $S_A(R)$: $(R < S_n)$ $\rightarrow$, $S_A(S_{n-1})$, ROLLBACK WORK

      $S_C(S_n)$: $\rightarrow$, $S_C(S_{n-1})$, COMMIT WORK

      $S_S(S_n)$: $\rightarrow$ $+(S_A(S_n) \mid S_A(S_{n+1}))$, $S_B(S_{n+1})$,

Beschränkungen flacher Transaktionen

- **Beschränkungen**
  - auf kurze Transaktionen zugeschnitten,
    Probleme mit “langlebigen” Aktivitäten
  - **Alles-oder-Nichts-Eigenschaft oft inakzeptabel:**
    hoher Arbeitsverlust
    - keine Binnen-Kontrollstruktur
    - fehlende Kapselung oder Zerlegbarkeit in Teilabläufen
    - keine abgestufte Kontrolle für Synchronisation und Recovery
  - **Isolation**
    - Leistungsprobleme durch “lange” Sperren
    - fehlende Unterstützung zur Kooperation
  - **keine Unterstützung zur Parallelisierung**
  - **fehlende Benutzerkontrolle**
- **Anwendungsbeispiele**
  - **lange Batch-Vorgänge**
    - Beispiel: Zinsberechnung
    - ‘Alles-oder-Nichts’ führt zu hohem Verlust an Arbeit
    - denkbar: Zerlegung in viele unabhängige Transaktionen **–**
      dann jedoch manuelle Recovery nach Systemfehler

Beschränkungen flacher Transaktionen (2)

- **Anwendungsbeispiele (Forts.)**

  - **Mehrschritt-Transaktionen, langlebige Aktivitäten**
    - Beispiel: mehrere Reservierungen pro Transaktion
    - lange Sperrdauer (Isolation) führt zu katastrophalem Leistungsverhalten (Sperrkonflikte, Deadlocks)
    - Rücksetzen der gesamten Aktivität im Fehlerfall i.allg. nicht akzeptabel

  - **Entwurfsvorgänge (CAD, CASE, ...)**
    - lange Dauer (Wochen/Monate)
    - kontrollierte Kooperation zwischen mehreren Entwerfern (vor Commit)
    - Einsatz von Versionen

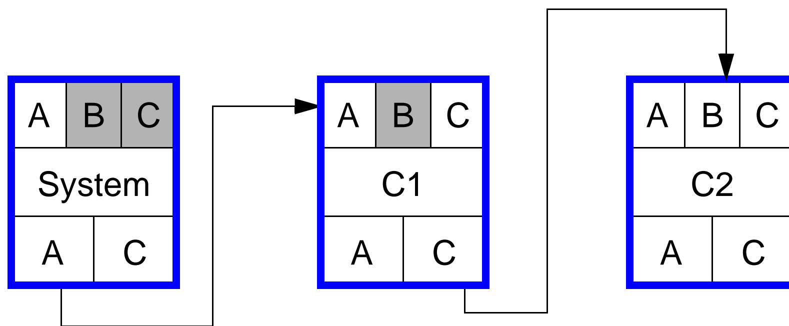
  - **Aktive DBS**
    - DBS reagiert eigenständig auf bestimmte Ereignisse
    - Spezifikation durch ECA-Regeln

  - **Realzeit-Anwendungen**
    - zeitbezogene Konsistenzforderungen (Deadlines)
    - häufige irreversible Interaktionen mit der Außenwelt

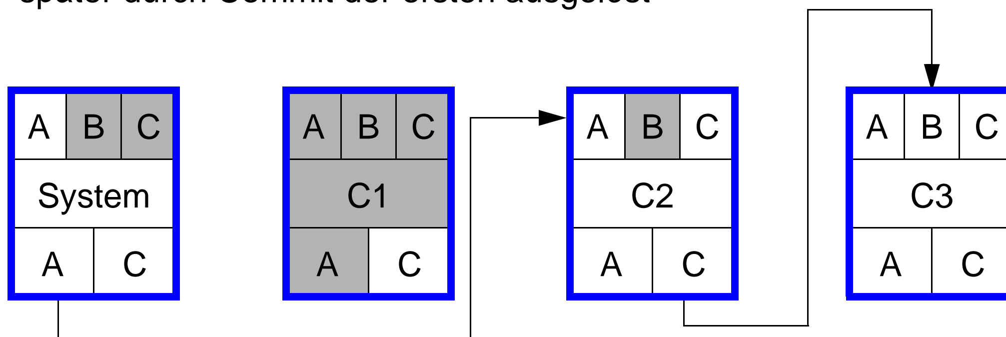
  - **Föderative DBS / Multi-DBS**
    - Unterstützung lokaler Knotenautonomie
    - unterschiedliche Synchronisations- und Recovery-Protokolle

Gekettete Transaktionen

- **Variation der Anwendung von Sicherungspunkten**
- **Modell**
  - Folge von atomaren Aktionen (AA), die sequentiell ausgeführt werden
  - Teil der Commit-Verarbeitung: Signal generieren, das BEGIN WORK bei der nächsten AA auslöst
  - Zustandsübergang ist atomar: Chain Work (Commit + Begin)
- **Graphische Darstellung**



a) Erste TA der Kette wurde gestartet, Start der zweiten TA später durch Commit der ersten ausgelöst



b) Erste TA der Kette hat Commit ausgeführt; zweite TA nun strukturell abhängig von “System”

- **Regelmenge**

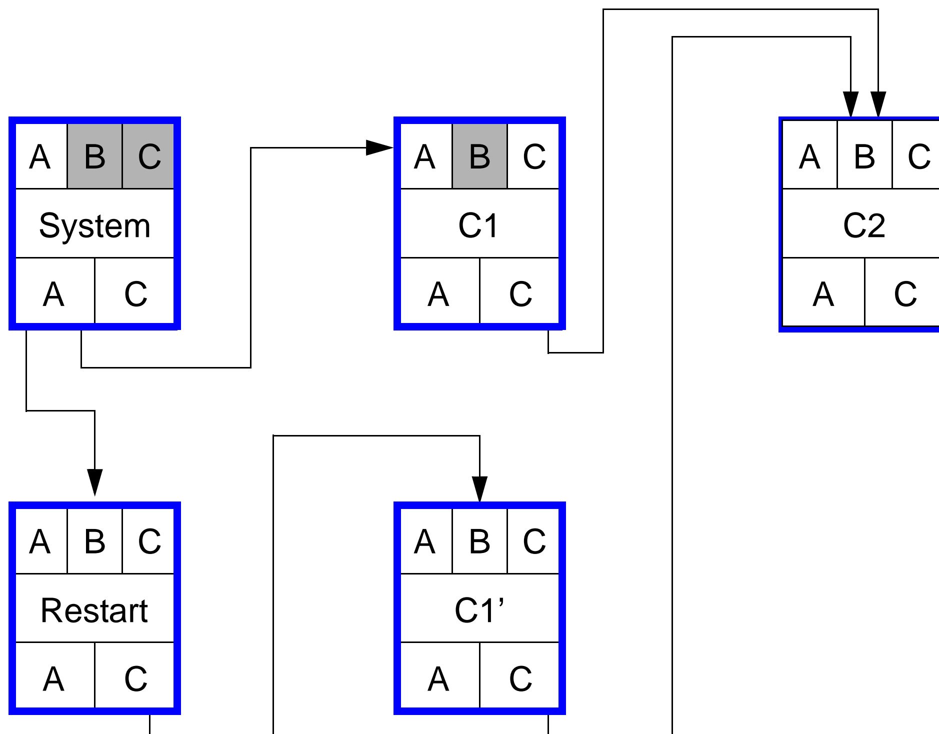
$S_B(C_n)$: $\rightarrow$ +(S_A(system) | $S_A(C_n)$), , BEGIN WORK

$S_A(C_n)$: $\rightarrow$, , ROLLBACK WORK

$S_C(S_n)$: $\rightarrow$, $S_B(C_{n+1})$, COMMIT WORK

Gekettete Transaktionen (2)

- **Gekettete Transaktionen vs. Sicherungspunkte**
  - Einführung einer Restart-Aktion
  - Restart wird aktiviert als Folge des Systemausfalls; übernimmt die Rolle von "System" und startet C_1' (mit denselben Abhängigkeiten, die C_1 hatte)



- **Vergleich**
  - *Ablaufstruktur*: Gekettete TA erlauben wie Sicherungspunkte Substruktur, die langer Aktivität aufgeprägt werden kann (DB-Kontext bleibt erhalten)
  - *Commit vs. Sicherungspunkt*: Zurücksetzen nur möglich zum letzten SP (=Commit) – vorher: zu beliebigen SP
  - *Sperrbehandlung*: Commit erlaubt Freigabe der Sperren, die später nicht mehr benötigt werden
  - *Verlust von Arbeit*: Sicherungspunkte erlauben flexibleres Zurücksetzen nur, solange System normal arbeitet
  - *Restart-Behandlung*: Bei geketteten TA wird Zustand des jüngsten Commit wiederhergestellt (Problem der Wiederherstellung des AP-Zustandes wie bei SP).

Geschachtelte Transaktionen

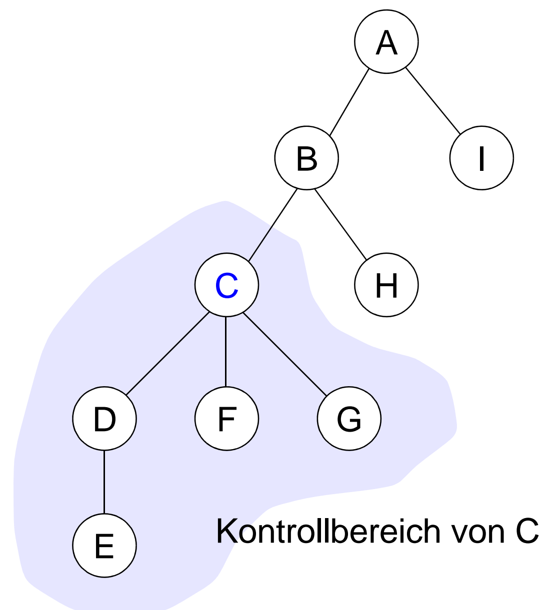
- **Ziele**
  - dynamische Zerlegung einer TA in eine Hierarchie von Sub-TA
  - Bewahrung der ACID-Eigenschaften für die (äußere) TA
  - Gewährleistung von Ununterbrechbarkeit und Isolation für jede Sub-TA

  Â Zerlegung eines Vorgangs (unit of work) in Teilaufgaben:
  Verteilung und Bearbeitung in einem Rechensystem

- **Vorteile**
  - Parallelverarbeitung innerhalb einer Transaktion
    - Ausnutzung anwendungsspezifischer Parallelität
    - Abbildung auf mehrere Prozessoren
  - feinere Recovery-Kontrolle innerhalb einer Transaktion
    - Rücksetzen einer Sub-TA betrifft nur sie und ihre Kinder
    - weitere Verfeinerung durch Sicherungspunkt-Konzept möglich
  - explizite Kontrollstruktur
    - einfachere Programmierung paralleler Abläufe
    - ’Alles oder Nichts’-Eigenschaft von Sub-TA reduziert Komplexität
  - Modularität des Gesamtsystems
    - einfache und sichere Zerlegung eines TA-Programmes in Sub-TA
    - unabhängiger Entwurf / Implementierung von Moduln
    - Unterstützung von Kapselung und Fehlerisolation
  - verteilte Systemimplementierung
    - Einsatz verteilter Algorithmen
    - Erhöhung von Verfügbarkeit und Leistung

Geschachtelte Transaktionen (2)

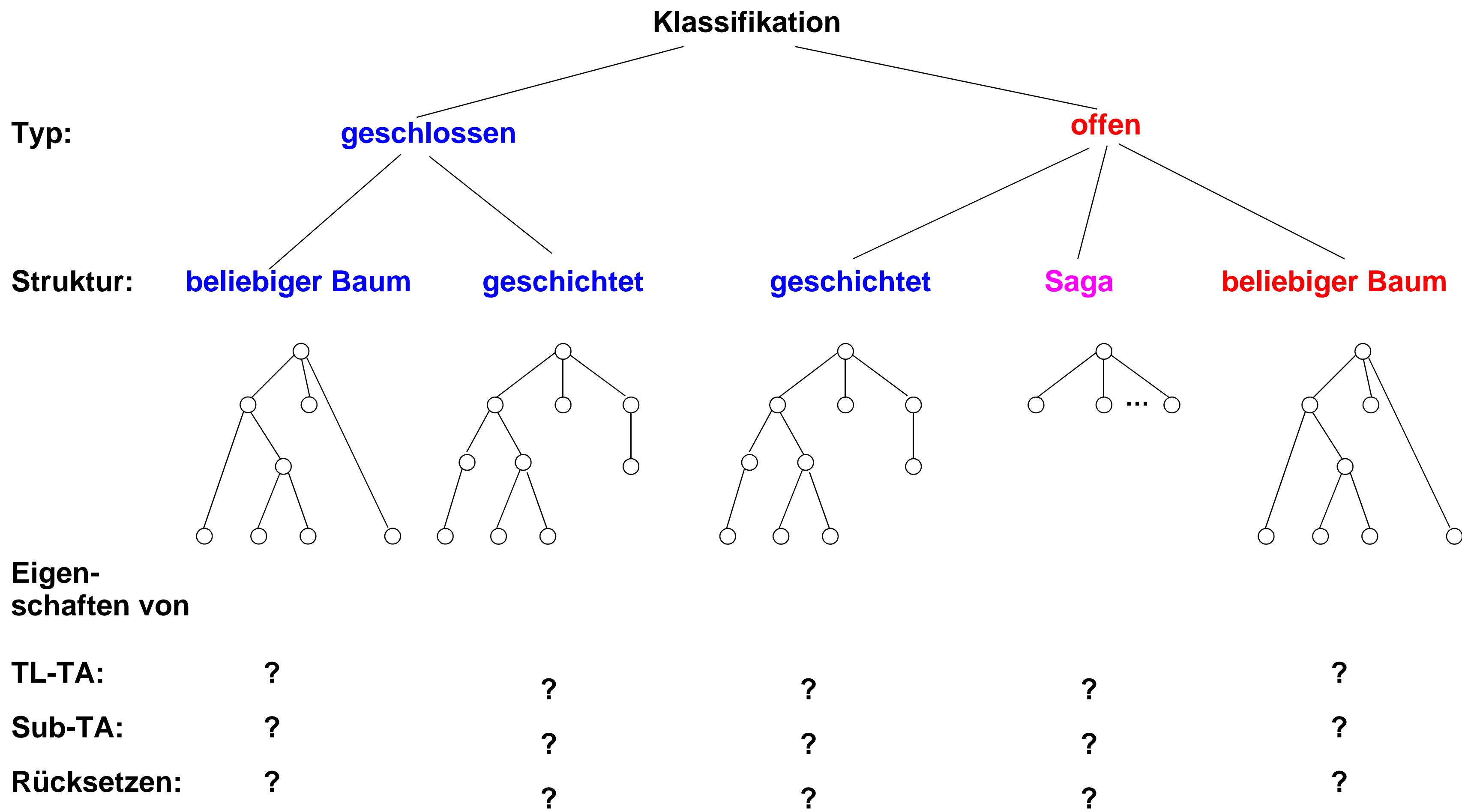
- **Basis-Konzept von Moss entwickelt (1981)**
  - Transaktionsbaum veranschaulicht statische Aspekte der Aufrufhierarchie
  - ausgezeichnete Transaktion = Top-Level Transaction (TL-TA)
    Â **bildet äußersten Kontrollbereich**



Â ACID-Prinzip gilt für TL-Transaktion, da kein umhüllender Kontrollbereich mehr existiert

- Geschachtelte Transaktionen sind eine
  ***Generalisierung* von Sicherungspunkten.**
  Geschachtelte TA sind TA innerhalb TA innerhalb TA ...

Geschachtelte Transaktionen



Geschachtelte Transaktionen (3)

- **Genauere Definition**

1. A nested transaction is a tree of transactions, the sub-trees of which are either **nested or flat** transactions.
2. Transactions at the leaf level are **flat transactions**. The distance from the root to the leaves can be different for different parts of the tree.
3. The transaction at the root of the tree is called **top-level transaction**, the others are called **sub-transactions**. A transaction's predecessor in the tree is called **parent**; a sub-transaction at the next lower level is called **child**.
4. A sub-transaction can either commit or rollback; its commit will not take effect, though, unless the parent transaction commits. So, by induction, any sub-transaction can **finally commit only if the root transaction commits**.
5. The rollback of a transaction anywhere in the tree causes all its sub-transactions to roll back. This combined with the previous point is the reason why sub-transactions have **only ACI, but not D**.

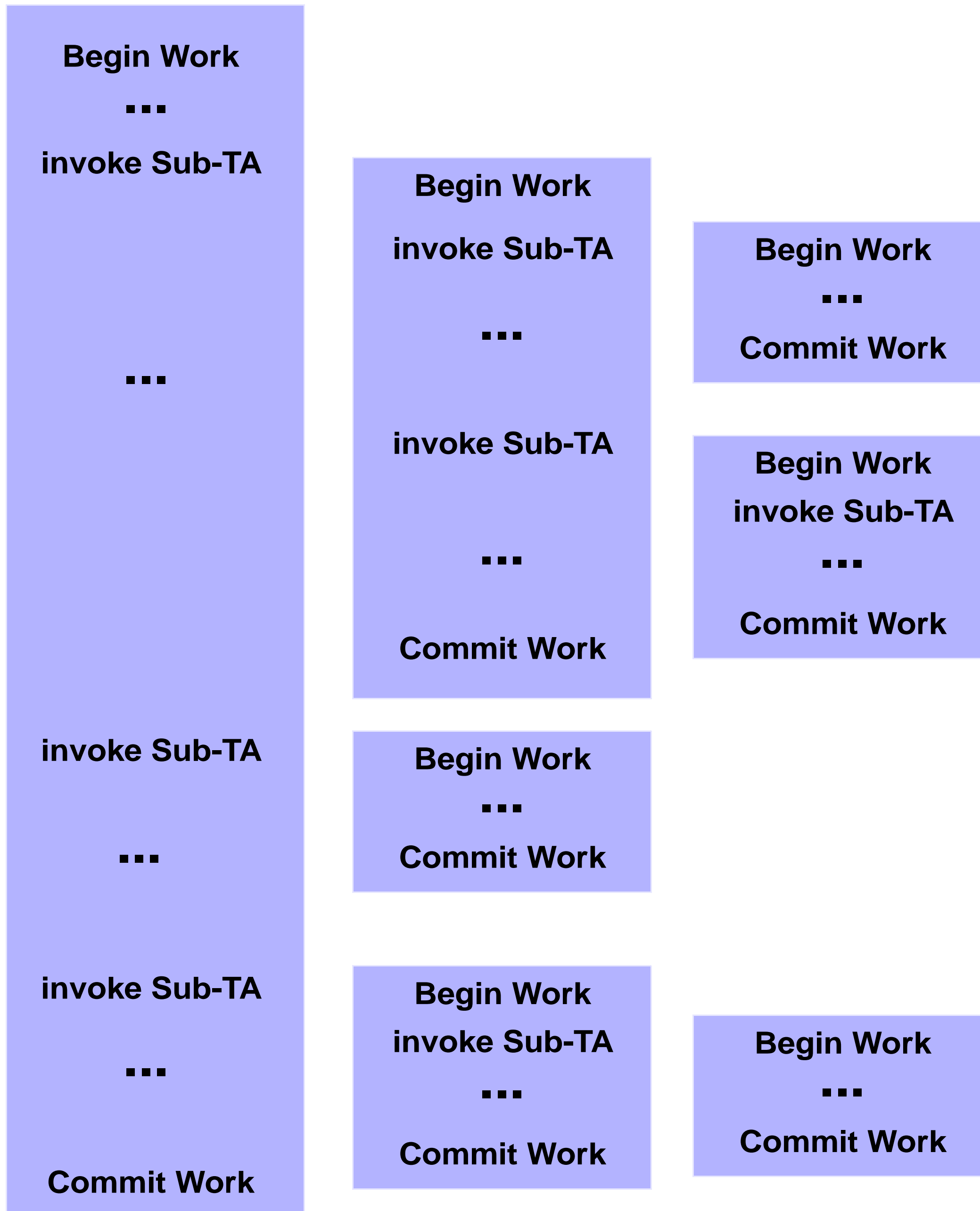
Â Bemerkung: Die Einhaltung von C lässt sich an die Erzeuger-TA delegieren (größere Flexibilität bei der TA-Zerlegung)

- **Dynamisches Verhalten**

- ***Commit-Regel*****:** (lokales) Commit einer Sub-TA macht ihre Ergebnisse nur der Erzeuger-TA zugänglich; endgültiges Commit einer Sub-TA dann und nur dann, wenn für alle Vorfahren bis zur TL-TA das endgültige Commit erfolgreich
- ***Rücksetz-Regel*****:** wird (Sub-) TA auf irgendeiner Schachtelungsebene zurückgesetzt, werden alle ihre Sub-TA, unabhängig von ihrem lokalen Commit-Status ebenso zurückgesetzt (rekursiv anwenden)
- ***Sichtbarkeits-Regel*****:** alle Änderungen einer Sub-TA werden bei ihrem Commit für ihre Erzeuger-TA sichtbar; alle Objekte, von der Erzeuger-TA zuückbehalten, können den Sub-TAs zugänglich gemacht werden; Änderungen einer Sub-TA sind für parallel ablaufende Geschwister-TA nicht sichtbar.

Geschachtelte Transaktionen (4)

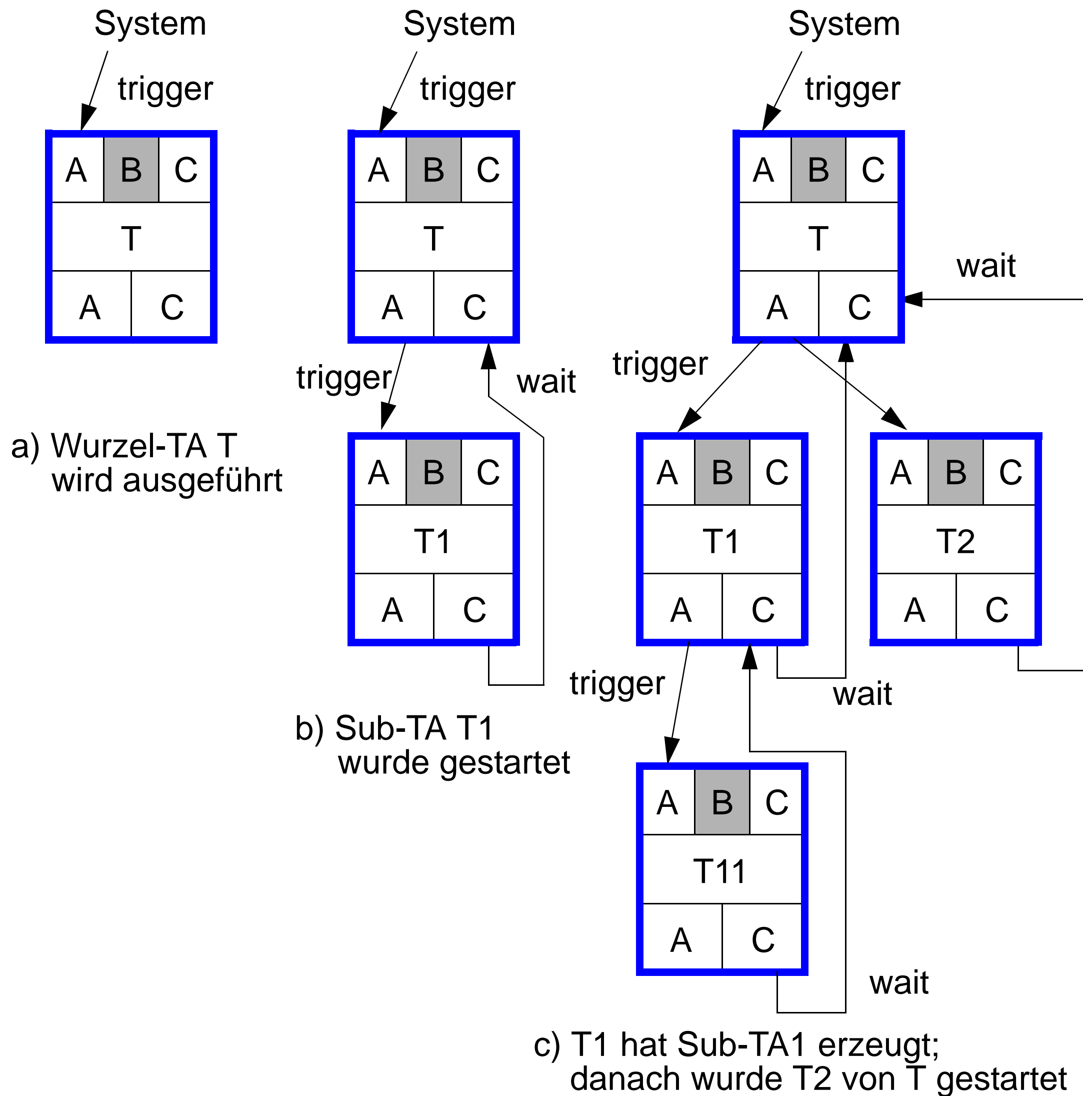
- **Geschachtelte TA sind das Äquivalent der Modularisierung auf der Ebene des Kontrollflusses**



- Jede Sub-TA ist eingebettet in die SoC der Erzeuger-TA
- Vollständigen ACID-Eigenschaften gelten nur für die TL-TA

Geschachtelte Transaktionen (5)

- **Graphische Darstellung**



- Abhängigkeiten in einer geschachtelten TA sind rein strukturell
- Abort-Signale werden von oben nach unten durchgereicht
- Übergang in den Commit-Zustand hängt davon ab, ob Erzeuger-TA ihn schon vollzogen hat

Geschachtelte Transaktionen (6)

- **Regelmenge**
  - für Sub-TA T_{kn} mit Erzeuger-TA T_k

$S_B(T_{kn}) : \rightarrow +(S_A(T_k) | S_A(T_{kn})), , \text{BEGIN WORK}$

$S_A(T_{kn}) : \rightarrow , , \text{ROLLBACK WORK}$

$S_C(T_{kn}) : C(T_k) \rightarrow , , \text{COMMIT WORK}$

  - neu: Bedingung für Commit
  - in der graphischen Darstellung Pfeil zurück von Commit-Zustand einer Sub-TA zum Commit-Zustand ihrer Erzeuger-TA (mit “wait” markiert)

Geschachtelte Transaktionen – Sperren

- **Sperren bei flachen Transaktionen**
  - Erwerb gemäß Kompatibilitätsmatrix
  - Halten von Sperren: h(O_1, X), h:(O_2, R)
  - Freigabe bei Commit

- **Regeln zum Sperren bei geschachtelten Transaktionen**

R1: Transaction T may acquire a lock in X-mode if

- no other transaction **holds** the lock in X- or R-mode, and
- all transactions that **retain** the lock in X- or R-mode are ancestors of T.

R2: Transaction T may acquire a lock in R-mode if

- no other transaction **holds** the lock in X-mode, and
- all transactions that **retain** the lock in X-mode are ancestors of T.

R3: When a subtransaction T commits, the parent of T inherits T's locks (**held and retained**). After that, the parent retains the locks in the same mode (X or R) in which T held or retained the locks previously[2].

R4: When a transaction aborts, it releases all locks it **holds or retains**. If any of its superiors holds or retains any of these locks they continue to do so.

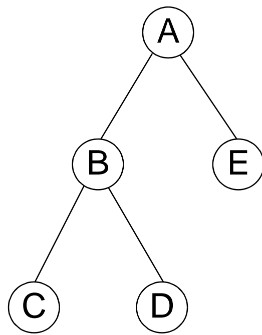
Â Notation: X-lock hold on O_1: h:(O_1, X), R-lock retained on O_2: r:(O_2, R)

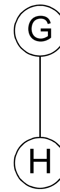
---

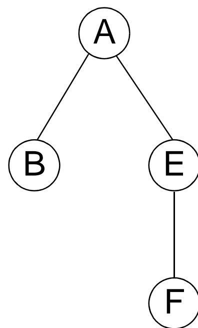
2. Note, the inheritance mechanism may cause a transaction to (conceptually) retain several locks on the same object. Of course, the number of locks retained by a transaction should be limited to one by only retaining the most restrictive lock.

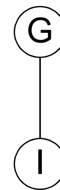
Geschachtelte Transaktionen – Sperren (2)I

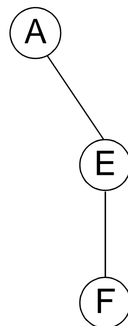
Vererbung: Beispiel:

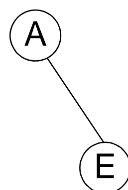








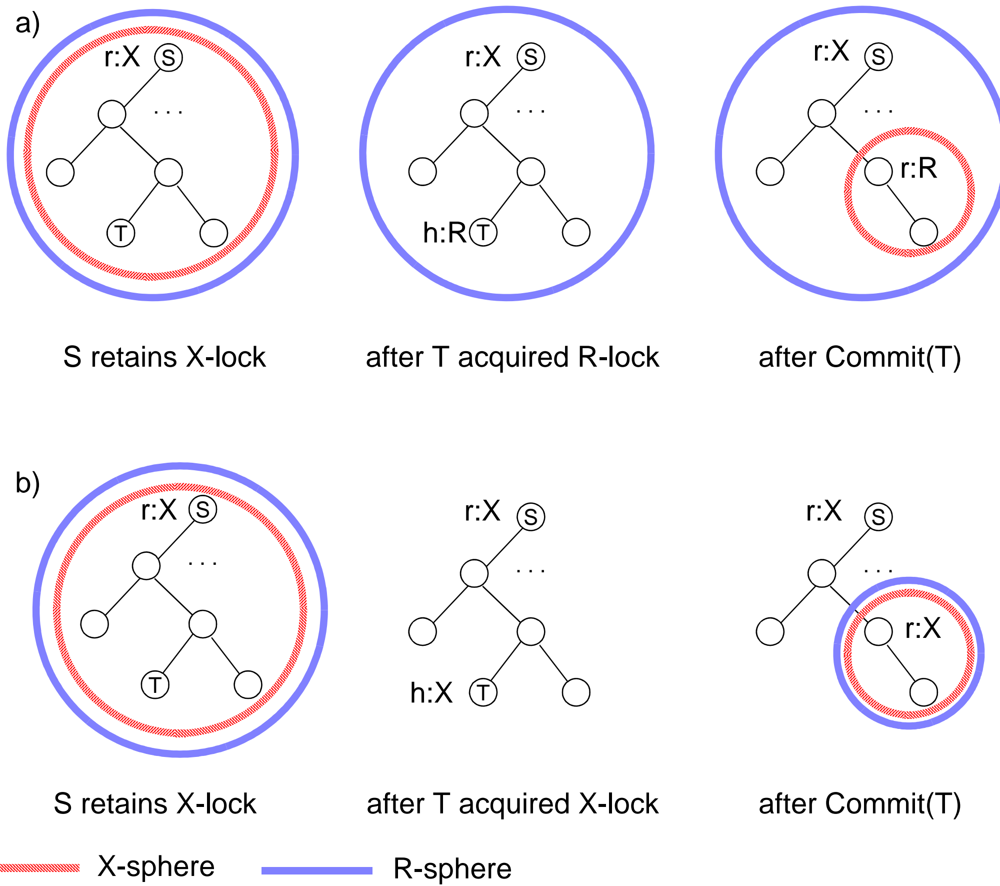




Geschachtelte Transaktionen – Sperren (3)

- **Vererbung von Sperren (upward inheritance)[3]**

  Veränderung der X- und R-Sphären



- **Realisierung**
  - Erzeuger-TA erbt Log-Information und Sperren von Sub-TA
  - ‘Geerbte Daten’ werden verwaltet von einem ‘Buchhalter’ oder ‘TA-Manager’

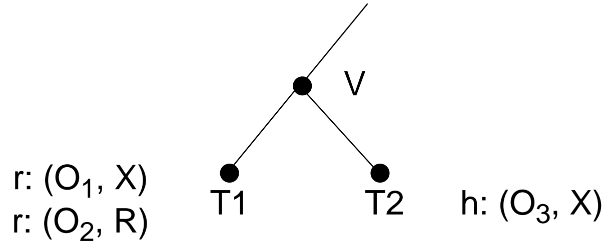
---

3. Härder, T., Rothermel, K.: Concurrency Control Issues in Nested Transactions, in: VLDB-Journal 2:1, 1993, pp. 39-74.

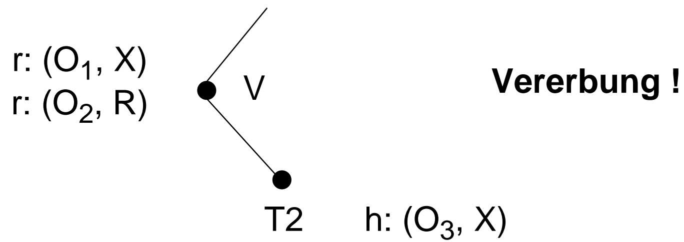
Geschachtelte Transaktionen – Sperren (4)

- **Sperren in geschachtelten TA:**

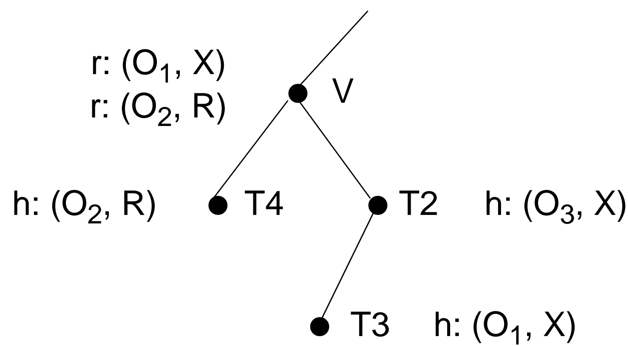
1. Ausgangssituation



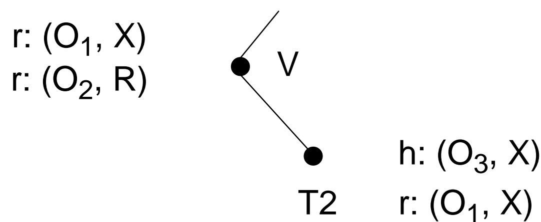
2. Commit (T_1)



3. Alle im Kontrollbereich von V können Sperren auf O_1 oder O_2 erwerben



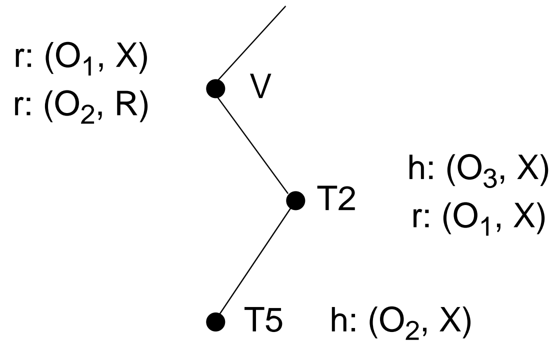
4. T3 und T4 führen Commit durch



Geschachtelte Transaktionen – Sperren (5)

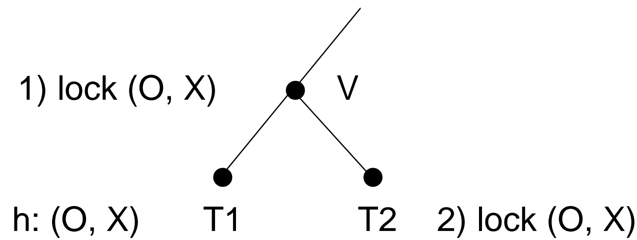
- **Sperren in geschachtelten TA (Forts.):**

5. T5 fordert (O_2, X) an (keine weitere R-Sperre)

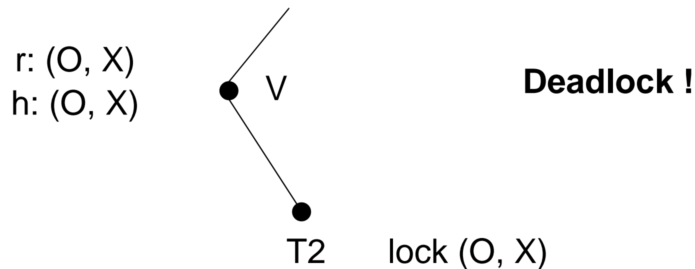


- V und T5 fordern lock(O_1, X) an. V <u>muss</u> warten.

- **Zusätzliche Deadlock-Probleme**

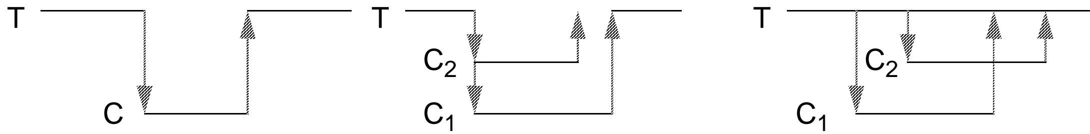


- Anforderungsreihenfolge wird bei Commit (T1) beibehalten



Geschachtelte Transaktionen – Freiheitsgrade

- **Freiheitsgrade**



a) synchrone Aufrufe, serielle Ausführung — b) synchrone Aufrufe, parallele Ausführung — c) asynchrone Aufrufe, parallele Ausführung

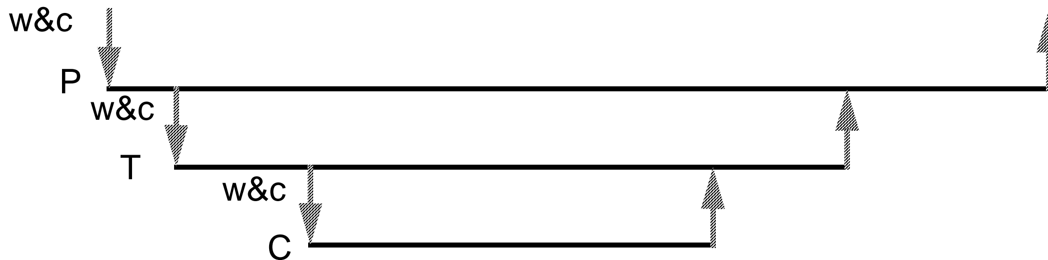
- **Repräsentation/Ausführung von (Sub-) TA**
  - in einem oder mehreren Prozessen
  - lokale oder verteilte Anordnung

- **Client-Server-Beziehung zwischen TA**
  - synchroner Aufruf: Client ist blockiert, bis Antwort eintrifft
  - asynchroner Aufruf: Client und Server können parallel arbeiten
  - parallele Initiierung mehrerer (synchroner) Aufrufe (PARBEGIN ... PAREND)

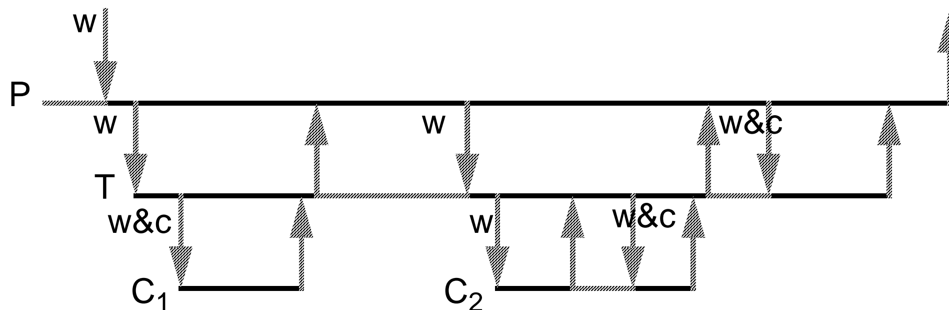
- **Schnittstelle zwischen TA**
  - **"Single Call"-Schnittstelle:** TA erzeugt Sub-TA (und diese ggf. rekursiv weitere); Antwort impliziert Ende der Sub-TA
  - **Konversations-Schnittstelle:** TA erzeugt Sub-TA; nach einer Antwort bleibt der Kontext der Sub-TA erhalten; sie kann weitere Anforderungen bearbeiten, bis explizit EOT der Sub-TA ausgeführt wird.

Geschachtelte Transaktionen – Kooperation

- **Kooperation**



a) Benutzung von Single-Call-Schnittstellen



d) Benutzung von Konversations-Schnittstellen

- **Aufrufprimitive**

  - work (w)
  - commit (c)
  - abort
  - work & commit (w&c)
  - accept
  - done

- **Forderung:**
  “Hierarchical Containment” bei Konversationsschnittstelle

  - Vereinfachung der Schachtelungsstruktur
  - Begrenzung des Domino-Effekts usw.

Geschachtelte Transaktionen – Parallelitätsaspekte

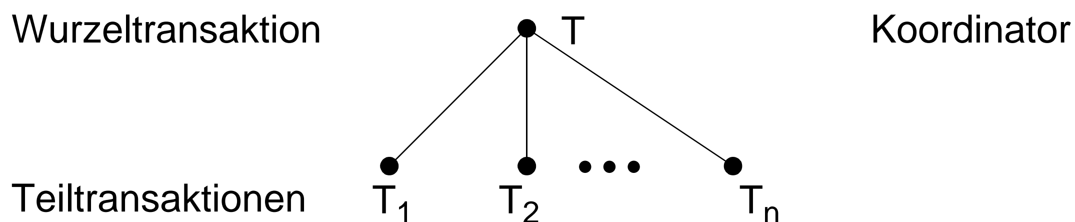
- **4 Arten von "Intra-Transaction"-Parallelität**
  - **Serielle Ausführung** von TA: synchrone Aktivierung (z.B. "remote procedure call")
  - Nur **Parallelität zwischen Kind-TA** (sibling parallelism): parallele Aktivierung mehrerer synchroner Aktionen (z.B. ARGUS)
  - **Vater/Kind-Parallelität**: Nur parallele TA-Ausführung in hierarchischem Pfad (z.B. ?)
  - **Uneingeschränkte Parallelität**: asynchrone TA-Aktivierungen auf allen Ebenen (z.B. CLOUDS und LOCUS)

Verteilte Transaktionen

- **Verteilte Transaktion ist typischerweise flache TA,**
  - die in einer verteilten Umgebung abläuft und deshalb mehrere Knoten im Netz aufsucht
  - deren Verteilung von den **Daten** abhängt
  - die in “Scheiben” derselben Top-Level-TA aufgeteilt ist

Â Struktur einer geschachtelten TA wird dagegen von funktionaler Zerlegung bestimmt!

- **Kontrollstruktur in einer verteilten Umgebung**

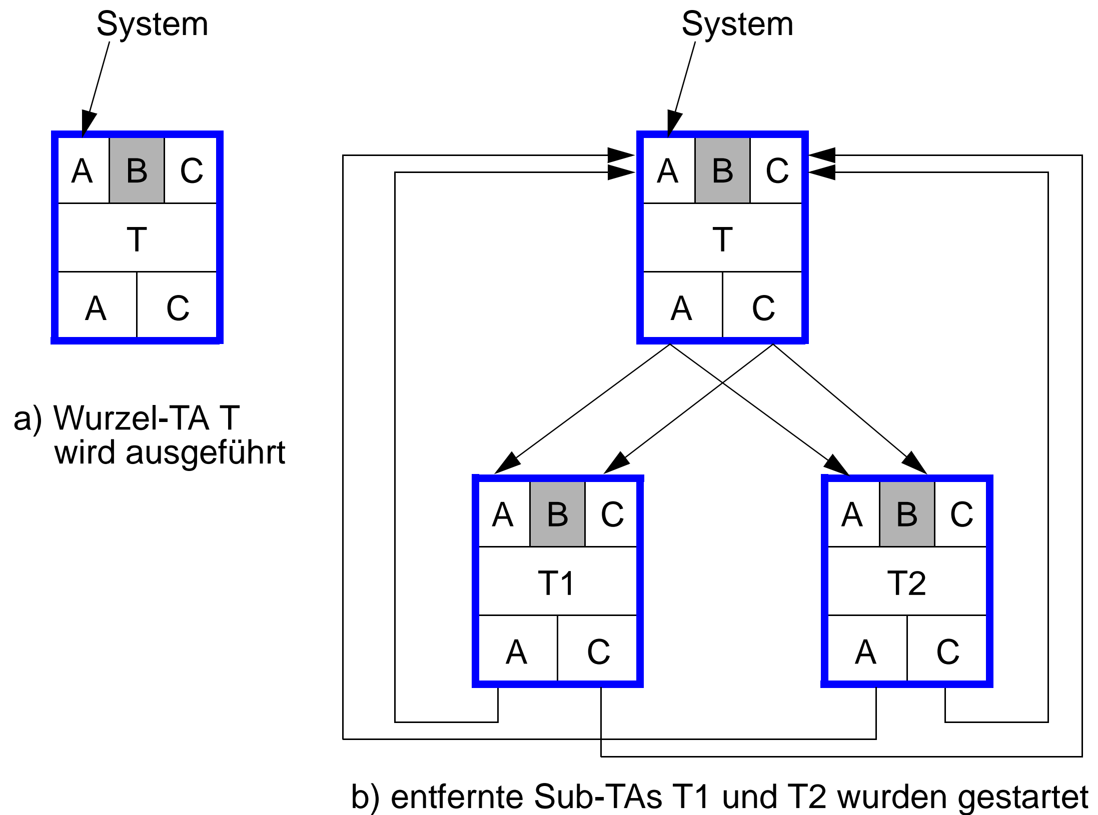


- **Behandlung von**
  - Isolation (Sperren)
  - Konsistenzsicherung
  - Rücksetzen, Commit?

Â Kopplung zwischen Sub-TA und ihrer übergeordneten TA in diesem Modell viel stärker als bei geschachtelten TA

Verteilte Transaktionen (2)

- **Graphische Darstellung**



- **Regelmenge**
  - für den Fall einer Sub-TA T1

$S_B(T)$: $\rightarrow$ +(S_A(system) | S_A(T)), , BEGIN WORK

$S_A(T)$: $\rightarrow$, , ROLLBACK WORK

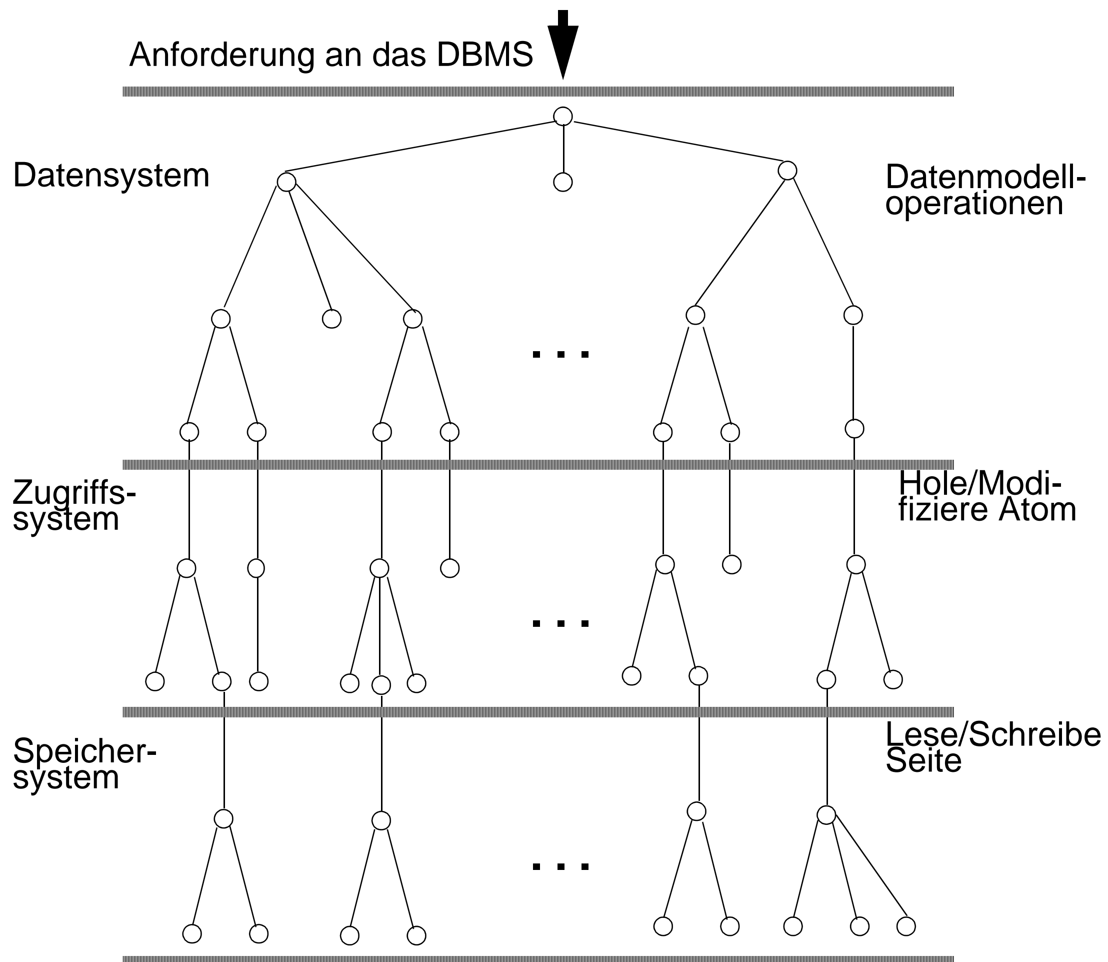
$S_C(T)$: $\rightarrow$, , COMMIT WORK

$S_B(T1)$: $\rightarrow$ (+(S_A(T)|S_A(T1)), +(S_C(T)|S_C(T1))), , BEGIN WORK

$S_A(T1)$: $\rightarrow$, S_A(T), ROLLBACK WORK

$S_C(T1)$: $\rightarrow$, S_C(T), COMMIT WORK

Mehrebenen-Transaktionen – Motivation



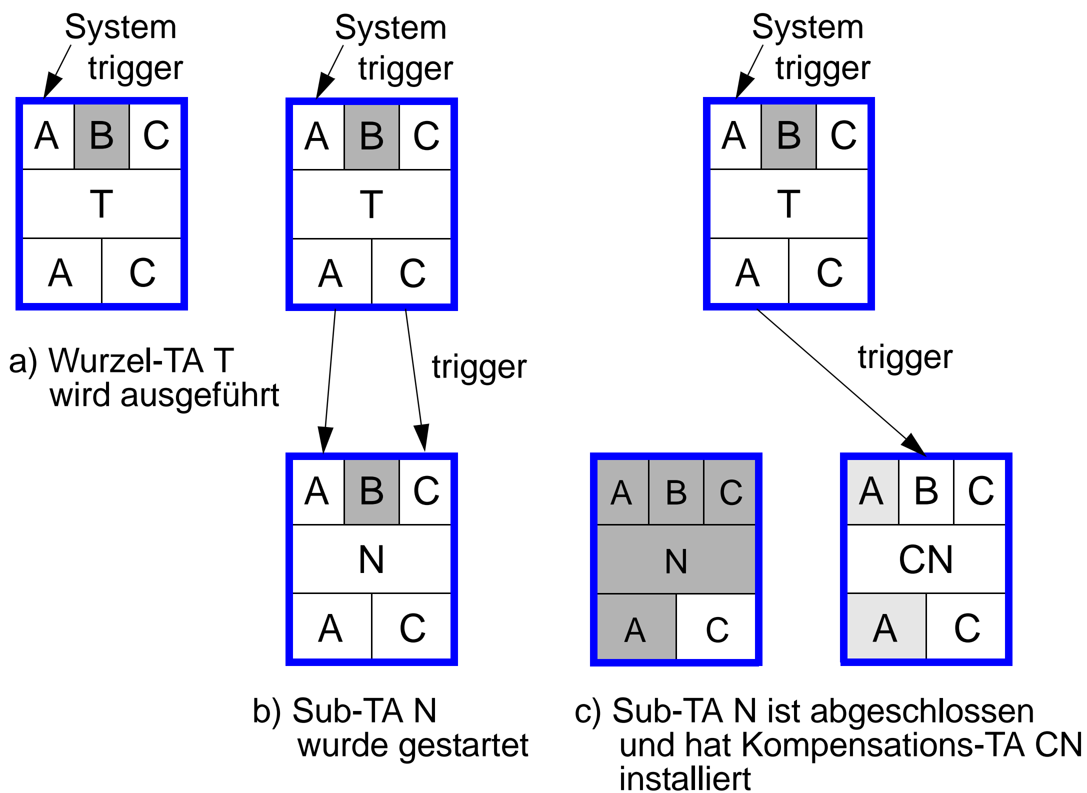
Â Beispiel: Dynamische Aufrufhierarchie in einem DBMS

- Hoher Leistungsbedarf bei komplexen Anforderungen,
  z. B bei Checkout/Checkin- oder bei interaktiver Anfrage-Verarbeitung
  - Reduktion der **Antwortzeit**, Erhöhung der **Verfügbarkeit**
  - **Parallelisierung und Verteilung** von Operationen
  - feinere **Recovery**-Granulate

  Â Bildung von Subtransaktionen im DBS-Kern

Mehrebenen-Transaktionen

- **Verallgemeinerung geschachtelter TA: offene Schachtelung**
  - Sub-TA dürfen vor Ende der Erzeuger-TA Commit ausführen ('pre-commit'), aber nicht umgekehrt!
  - danach einseitiges Zurücksetzen (Rollback) nicht mehr möglich
  - aber: **Kompensation**
    - Wirkung der Sub-TA rückgängig machen, wenn Erzeuger scheitert
    - kompensierende TA selbst wieder geschachtelte TA oder Mehrebenen-TA
- **Graphische Darstellung**



a) Wurzel-TA T wird ausgeführt

b) Sub-TA N wurde gestartet

c) Sub-TA N ist abgeschlossen und hat Kompensations-TA CN installiert

- Ein Abort darf **nicht fehlschlagen!**
  Kompensierende TA CN muss Commit durchführen. **Wirkung einer Blockierung** des A-Eingangs und des A-Zustands wird durch Restart-TA CN' realisiert

Mehrebenen-Transaktionen (2)

- **Kompensations-TA**
  - installieren, wenn Sub-TA Commit ausführt
  - aufbewahren, solange Erzeuger-TA noch läuft
  - nach Abschluss der Erzeuger-TA wegwerfen
  - **wichtig:** Kompensations-TA muss Commit erreichen!

- **Regeln für Sub-TA N:**
  - Regeln für Wurzel-TA T identisch zu denen für flache TA

  $S_B(N) : \rightarrow (+(S_A(T) \mid S_A(N)), +(S_C(T) \mid S_C(N))), ,$
  BEGIN WORK

  $S_A(N) : \rightarrow , ,$ ROLLBACK WORK

  $S_C(N) : \rightarrow +(S_A(T) \mid S_B(CN)), ,$ COMMIT WORK

- **Regeln für Kompensations-TA CN:**
  - Vorsorge für den Fehlerfall während des CN-Ablaufs
  - CN im Falle des Scheiterns neu starten als CN’ [4]
    (vgl. gekettete TA)

  $S_B(CN) : \rightarrow +(S_C(restart) \mid S_B(CN')), ,$ BEGIN WORK

  $S_A(CN) : \rightarrow , S_B(CN'),$ ROLLBACK WORK

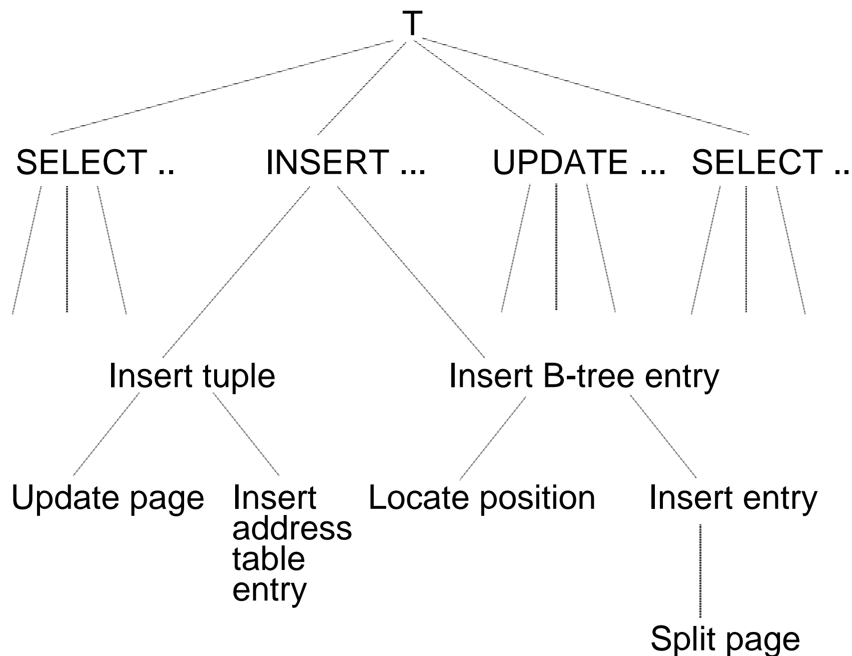
  $S_C(CN) : \rightarrow delete(S_B(CN')), ,$ COMMIT WORK

---

4. CN’ hat denselben Code, erhält dieselben Daten, hat aber einen anderen Namen. Eine AA kann nur einmal ausgeführt werden, d. h. unter anderem, dass mit ihr kein Restart ausgeführt werden kann.

Mehrebenen-Transaktionen (3)

- **Nutzung:**
  Strukturierung der **Operationshierarchie** im Schichtenmodell

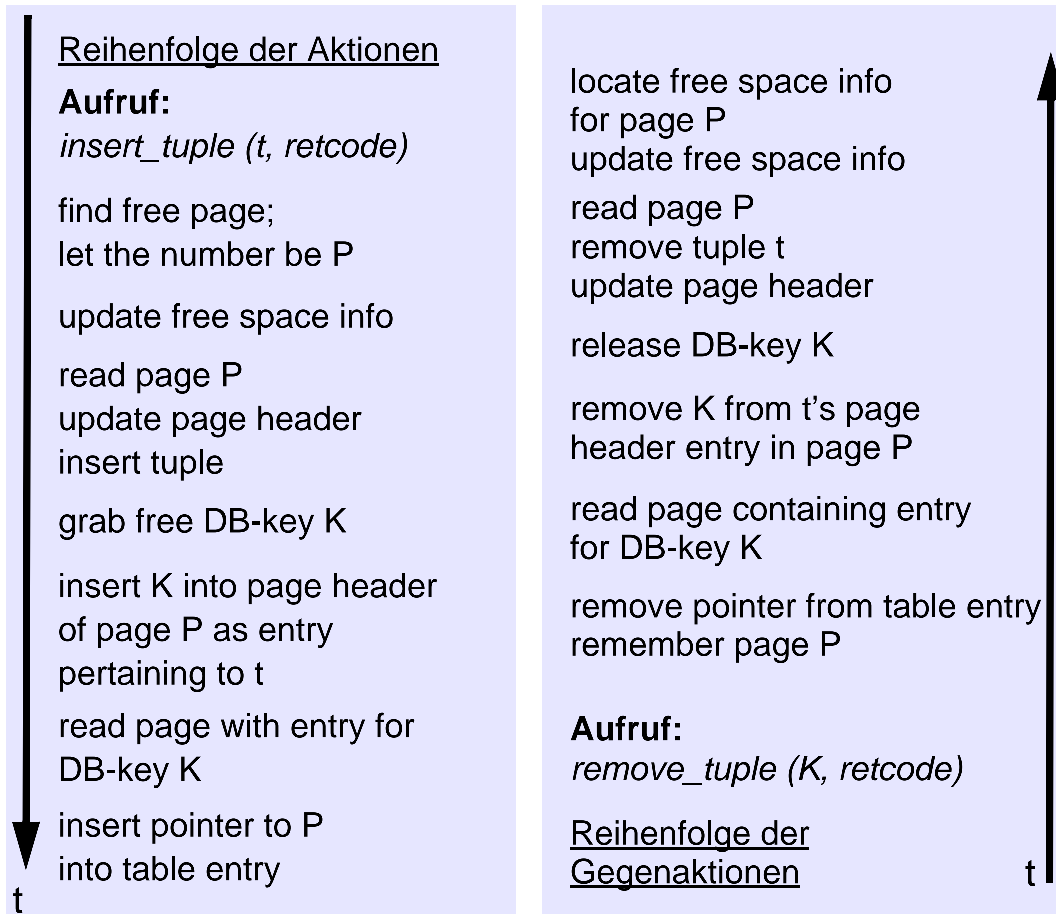


- SQL-Anweisungen können als Sub-TA aufgefasst werden
- ebenso die internen Modulaufrufe
- bei geschachtelten TA: Sperren auf Seiten, Adresstabellen, B-Baum-Seiten (!) bleiben erhalten (bei der Erzeuger-TA)
- bei Mehrebenen-TA: Sperren werden freigegeben!
  z.B. Seite für andere Sub-TA zugänglich;
  Kompensation: Tupel wieder aus Seite löschen
- **Konzept der Ebenen-zu-Ebenen-Serialisierbarkeit (L2L serializability)**

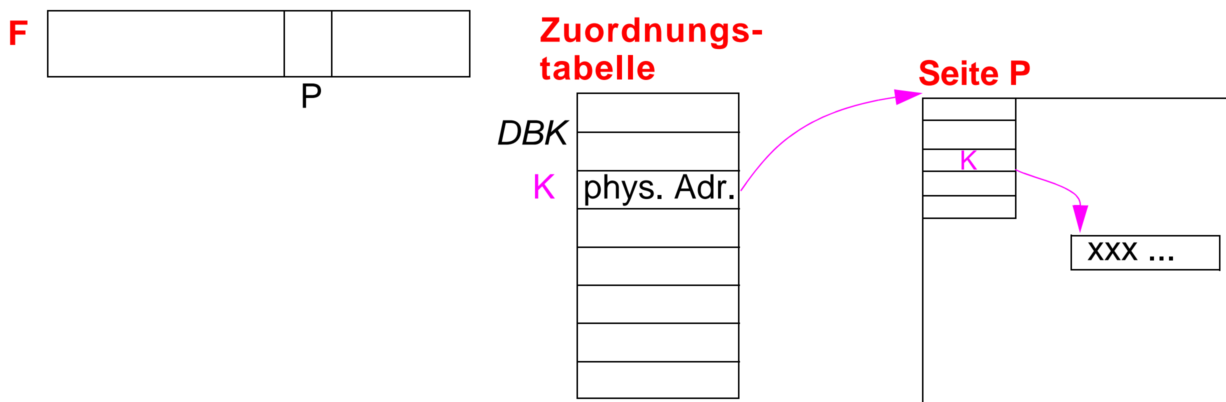
Â Voraussetzung dafür ist, eine **Gegenaktion** zur Verfügung steht, welche die **ursprüngliche Operation kompensieren** kann.

Mehrebenen-Transaktionen (4)

- **Nutzung (Forts.)**

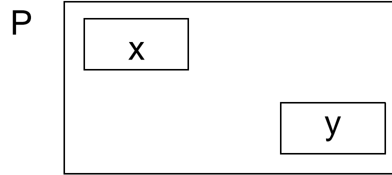


- Entfernung des Tupels funktioniert auch, wenn Seite inzwischen von anderen TA geändert wurde

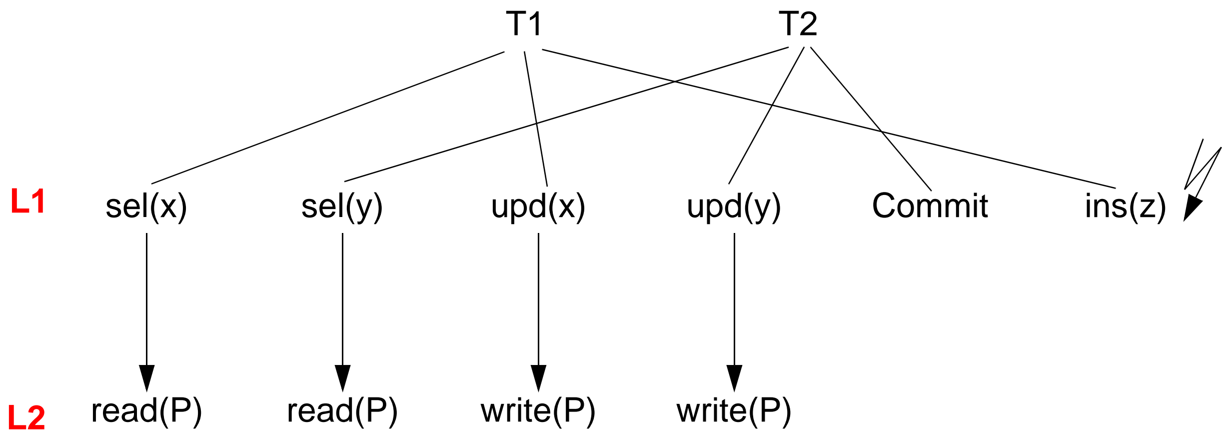


Beispiel – L2L-Serialisierbarkeit

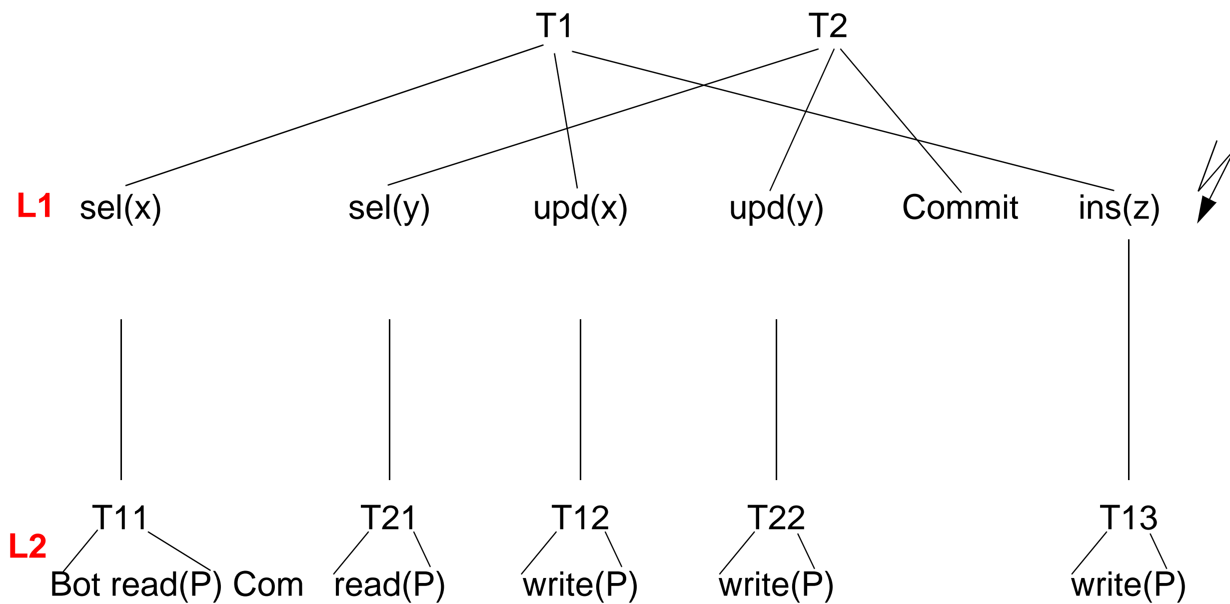
Änderung zweier TAs auf Seite P



geschlossene TAs



offene TAs



Mehrebenen-Transaktionen (5)

- **Strukturelle Voraussetzungen** für den Einsatz von Mehrebenen-TA
  - **Abstraktionshierarchie**: Gesamtes System besteht aus strikter Hierarchie von Objekten mit ihren Operationen
  - **Schichtenweise Abstraktion**: Objekte der Schicht n werden vollständig implementiert unter Verwendung von Operationen der Schicht n-1
  - **Disziplin**: Schicht n darf nur auf Objekte von Schicht n-1 zugreifen

- **Wirkungsprinzip der Mehrebenen-TA**
  - beruht nicht auf einer Enthaltenseinshierarchie,
  - sondern auf Abbildungshierarchie der Objekte
    - Jede Ebene übt Commit-Kontrolle über die auf ihr anfallenden Objektänderungen aus
    - Objekthierarchie schützt implizit alle Objekte auf niedrigeren Ebenen, die zur Implementierung von Objekten auf höherer Ebene benötigt werden
    - Bei Objekthierarchie Tupel - Seite - Block erlaubt eine Tupelsperre die vorzeitige Freigabe der Seitensperre, die zum Einfügen benötigt wird

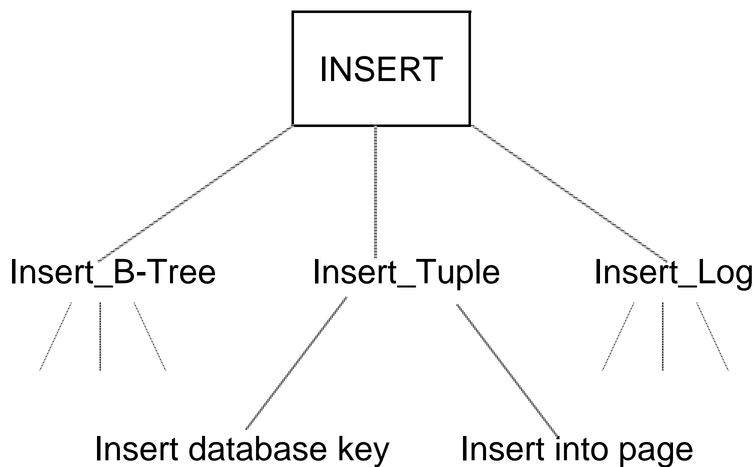


Abbildung von Operationen

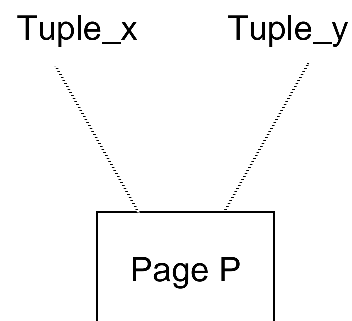
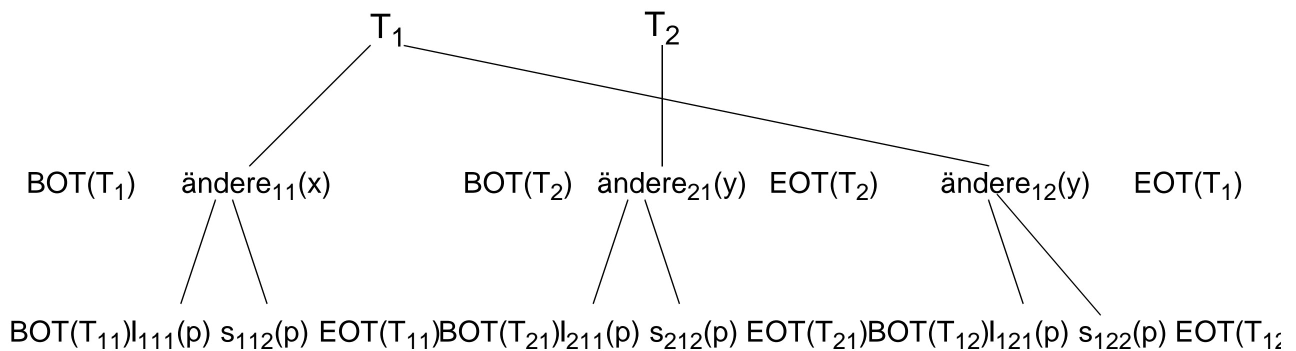


Abbildung von Objekten

Mehrebenen-Transaktionen (6)

- **Schachtelung der TA**
  - lässt sich auf beliebige Schichten (beliebige Operationen) verallgemeinern
  - theoretisch fundierter Ansatz

- **Transaktionsverwaltung in jeder Schicht**
  - Ausnutzung von Anwendungssemantik zur Synchronisation möglich
  - Wahl unterschiedlicher Synchronisationstechniken pro Schicht möglich
  - potentiell hoher Aufwand zur TA-Verwaltung, insbesondere für Logging und Recovery (Protokollierung in mehreren Schichten)
  - Beispiel: serialisierbarer Ablaufplan mit 2 Ebenen



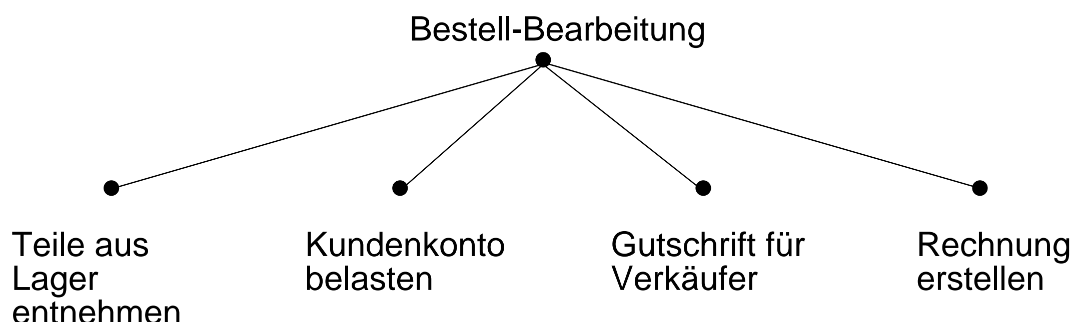
- **Wesentliche Eigenschaften**
  - **reduzierte Konfliktgefahr** zwischen TA auf niedrigeren Ebenen unter Wahrung von Serialisierbarkeit
  - **vorzeitiges Commit** (Freigabe von Änderungen/Sperren) von Sub-TA
  - **aber: "Schutzschirm" auf höherer Ebene bleibt erhalten** (z.B. striktes 2-Phasen-Sperrprotokoll für TL-TA)
  - für Gesamt-TA gelten weiterhin ACID-Eigenschaften

Offen geschachtelte Transaktionen

- **ACID für langlebige TA?**
  - sehr lange Sperren
  - Sperren vieler Objekte → Erhöhung der Blockierungsrate und Konfliktrate
  - höhere Rücksetzrate (Deadlock-Häufigkeit stark abhängig von TA-Größe)
  - höhere Chance, durch einen Systemfehler zurückgesetzt zu werden

  ⇒ **Leistungsprobleme**

- **'Anarchische' Variante der Mehrebenen-TA**
  - keine Restriktionen bzgl. semantischer Beziehung zwischen Sub-TA und Erzeuger-TA
  - **insbesondere auch keine Objekthierarchie**
  - Beispiel



  - Subtransaktionen T_i arbeiten oft auf verschiedenen Datenbeständen

- **Prinzipien**
  - Sperren werden vor Beendigung der TL-TA freigegeben
  - für jede ändernde Sub-TA T_i wird Kompensations-TA CT_i bereitgestellt
  - im Fehlerfall: Ausführung von CT_i (kein UNDO(T_i))

  ⇒ **keine Serialisierbarkeit**

Langlebige Transaktionen

- **Verarbeitung langer Batch-Anwendungen**

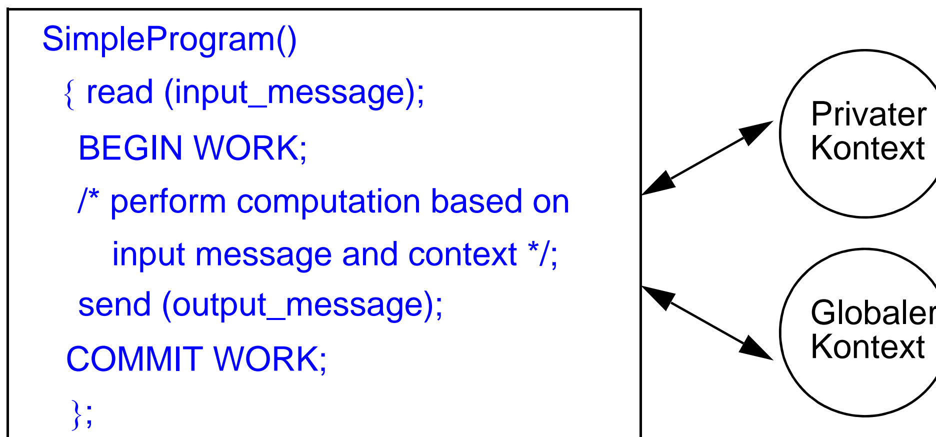
- **Einsatz von flachen Transaktionen?**
  - kontextfreie Verarbeitung: **output_msg = f (input_msg)**
  - “Exactly once”-Semantik wird eingehalten
  - Kosten im Restart-Fall
  - Sicherungspunkt oder geschachtelte TA helfen bei Crash nicht

- **Zerlegung in Mini-Batches**
  - Nutzung von Verarbeitungskontexten
  - Hintereinander-Ausführung der TA-Folge unter Beibehaltung des TA-Verarbeitungskontextes
  - **output_msg = f (input_msg, context)**

- **Kontextinformationen**
  - *Transaktion:* Cursorpositionen, ...
  - *Programm:* letzte TA, die erfolgreich Commit durchgeführt hat, ...
  - *Terminal:* Liste der Funktionen, die aufgerufen werden können; letztes ausgegebenes Fenster; Liste der Benutzer, die das Terminal benutzen dürfen, ...
  - *Benutzer:* letzter Auftrag, den der Benutzer bearbeitet hat; nächstes zu benutzendes Passwort, ...

Langlebige Transaktionen (2)

- **Einsatz von Verarbeitungskontexten**
  - Ausführung eines kontext-sensitiven TA-Programms beruht auf
    - den **Parametern in der Eingabe-Nachricht**
    - und **Zustandsinformationen als Kontext**



- **Ergebnis**
  - ist eine **Ausgabenachricht**
  - und ein **geänderter Kontext**

- **Eigenschaften langlebiger Transaktionen**
  - Minimierung der verlorengegangenen Arbeit im Fehlerfall
  - wiederherstellbarer Verarbeitungszustand
  - expliziter Kontrollfluss
  - Einhaltung der ACID-Eigenschaften

Langlebige Transaktionen (3)

- **Beispiel: Zinsberechnung**

```
ComputeInterest (interest_rate) {

#include <string.h>
#include <sqlca.h>
#define max_account_no 999999

exec sql begin declare section;
  long last_account_done;
  double interest_rate;
  int logsize;
exec sql end declare section;

exec sql define stepsize 1000;

/* Annahme: Kontonr. 1 bis 1000000,
Relation batchcontext enthält id des
letzten Mini-Batches */

logsize = 0;
exec sql select count (*) into :logsize
         from batchcontext;

if (sqlca.sqlcode != 0 | | logsize = = 0)   {
/* batchcontext entweder nicht vorhanden oder
leer → Anfang der Kette */
  exec sql begin work;
  exec sql drop table batchcontext;
  exec sql create table batchcontext
      (last_account_done integer);
  last_account_done = 0;
  exec sql insert into batchcontext
      values (: last_account_done);
  exec sql commit work;
}
```

Langlebige Transaktionen (4)

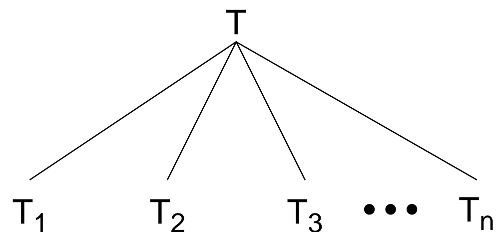
- **Beispiel: Zinsberechnung (Forts.)**

```
else   {
  /* Restart */
  exec sql select last_account_done
    into :last_account_done
    from batchcontext;
}
while (last_account_done < max_account_no)   {
  /* ein Mini-Batch: */
  exec sql begin work;
  exec sql update accounts
    set account_total = account_total
        * (1 + :interest_rate)
    where account_no between
      : last_account_done + 1 and
      : last_account_done + :stepsize;
  exec sql update batchcontext
    set last_account_done =
    last_account_done + :stepsize;
  exec sql commit work;
  last_account_done =
    last_account_done + stepsize;
}
/* letzter Mini-Batch ausgeführt */
exec sql begin work;
exec sql drop table batchcontext;
exec sql commit work;
return;
}
```

Sagas

- **Linderung der LLT-Probleme bei speziellen Anwendungen**
  - vorzeitige Freigabe von Ressourcen
  - LLT nicht mehr atomar, jedoch keine Preisgabe der DB-Konsistenz
  - Koordinierte Fehlerbehandlung bzw. Rücksetzung erforderlich

- **Spezielle Art von zweistufigen geschachtelten TA**
  - **Saga** ≡ LLT, die in eine Sammlung von Subtransaktionen aufgeteilt werden kann



- **Aspekte der Ablaufsteuerung und -kontrolle**
  - T_i geben alle Ressourcen (z. B. Sperren) frei
  - expliziter Kontrollfluss zwischen den T_i (Sequenz) im AW-Programm
  - Synchronisation verlangt Serialisierbarkeit der T_i, jedoch nicht von T
  - Konfliktbehandlung durch Warten oder Abbruch von T_i oder von T
  - Fehlerbehandlung von T_i durch UNDO(T_i) und Kompensation $CT_{i-1}, ..., CT_1$

- **Es muss für Kompensation gesorgt werden!**
  - alle T_i gehören zusammen
  - Bereitstellung von Kompensationstransaktionen CT_i für jede T_i

  Â keine teilweise Ausführung von T

Sagas (2)

- **Eine Saga**
  ist eine Menge flacher Transaktionen T_1, T_2, ..., T_n,
  die im einfachsten Fall sequentiell verarbeitet wird

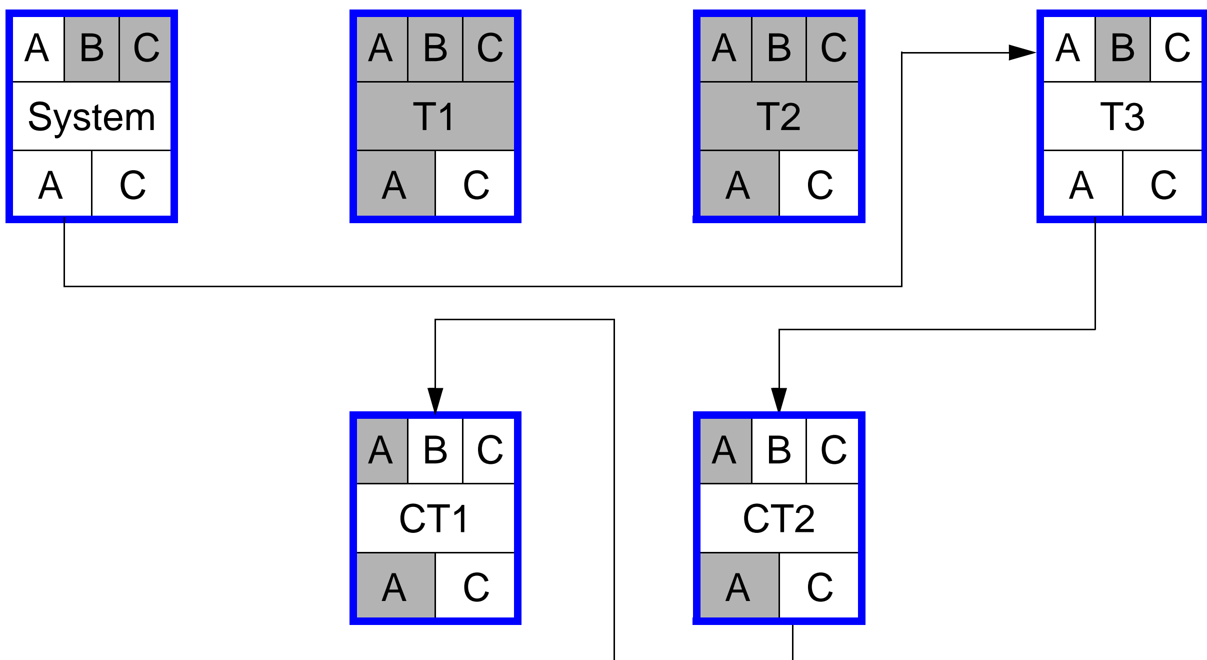
- **Zusicherung des DBS**
  - Das Endergebnis einer Saga ist entweder die Ausführungsfolge

    T_1, T_2, ..., T_i, ..., T_{n-1}, T_n
  - oder bei einem Fehler im Schritt j

    T_1, T_2, ..., T_j (abort), CT_{j-1}, ..., CT_2, CT_1
  - DBS garantiert LIFO-Ausführung der Kompensationen im Fehlerfall

- **T_j, $CT_j \neq$ UNDO(T_j) im allgemeinen Fall**
  - für CT_j müssen Ressourcen wieder angefordert werden
  - Deadlock-Gefahr

- **Graphische Darstellung** (Momentaufnahme mit Planung künftiger TA)



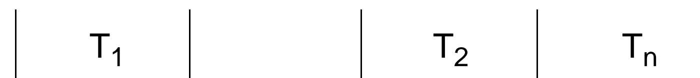
Sagas (3)

- **Struktur**

BEGIN_SAGA		BOT	
ABORT_SAGA	und	ABORT	wie bei flachen TA
END_SAGA		EOT	

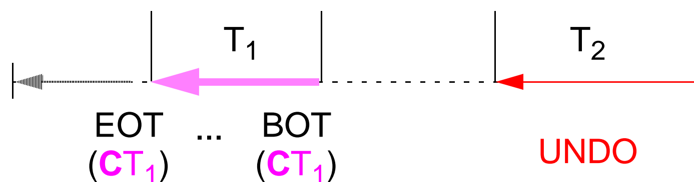
- **Ablauf**

a) BS ... BOT(T_1) ... EOT(T_1) ... BOT(T_2) ... EOT(T_2) ... EOT(T_n) ... ES



b) BS ... BOT(T_1) ... EOT(T_1) ... BOT(T_2) ... ABORT

c) BS ... BOT(T_1) ... EOT(T_1) ... BOT(T_2) ... ABORT_SAGA



d) Unterbrechung durch Systemfehler: wie Fall c

- **Zusammenfassung:**

ACID Für jede Sub-TA T_i
(D kann durch Kompensation aufgehoben werden)

CD für umfassende TA T

Sagas (4)

- **Verfeinerung:**
  Reduktion des Aufwandes beim Scheitern einer Saga oder bei Systemfehler durch Nutzung von Savepoints
  - Sicherung des AP-Zustandes
  - Übergabe der Savepoint-ID an ABORT_SAGA

- **Partielles Rücksetzen möglich**

  Scenario:
  - Savepoint nach T_1 und T_3
  - Crash nach T_2 und T_5

  Ablauf:

  BS, T_1, T_2, CT_2, T_2, T_3, T_4, T_5, CT_5, CT_4, T_4, T_5, T_6, ES

- **C_i ist Anwendungsprogramm (vordefinierte TA)**
  - Speicherung in DB vorteilhaft
  - keine unkontrollierten Programme
  - aktuelle Parameter für CT_i aus DB

  Â automatische Recovery möglich!

Zusammenfassung

- **Transaktionskonzept (ACID) hat sich durchgesetzt**
  - gut verstanden
  - leistungsfähige Implementierungen
  - Einsetzbarkeit über den DB-Bereich hinaus
    (Dateisysteme, Mail-Service, ...)

- **Geschlossen geschachtelte Transaktionen**
  - Unterstützung von Intra-Transaktionsparallelität
  - feinere Rücksetzeinheiten
  - v.a. in verteilten Systemen wichtig

- **Offen geschachtelte Transaktionen (z.B. Sagas)**
  - Unterstützung langlebiger Transaktionen
  - Reduzierung der Konfliktgefahr durch vorzeitige Sperrfreigabe
    (Â erhöhte Inter-Transaktionsparallelität)
  - Recovery durch Kompensation

- **TA-Konzept für kurze TA**
  - in zentralen DBS
    gut verstanden, leistungsfähige Implementierungen
  - in verteilten DB/DC-Systemen
    Leistungsprobleme, offene Fragen bei Fehlertoleranzaspekten

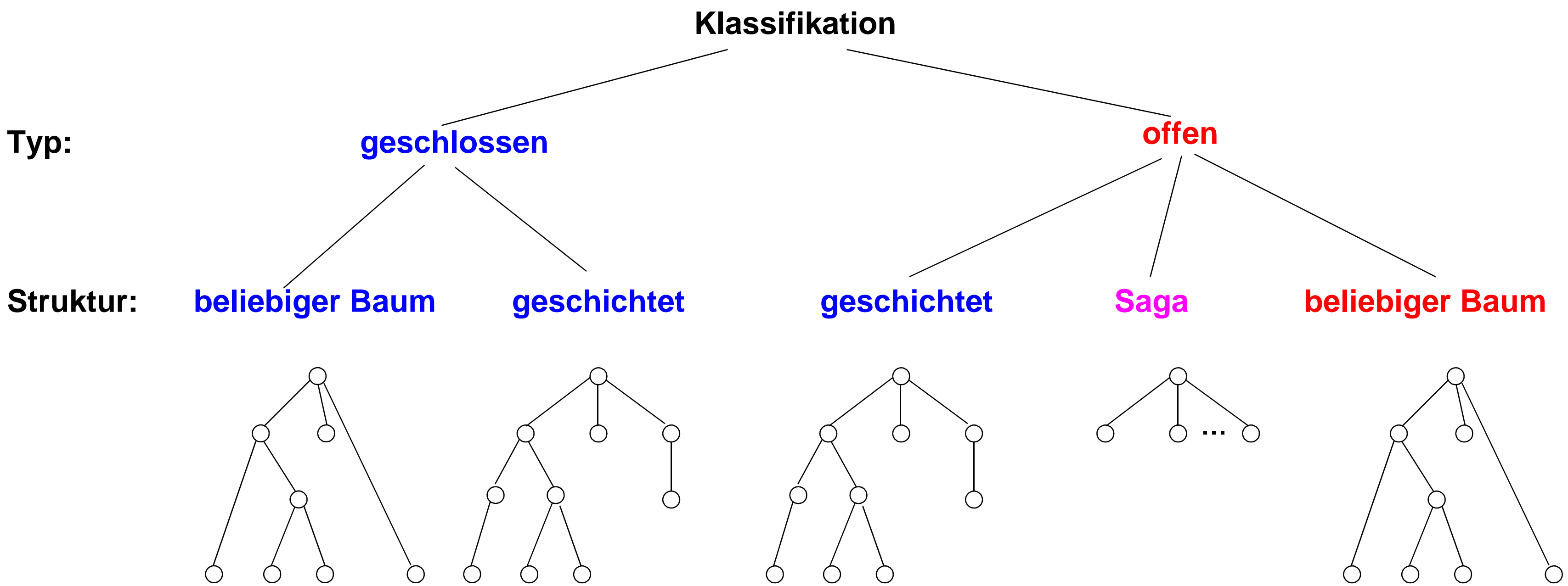
- **Mischung kurzer TA, Mehrschritt-TA und Batch-TA**
  - schwierigere Synchronisations- und Leistungsprobleme
  - Abschwächung der Serialisierbarkeitsbedingung
  - Nutzung von Semantik

Zusammenfassung und Ausblick

- **TA-Konzept in Entwurfsanwendungen**
  - anwendungsbezogene Definition
  - Nutzung von Semantik bei Synchronisation und Recovery
  - Rücksetzen auf Binnen-Sicherungspunkte
  - Nutzung von Versionen
  - Orientierung der Recovery und Synchronisation an AW-Objekten
- **Unterstützung der Kooperation**
  - zugeschnittene Verarbeitungsmodelle
  - Workstation/Server-Architektur
  - Unterstützung von Gruppenarbeit
  - Systemkontrollierte Kooperation (Delegation von Teilaufträgen, Austausch vorläufiger Entwurfsdaten, Verhandeln von Entwurfszielen)
- **Neudefinition/Erweiterung des TA-Konzeptes**
  - für Realzeitanwendungen
  - für XPS-Anwendungen
- Viele Vorschläge für geschachtelte TA-Konzepte

  Â aber: Nachweis effizienter Implementierbarkeit fehlt!
- **TA-Konzept und Betriebssystem**
  - welche Unterstützungsmöglichkeiten?
  - Integration des TA-Konzeptes?

Geschachtelte Transaktionen



TL-TA:	**ACID**, serialisierbar	**ACID**, serialisierbar	**CD**	?
Sub-TA:	**AI**, serialisierbar innerhalb der Vater-TA	**AID**, L2L-serialisierbar	**ACID**, serialisierbar	?
Rücksetzen:	Undo	Compensate	Compensate aktuelle TA: Undo	?

Vergleich der Transaktionsmodelle

	geschachtelte TA	Mehrebenen-TA offen geschacht. mit Disziplin	offene geschachtelte TA	Batch-TA (langlebige TA)	Sagas	Entwurfs-TA (Ausblick)
expliziter Kontrollfluss (außerhalb TA)	-	-	-	einfache Sequenz	Verkettung, einfache Sequenz	-
frühzeitige Frei-gabe von Ände-rungen	-	nur relativ zur selben Schicht	ja	frühestens am Ende einer Teil-TA	frühestens am Ende einer Teil-TA	im Kooperations-modus
stabile Ergeb-nisse nach Systemausfall	-	-	für die TA, die unabhängig Commit gemacht haben	für die schon beendete Teil-TA	-	nur wenn Objektversion in Gruppen-DB eingebracht
Begrenzung der dynamischen Rücksetzung (Rollback)	ja	ja	ja	-	-	-
Korrektheit	Serialisierbarkeit	Serialisierbarkeit	-	Serialisierbarkeit der Einzel-TA	Serialisierbarkeit der Einzel-TA	Kooperation auf vorläufigen Objekten
Kontext-Verwal-tung für zusam-menhängende Abläufe	-	-	-	teilweise	-	-
explizte Konflikt-behandlung	-	-	-	-	-	Grant-/Return-Protokoll