

6. Serialisierbarkeit¹

• Anomalien im Mehrbenutzerbetrieb

- Verlorengangene Änderungen
- Inkonsistente Analyse, Phantom-Problem usw.

• Synchronisation von Transaktionen

- Ablaufpläne, Modellannahmen
- Korrektheitskriterium
- Konsistenzerhaltende Ablaufpläne

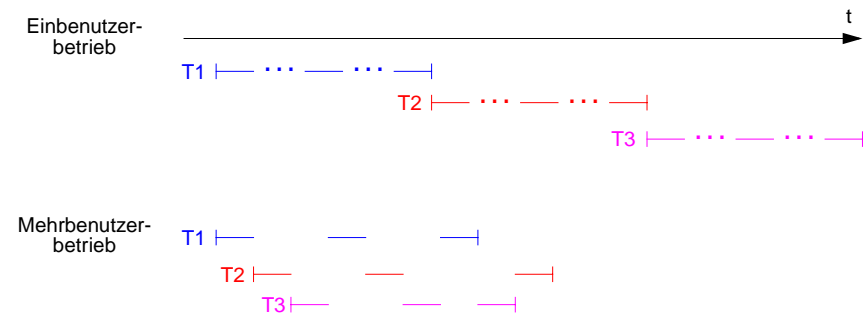
• Theorie der Serialisierbarkeit

- Beschränkung auf Konfliktserialisierbarkeit
- Äquivalenz von Historien
- Serialisierbarkeitstheorem
- Klassen von Historien
 - SR: serialisierbare Historien
 - RC: rücksetzbare Historien
 - ACA: Historien ohne kaskadierendes Rücksetzen
 - ST: strikte Historien
 - S: serielle Historien

• Beispiele

Warum Mehrbenutzerbetrieb?

• Ausführung von Transaktionen



- CPU-Nutzung während TA-Unterbrechungen
 - E/A
 - Denkzeiten bei Mehrschritt-TA
 - Kommunikationsvorgänge in verteilten Systemen
- bei langen TA zu große Wartezeiten für andere TA (Scheduling-Fairneß)

Anomalien im unkontrollierten Mehrbenutzerbetrieb

1. Abhängigkeit von nicht freigegebenen Änderungen (*dirty read, dirty overwrite*)
2. Verlorengangene Änderung (*lost update*)
3. Inkonsistente Analyse (*non-repeatable read*)
4. Phantom-Problem
5. Integritätsverletzung durch Mehrbenutzer-Anomalie
6. Instabilität von Cursor-Positionen

→ nur durch Änderungs-TA verursacht

1. Bernstein, P.A., Hadzilacos, V., Goodman, N.: Concurrency Control and Recovery in Database Systems, Addison-Wesley Publ. Comp., 1987 (<http://research.microsoft.com/pubs/ccontrol/>)

Unkontrollierter Mehrbenutzerbetrieb

- Abhängigkeit von nicht freigegebenen Änderungen

T1	T2
read (A); A := A + 100 write (A);	read (A); read (B); B := B + A; write (B); commit;
abort;	

- Geänderte, aber noch nicht freigegebene Daten werden als „schmutzig“ bezeichnet (dirty data), da die TA ihre Änderungen bis Commit (einseitig) zurücknehmen kann
- Schmutzige Daten dürfen von anderen TAs nicht in „kritischen“ Operationen benutzt werden

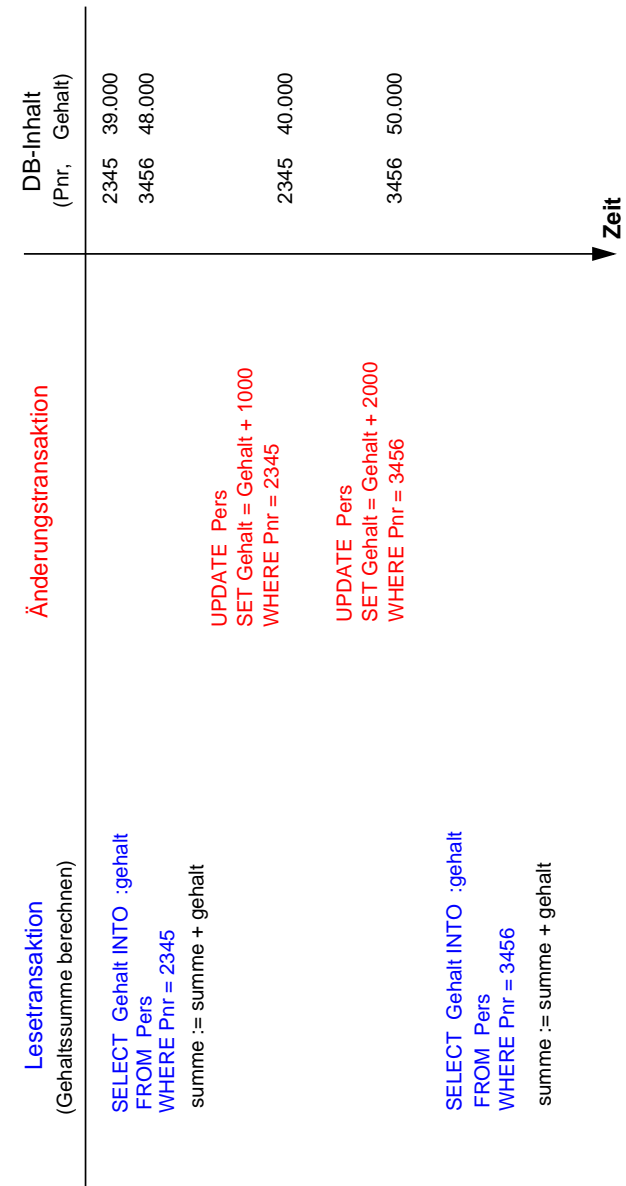
- Verlorengegangene Änderung (Lost Update)

T1	T2	A in DB
read (A); A := A - 1; write (A);	read (A); A := A - 1; write (A);	

➔ Verlorengegangene Änderungen sind auszuschließen!

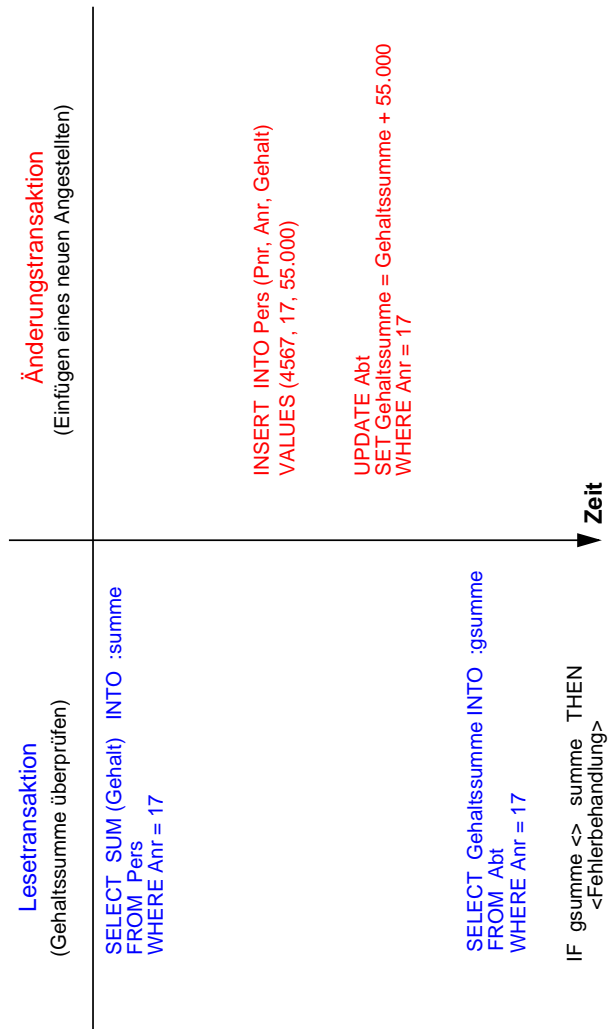
Inkonsistente Analyse (Non-repeatable Read)

Das wiederholte Lesen einer gegebenen Folge von Daten führt auf verschiedene Ergebnisse:



Phantom-Problem

Einfügungen oder Löschungen können Leser zu falschen Schlussfolgerungen verleiten:



Unkontrollierter Mehrbenutzerbetrieb (2)

• Integritätsverletzung durch Mehrbenutzer-Anomalie

- Integritätsbedingung: $A = B$
- $T1 := (A := A + 10; B := B + 10)$
- $T2 := (A := A * 2; B := B * 2)$

- Probleme bei verschränktem Ablauf

T1	T2	A	B
read (A); A := A + 10; write (A);	read (A); A := A * 2; write (A); read (B); B := B * 2; write (B);		
read (B); B := B + 10; write (B);			

➔ Synchronisation (Sperrern) einzelner Datensätze reicht nicht aus!

• Cursor-Referenzen

- Zwischen dem Finden eines Objektes mit Eigenschaft P und dem Lesen seiner Daten wird P nach P' verändert

T1	T2
Positioniere Cursor C auf nächstes Objekt (A) mit Eigenschaft P	Verändere $P \rightarrow P'$ bei A
Lies laufendes Objekt	

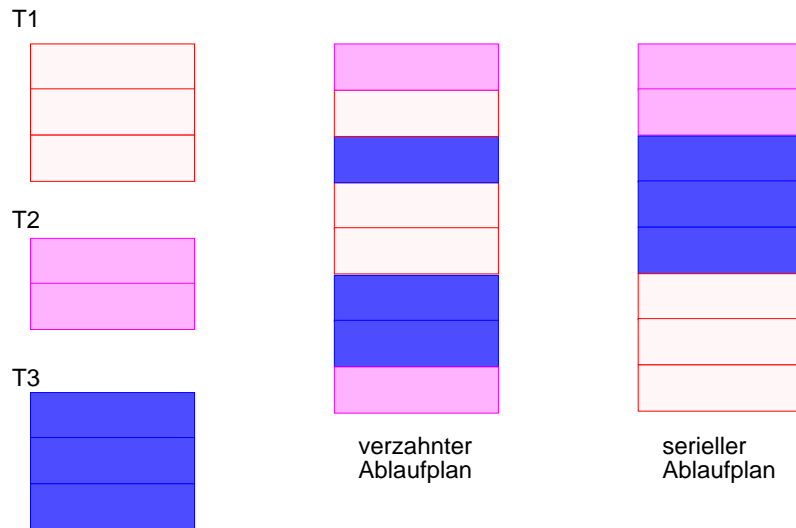
➔ Cursor-Stabilität sollte gewährleistet werden!

Synchronisation von Transaktionen

- **TRANSAKTION:** Ein Programm T mit DML-Anweisungen, das folgende Eigenschaft erfüllt:

Wenn T **allein** auf einer konsistenten DB ausgeführt wird, dann terminiert T (irgendwann) und hinterläßt die DB in einem konsistenten Zustand. (Während der TA-Verarbeitung gibt es keine Konsistenzgarantien!)

- **Ablaufpläne für 3 Transaktionen**



➔ Wenn Transaktionen seriell ausgeführt werden, dann bleibt die Konsistenz der DB erhalten.

- **Ziel der Synchronisation:**

logischer Einbenutzerbetrieb,
d.h. Vermeidung aller Mehrbenutzeranomalien

➔ **Fundamentale Fragestellung:**

Wann ist die parallele Ausführung von n Transaktionen auf gemeinsamen Daten korrekt?

Synchronisation von Transaktionen (2)

- **Beispiel für einige Ausführungsvarianten**

Ausführung 1		Ausführung 2		Ausführung 3	
T1	T2	T1	T2	T1	T2
read (A)		read (A)		read (A)	
A - 1			read (B)	A - 1	
write (A)		A - 1			read (B)
read (B)			B - 2	write (A)	
B + 1		write (A)			B - 2
write (B)			write (B)	read (B)	
	read (B)	read (B)			write (B)
	B - 2		read (C)	B + 1	
	write (B)	B + 1			read (C)
	read (C)		C + 2	write (B)	
	C + 2	write (B)			C + 2
	write (C)		write (C)		write (C)

➔ **Bei serieller Ausführung bleibt der Wert von A + B + C unverändert!**

- **Was ist das Ergebnis der verschiedenen Ausführungsvarianten?**

	A	B	C	A + B + C
initialer Wert				
nach T1; T2				
nach Ausf. 2				
nach Ausf. 3				
nach T2; T1				

- **Ziel:** Äquivalenz der Ergebnisse von verzahnten Ausführungen zu einer der möglichen seriellen Ausführungen

Synchronisation – Modellannahmen

- **Modellbildung**



- **Read/Write-Modell (Page Model)**

- DB ist Menge von unteilbaren, uninterpretierten Datenobjekten (z. B. Seiten)
- DB-Anweisungen lassen sich nachbilden durch atomare Lese- und Schreiboperationen auf Objekten:

- $r_i[A]$, $w_i[A]$ zum Lesen bzw. Schreiben des Datenobjekts A
- c_i , a_i zur Durchführung eines **commit** bzw. **abort**

- **Transaktion** wird modelliert als eine endliche Folge von Operationen p_i :

$$T = p_1 p_2 p_3 \dots p_n \quad \text{mit} \quad p_i \in \{r[x_i], w[x_i]\}$$

- Eine vollständige TA hat als letzte Operation entweder einen Abbruch a oder ein Commit c

$$T = p_1 \dots p_n a \quad \text{oder} \quad T = p_1 \dots p_n c$$

- ➔ **Für eine TA T_i werden diese Operationen mit r_i , w_i , c_i oder a_i bezeichnet, um sie zuordnen zu können**

- **Die Ablauffolge von TA mit ihren Operationen kann durch eine *Historie (Schedule)* beschrieben werden:**

Beispiel:

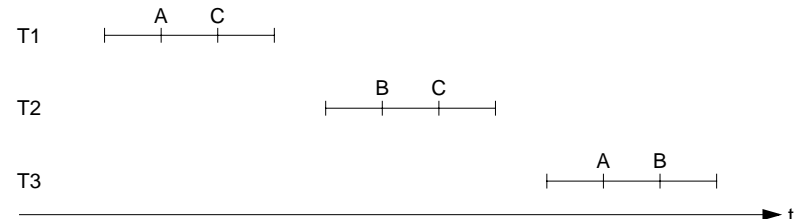
$r_1[A] \ r_2[A] \ r_3[B] \ w_1[A] \ w_3[B] \ r_1[B] \ c_1 \ r_3[A] \ w_2[A] \ a_2 \ w_3[C] \ c_3 \dots$

Korrektheitskriterium der Synchronisation

- **Serieller Ablauf von Transaktionen**

$TA = \{T1, T2, T3\}$

$DB = \{A, B, C\}$



Ausführungsreihenfolge:

- **$T1 \mid T2$ bedeutet:**

**$T1$ sieht keine Änderungen von $T2$ und
 $T2$ sieht alle Änderungen von $T1$**

- **Formales Korrektheitskriterium: *Serialisierbarkeit*:**

Die parallele Ausführung einer Menge von TA ist **serialisierbar**, wenn es eine serielle Ausführung derselben TA-Menge gibt, die den **gleichen DB-Zustand** und die **gleichen Ausgabewerte** wie die ursprüngliche Ausführung erzielt.

- **Hintergrund:**

- Serielle Ablaufpläne sind korrekt!
- Jeder Ablaufplan, der denselben Effekt wie ein serieller erzielt, ist akzeptierbar

Konsistenzertretende Ablaufpläne

- Die TA T1-T3 müssen so synchronisiert werden, daß der resultierende Zustand der DB gleich dem ist, der bei der seriellen Ausführung in einer der folgenden Sequenzen zustande gekommen wäre:

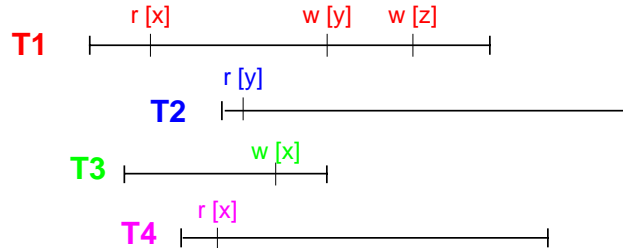
T1, T2, T3	T2, T1, T3	T3, T1, T2
T1, T3, T2	T2, T3, T1	T3, T2, T1

- Bei n TA gibt es n! (hier 3! = 6) mögliche serielle Ablaufpläne
- Serielle Ablaufpläne können verschiedene Ergebnisse haben!

Abbuchung/Einzahlung auf Konto: TA1: - 5000; TA2: + 2000

Konto	Stand = 2000	Limit = 2000
-------	--------------	--------------

- Nicht alle seriellen Ablaufpläne sind möglich!



- Sinnvolle Einschränkungen

1. Reihenfolgeertretende Serialisierbarkeit:

Jede TA sollte wenigstens alle Änderungen sehen, die bei ihrem Start (BOT) bereits beendet waren

2. Chronologieertretende Serialisierbarkeit:

Jede TA sollte stets die aktuellste Objektversion sehen

Theorie der Serialisierbarkeit

- Ablauf einer Transaktion

- Häufigste Annahme: streng sequentielle Reihenfolge der Operationen
- Serialisierbarkeitstheorie läßt sich auch auf Basis einer partiellen Ordnung ($<$) entwickeln
- TA-Abschluß: **abort** oder **commit** – aber nicht beides!

- Konsistenzanforderungen an eine TA

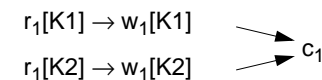
- Falls T_i ein **abort** durchführt, müssen alle anderen Operationen $p_i[A]$ vor a_i ausgeführt werden: $p_i[A] < a_i$
- Analoges gilt für das **commit**: $p_i[A] < c_i$
- Wenn T_i ein Datum A liest und auch schreibt, ist die Reihenfolge festzulegen:
 $r_i[A] < w_i[A]$ oder $w_i[A] < r_i[A]$

- Beispiel: Überweisungs-TA T1 (von K1 nach K2)

$r_1[K1]$	oder	$r_1[K1]$	$r_1[K2]$
$w_1[K1]$		$w_1[K1]$	$w_1[K2]$
$r_1[K2]$			c_1
$w_1[K2]$			
c_1			

- Totale Ordnung: $r_1[K1] \rightarrow w_1[K1] \rightarrow r_1[K2] \rightarrow w_1[K2] \rightarrow c_1$

- Partielle Ordnung



Theorie der Serialisierbarkeit (2)

• Historie²

- Unter einer Historie versteht man den Ablauf einer (verzahnten) Ausführung mehrerer TA
- Sie spezifiziert die Reihenfolge, in der die Elementaroperationen verschiedener TA ausgeführt werden
 - Einprozessorsystem: totale Ordnung
 - Mehrprozessorsystem: parallele Ausführung einiger Operationen möglich → **partielle Ordnung**

• Konfliktoperationen:

Kritisch sind Operationen verschiedener Transaktionen auf **denselben DB-Daten**, wenn diese Operationen **nicht reihenfolgeunabhängig** sind!

• Was sind Konfliktoperationen?

- $r_i[A]$ und $r_j[A]$: Reihenfolge ist irrelevant
 - **kein Konflikt!**
- $r_i[A]$ und $w_j[A]$: Reihenfolge ist relevant und festzulegen.
Entweder $r_i[A] \rightarrow w_j[A]$
 - **R/W-Konflikt!**oder $w_j[A] \rightarrow r_i[A]$
 - **W/R-Konflikt!**
- $w_i[A]$ und $r_j[A]$: analog
- $w_i[A]$ und $w_j[A]$: Reihenfolge ist relevant und festzulegen
 - **WW-Konflikt!**

2. Der Begriff Historie bezeichnet eine retrospektive Sichtweise, also einen abgeschlossenen Vorgang. Ein Scheduling-Algorithmus (Scheduler) produziert Schedules, wodurch noch nicht abgeschlossene Vorgänge bezeichnet werden. Manche Autoren machen jedoch keinen Unterschied zwischen Historie und Schedule.

Theorie der Serialisierbarkeit (3)

• Beschränkung auf Konflikt-Serialisierbarkeit³

• Historie H für eine Menge von TA $\{T_1, \dots, T_n\}$

ist eine Menge von Elementaroperationen mit partieller Ordnung $<_H$, so daß gilt:

$$1. H = \bigcup_{i=1}^n T_i$$

2. $<_H$ ist verträglich mit allen $<_i$ -Ordnungen, d.h.

$$<_H \supseteq \bigcup_{i=1}^n <_i$$

3. Für zwei Konfliktoperationen $p, q \in H$ gilt entweder

$$p <_H q$$

oder

$$q <_H p$$

• Ein Schedule ist ein Präfix einer Historie

3. In der Literatur werden verschiedene Formen der Serialisierbarkeit, also der Äquivalenz zu einer seriellen Historie, definiert. Die **Final-State-Serialisierbarkeit** besitzt die geringsten Einschränkungen. Intuitiv sind zwei Historien (mit der gleichen Menge von Operationen) final-state-äquivalent, wenn sie jeweils denselben Endzustand für einen gegebenen Anfangszustand herstellen. Historien mit dieser Eigenschaft sind in der Klasse FSR zusammengefaßt. Die **View-Serialisierbarkeit** (Klasse VSR) schränkt FSR weiter ein. Die hier behandelte **Konflikt-Serialisierbarkeit** (Klasse CSR) ist für praktische Anwendungen die wichtigste. Sie ist effizient überprüfbar und unterscheidet sich bereits dadurch wesentlich von den beiden anderen Serialisierbarkeitsbegriffen.

Es gilt: $CSR \subset VSR \subset FSR$

Theorie der Serialisierbarkeit (4)

- Beispiel-Historie für 3 TA

$$\begin{array}{ccccccc}
 & r_2[A] & \rightarrow & w_2[B] & \rightarrow & w_2[C] & \rightarrow & c_2 \\
 & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & & \\
 H = & r_3[B] & \rightarrow & w_3[A] & \rightarrow & w_3[B] & \rightarrow & w_3[C] & \rightarrow & c_3 \\
 & & & \uparrow & & & & & & \\
 & r_1[A] & \rightarrow & w_1[A] & \rightarrow & c_1 & & & &
 \end{array}$$

- Reihenfolge konfliktfreier Operationen (zwischen TA) wird nicht spezifiziert

- Mögliche totale Ordnung⁴

$$H_1 = r_1[A] \rightarrow r_3[B] \rightarrow w_1[A] \rightarrow w_3[A] \rightarrow c_1 \rightarrow r_2[A] \rightarrow w_3[B] \rightarrow$$

$$w_3[C] \rightarrow c_3 \rightarrow w_2[B] \rightarrow w_2[C] \rightarrow c_2$$

Theorie der Serialisierbarkeit (5)

- Definition: Äquivalenz zweier Historien

- Zwei Historien H und H' sind äquivalent, wenn sie die Konfliktoperationen der nicht abgebrochenen TA in derselben Reihenfolge ausführen:

$$H \equiv H', \text{ wenn } p_i <_H q_j, \text{ dann auch } p_i <_{H'} q_j$$

- **Anordnung** der **konfliktfreien** Operationen ist **irrelevant**

- **Reihenfolge** der Operationen **innerhalb** einer TA bleibt **invariant**

- Beispiel

$$\begin{array}{ccccccc}
 & r_2[A] & \rightarrow & w_2[B] & \rightarrow & c_2 \\
 & \uparrow & & \uparrow & & \\
 H = & r_1[A] & \rightarrow & w_1[A] & \rightarrow & w_1[B] & \rightarrow & c_1
 \end{array}$$

- Totale Ordnung

$$H_1 = r_1[A] \rightarrow w_1[A] \rightarrow r_2[A] \rightarrow w_1[B] \rightarrow c_1 \rightarrow w_2[B] \rightarrow c_2$$

$$H_2 = r_1[A] \rightarrow w_1[A] \rightarrow w_1[B] \rightarrow c_1 \rightarrow r_2[A] \rightarrow w_2[B] \rightarrow c_2$$

$$H_1 \equiv H_2 \text{ (ist seriell)}$$

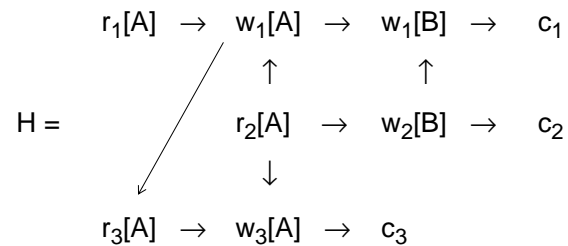
4. Alternative Schreibweise bei einer totalen Ordnung: Weglassen der \rightarrow

Serialisierbare Historie

- Eine Historie H ist serialisierbar, wenn sie äquivalent zu einer seriellen Historie H_s ist

- Einführung eines Konfliktgraph $G(H)$
(auch Serialisierbarkeitsgraph $SG(H)$ genannt)
 - Konstruktion des $G(H)$ über den erfolgreich abgeschlossenen TA
 - Konfliktoperationen p_i, q_j aus H mit $p_i <_H q_j$ fügen eine Kante $T_i \rightarrow T_j$ in $G(H)$ ein, falls nicht schon vorhanden

- Beispiel-Historie



- Zugehöriger Konfliktgraph

$G(H)$:

- **Serialisierbarkeitstheorem**

Eine Historie H ist genau dann serialisierbar, wenn der zugehörige Konfliktgraph $G(H)$ azyklisch ist

➔ **Topologische Sortierung!**

- **CSR**

bezeichne die Klasse aller konfliktserialisierbaren Historien. Die Mitgliedschaft in CSR lässt sich in Polynomialzeit in der Menge der teilnehmenden TA testen

Serialisierbare Historie (2)

- Historie

$H =$

$w_1[A] \rightarrow w_1[B] \rightarrow c_1 \rightarrow r_2[A] \rightarrow r_3[B] \rightarrow w_2[A] \rightarrow c_2 \rightarrow w_3[B] \rightarrow c_3$

- Konfliktgraph

$G(H)$:

- Topologische Ordnungen

$H_s^1 = w_1[A] \rightarrow w_1[B] \rightarrow c_1 \rightarrow r_2[A] \rightarrow w_2[A] \rightarrow c_2 \rightarrow r_3[B] \rightarrow w_3[B] \rightarrow c_3$

$H_s^1 = T1 \mid T2 \mid T3$

$H_s^2 = w_1[A] \rightarrow w_1[B] \rightarrow c_1 \rightarrow r_3[B] \rightarrow w_3[B] \rightarrow c_3 \rightarrow r_2[A] \rightarrow w_2[A] \rightarrow c_2$

$H_s^2 = T1 \mid T3 \mid T2$

$H \equiv H_s^1 \equiv H_s^2$

Serialisierbare Historie (3)

• Anforderungen an im DBMS zugelassene Historien

- Serialisierbarkeit ist eine Minimalanforderung
- TA T_j sollte zu jedem Zeitpunkt vor Commit lokal rücksetzbar sein
 - andere mit Commit abgeschlossene T_i dürfen nicht betroffen sein
 - kritisch sind Schreib-/Leseabhängigkeiten
 $w_j[A] \rightarrow \dots \rightarrow r_i[A]$

- Wie kritisch für das lokale Rücksetzen von T_j sind

$r_i[A] \rightarrow \dots \rightarrow w_j[A]$

oder

$w_j[A] \rightarrow \dots \rightarrow w_i[A]$

oder

$w_i[A] \rightarrow \dots \rightarrow w_j[A]$

• Serialisierbarkeitstheorie:

Gebräuchliche Klassenbeziehungen⁵

- SR: serialisierbare Historien
- RC: rücksetzbare Historien
- ACA: Historien ohne kaskadierendes Rücksetzen
- ST: strikte Historien

Rücksetzbare Historie

• Definition: T_i liest von T_j in H , wenn gilt

1. T_j schreibt mindestens ein Datum A , das T_i nachfolgend liest:

$$w_j[A] <_H r_i[A]$$

2. T_j wird (zumindest) nicht vor dem Lesevorgang von T_i zurückgesetzt:

$$a_j </_H r_i[A]$$

3. Alle anderen zwischenzeitlichen Schreibvorgänge auf A durch andere TA T_k werden vor dem Lesen durch T_i zurückgesetzt.

Falls

$$w_j[A] <_H w_k[A] <_H r_i[A],$$

muß auch

$$a_k <_H r_i[A] \text{ gelten.}$$

$$H = \dots w_j[A] \rightarrow \dots \rightarrow w_k[A] \rightarrow \dots a_k \rightarrow \dots \rightarrow r_i[A]$$

- Definition: Eine Historie H heißt rücksetzbar, falls immer die schreibende TA (T_j) vor der lesenden TA (T_i) ihr Commit ausführt:

$$c_j <_H c_i$$

$$H = \dots w_j[A] \rightarrow r_i[A] \rightarrow w_i[B] \rightarrow c_j \rightarrow \dots \rightarrow a_i[c_i]$$

5. Weikum, G., Vossen, G.: Transactional Information Systems, Morgan Kaufmann, 2001, unterscheidet unter Berücksichtigung von VSR und FSR 10 Klassen von serialisierbaren Historien.

Historie ohne kaskadierendes Rücksetzen

- **Kaskadierendes Rücksetzen**

Schritt	T1	T2	T3	T4	T5
0.	...				
1.	w ₁ [A]				
2.		r ₂ [A]			
3.		w ₂ [B]			
4.			r ₃ [B]		
5.			w ₃ [C]		
6.				r ₄ [C]	
7.				w ₄ [D]	
8.					r ₅ [D]
9.	a ₁ (abort)				

➔ In der Theorie läßt sich ACID garantieren! Aber . . .

- **Definition: Eine Historie vermeidet kaskadierendes Rücksetzen, wenn**

$$c_j <_H r_i[A]$$

gilt, wann immer T_j ein von T_i geändertes Datum liest.

➔ **Änderungen dürfen erst nach Commit freigegeben werden!**

Klassen von Historien

- **Definition: Eine Historie H ist strikt, wenn für je zwei TA T_i und T_j gilt:**

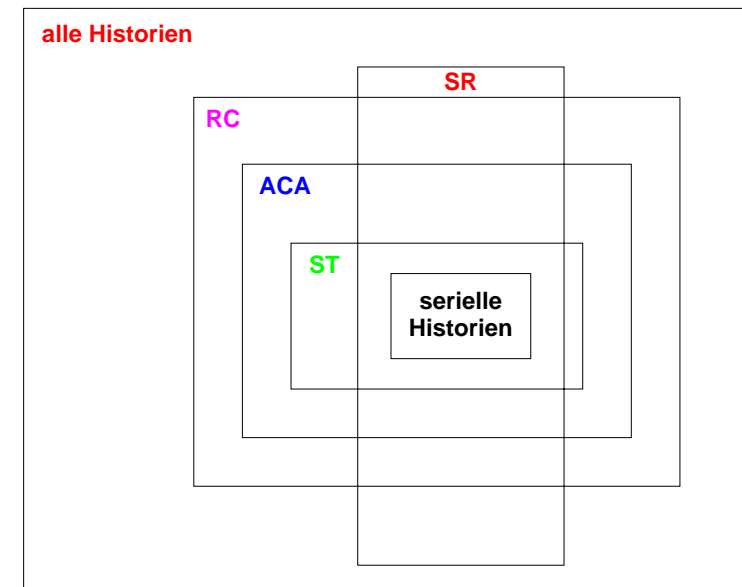
Wenn

$$w_j[A] <_H o_i[A] \quad (\text{mit } o_i = r_i \text{ oder } o_i = w_i),$$

dann muß gelten:

$$c_j <_H o_i[A] \quad \text{oder} \quad a_j <_H o_i[A]$$

- **Beziehungen zwischen den Klassen**



➔ **Schlußfolgerungen?**

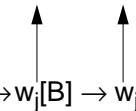
Klassen von Historien (2)

Zusammenfassung

• Beispiele

$r_i[C] \rightarrow w_i[B] \rightarrow r_i[A] \rightarrow c_i$

H: $r_j[B] \rightarrow w_j[B] \rightarrow w_j[A] \rightarrow c_j$



$H_{SR}: r_i[C] \rightarrow r_j[B] \rightarrow w_j[B] \rightarrow w_i[B] \rightarrow w_j[A] \rightarrow r_i[A] \rightarrow c_i \rightarrow c_j$

$H_{RC}: r_i[C] \rightarrow r_j[B] \rightarrow w_j[B] \rightarrow w_i[B] \rightarrow w_j[A] \rightarrow r_i[A] \rightarrow c_j \rightarrow c_i$

$H_{ACA}: r_i[C] \rightarrow r_j[B] \rightarrow w_j[B] \rightarrow w_i[B] \rightarrow w_j[A] \rightarrow c_j \rightarrow r_i[A] \rightarrow c_i$

$H_{ST}: r_i[C] \rightarrow r_j[B] \rightarrow w_j[B] \rightarrow w_j[A] \rightarrow c_j \rightarrow w_i[B] \rightarrow r_i[A] \rightarrow c_i$

$H_S: r_j[B] \rightarrow w_j[B] \rightarrow w_j[A] \rightarrow c_j \rightarrow r_i[C] \rightarrow w_i[B] \rightarrow r_i[A] \rightarrow c_i$

- Beim **ungeschützten und konkurrierenden Zugriff** von **Lesern und Schreibern** auf **gemeinsame Daten** können **Anomalien** auftreten
- **Korrektheitskriterium der Synchronisation: Serialisierbarkeit** (gleicher DB-Zustand, gleiche Ausgabewerte wie bei seriellem Ablaufplan)
- **Theorie der Serialisierbarkeit**
 - einfaches Read/Write-Modell (Syntaktische Behandlung)
 - **Konfliktoperationen:** Kritisch sind Operationen verschiedener Transaktionen auf **denselben DB-Daten**, wenn diese Operationen **nicht reihenfolgeunabhängig** sind!
 - Im Gegensatz zur Final-State-Serialisierbarkeit (Klasse FSR) und View-Serialisierbarkeit (Klasse VSR) ist **Konflikt-Serialisierbarkeit** (Klasse CSR) für praktische Anwendungen die wichtigste. Sie ist effizient überprüfbar und unterscheidet sich bereits dadurch wesentlich von den beiden anderen Serialisierbarkeitsbegriffen.
Es gilt: $CSR \subset VSR \subset FSR$
 - **Serialisierbarkeitstheorem:** Eine Historie H ist genau dann serialisierbar, wenn der zugehörige Konfliktgraph $G(H)$ azyklisch ist
 - weitergehende Ansätze: Einbezug der Anwendungssemantik (Synchronisation von abstrakten Operationen auf Objekten)
 - enorm gründlich erforscht
- **Serialisierbare Abläufe**
 - gewährleisten „automatisch“ Korrektheit des Mehrbenutzerbetriebs
 - Anzahl der möglichen Historien (Schedules) bestimmt erreichbaren Grad an Parallelität