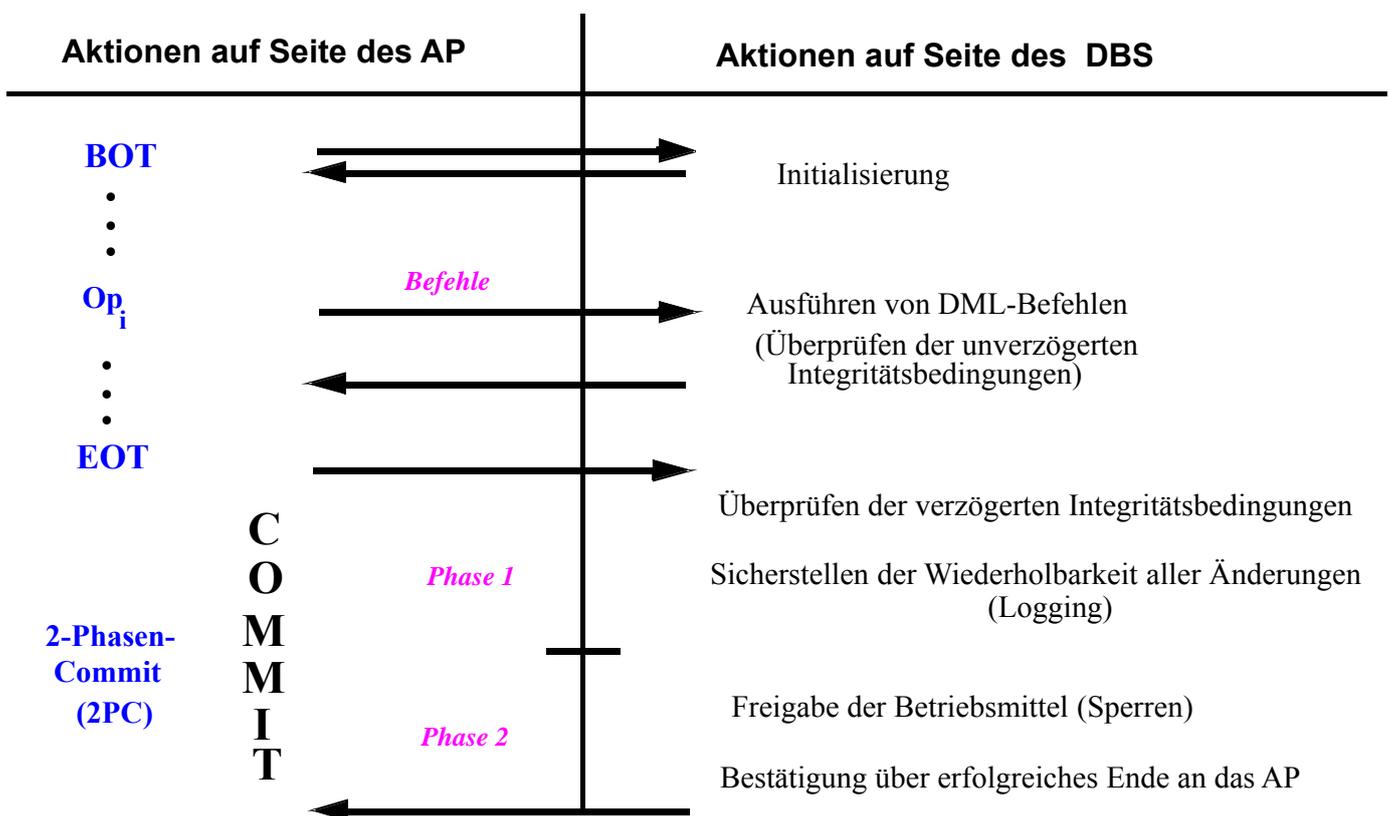


# 6. Verteilte Transaktionsverwaltung

- Einführung
- Synchronisation
  - Verfahrensüberblick, Sperrverfahren
  - Mehrversionen-Synchronisation
  - Deadlock-Behandlung
    - Timeout
    - Deadlock-Vermeidung: Wait/Die-, WoundWait-Verfahren
    - globale Deadlock-Erkennung
- Commit-Protokolle: Anforderungen
- Basis-Protokoll: 2-Phasen-Commit
  - Ablauf
  - Fehlerbehandlung
  - Lineares 2PC
  - Hierarchisches 2PC, XA-Protokoll
- 1-Phasen-Commit, 3-Phasen-Commit, Paxos-Commit



## Transaktionsverarbeitung in zentralisierten DBS



Weiterarbeit im Anwendungsprogramm(AP)



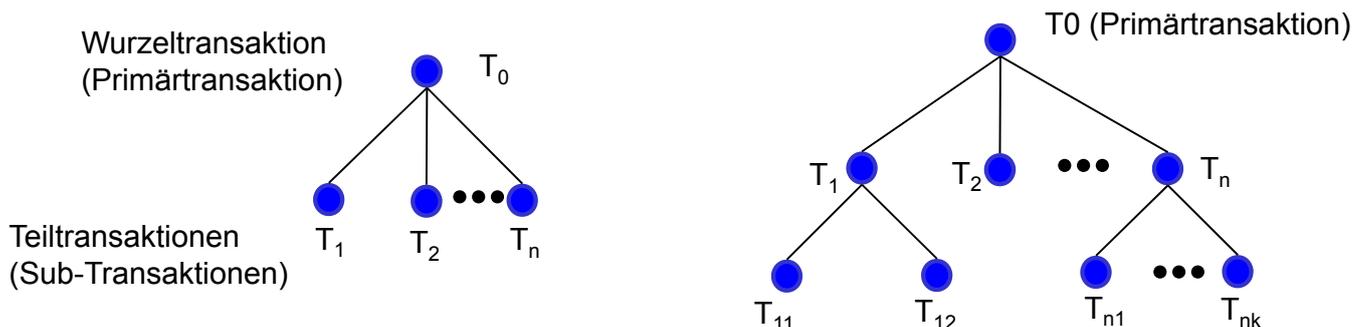
# Transaktionsverwaltung in VDBS

- ACID-Eigenschaften von Transaktionen auch im verteilten Fall zu garantieren: Atomarität, Konsistenz, Isolation, Dauerhaftigkeit
- Logging und Recovery
  - wesentliche Neuerung: globales Commit-Protokoll (Consensus-Verfahren)
  - Robustheit gegenüber partiellen Fehlern, insbesondere Kommunikationsfehlern (Netzwerkpartitionierungen u. ä.)
- Integritätssicherung auf verteilten Daten
  - Überwachung zB im Rahmen eines erweiterten Commit-Protokolls
- Synchronisation
  - Wahrung der globalen Serialisierbarkeit
  - rechnerübergreifende Abhängigkeiten (globale Deadlocks u. ä.)
- Replikation
  - Wahrung von Replikationstransparenz
  - Optimierung von Leistung und Verfügbarkeit



## Transaktionsstruktur

- Transaktionsaufbau: BOT,  $OP_1$ ,  $OP_2$ , ...,  $OP_n$ , COMMIT
- Transaktionsbaum: Kontrollstruktur in einer verteilten Umgebung
  - Transaktionsbaum repräsentiert Aufrufbeziehungen
  - 1-stufige oder geschachtelte Teiltransaktionen
  - isoliertes Rücksetzen von Sub-Transaktionen wird i.a. nicht unterstützt: Abbruch einer Teiltransaktion führt zum Abbruch der Gesamttransaktion



# Synchronisation

- Mehrbenutzerbetrieb führt ohne Synchronisation zu **Anomalien**:
  - Lost Updates
  - Dirty Reads
  - Non-repeatable Reads
  - Phantome
- Korrektheitskriterium der (**globalen**) **Serialisierbarkeit**:  
*gleichzeitige (und verteilte) Ausführung mehrerer Transaktionen ist äquivalent zu wenigstens einer seriellen Ausführung derselben Transaktionen*



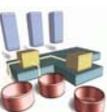
## Synchronisation (2)

- Sperrprotokolle garantieren Serialisierbarkeit
  - vor jedem Objektzugriff muß Sperre mit ausreichendem Modus angefordert werden
  - gesetzte Sperren anderer Transaktionen sind zu beachten
  - am Transaktionsende (2. Commit-Phase) werden alle Sperren freigegeben
- Einfachster Ansatz: **RX - Sperrverfahren**

		aktueller Sperrmodus		
		NL	R	X
angeforderter Sperrmodus	R	+	+	-
	X	+	-	-

NL: no lock,  
R: read lock;  
X: eXclusive lock

+ Sperre wird gewährt  
- Sperrkonflikt



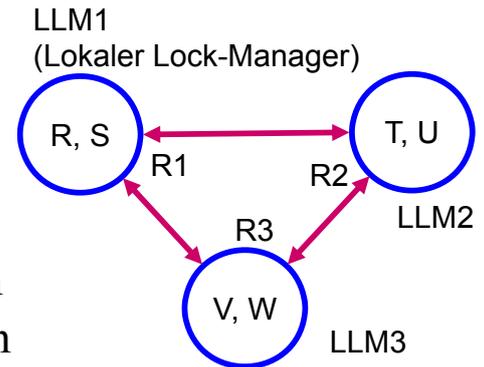
# Synchronisation in VDBS

## ■ Zentrale Verfahren problematisch

- Knotenautonomie
- Kommunikationsaufwand

## ■ Verteilte Sperrverfahren

- jeder Rechner verwaltet Sperren für lokale Daten
- keine eigene Nachrichten für Sperranforderungen
- Sperrfreigabe innerhalb des Commit-Protokolls
- am weitesten verbreiteter Ansatz für VDBS
- globale Deadlocks zu behandeln



# Synchronisation in VDBS (2)

## ■ Zeitmarkenverfahren (timestamp ordering)

- Transaktionen  $T$  erhalten global eindeutige Zeitmarken  $ts(T)$  bei BOT, z.B.  $\langle \text{lokale Uhrzeit, Rechner-ID} \rangle$
- alle Zugriffe müssen in Reihenfolge der BOT-Zeitmarken erfolgen, anderenfalls erfolgt Rücksetzung der zugreifenden Transaktion

## ■ Zeitmarken an den Datenobjekten

- Schreibzeitstempel (*write timestamp*)  $wts$  und Lesezeitstempel (*read timestamp*)  $rts$ : Transaktionszeitstempel des letzten Lesers / Änderers
- Lesezugriff einer Transaktion  $T$  auf Objekt  $x$  scheitert, falls jüngere Transaktion  $O$  geändert hat, d.h.  $wts(x) > ts(T)$
- Schreibzugriff scheitert, falls  $ts(T) < rts(x)$  oder  $ts(T) < wts(x)$

## ■ Eigenschaften

- lokale Zeitstempelverwaltung und Konflikttests
- keine Deadlocks
- jedoch viele Rücksetzungen



# Synchronisation in VDBS (3)

## ■ Optimistische Synchronisation

- keine Sperren, sondern Konflikttest am Transaktionsende (Validierung)
- potentiell viele Rücksetzungen
- zentrale Validierung erfordert wenig Kommunikationsaufwand

## ■ Zentrale Validierung

- Prüfung, ob Objekte im *Read-Set* (RS) einer Transaktion  $T_j$  noch aktuell sind
- erfolgreich validierte Änderungstransaktionen erhalten Commit-Zähler TNC (monoton wachsend), der für Objekte im *Write-Set* (WS) hinterlegt werden

```
VALID := true;
FOR(all r in RS(Tj))DO
  IF rts(r,Tj) < wts(r)
  THEN VALID := false
END;
IF VALID THEN DO
  TNC := TNC+1;
  FOR(all w in WS(Tj))DO
    wts(w):=TNC END;
  Schreibphase für Tj
END;
ELSE ROLLBACK (Tj);
```

## ■ Verteilte Validierung im Rahmen des Commit-Protokolls möglich

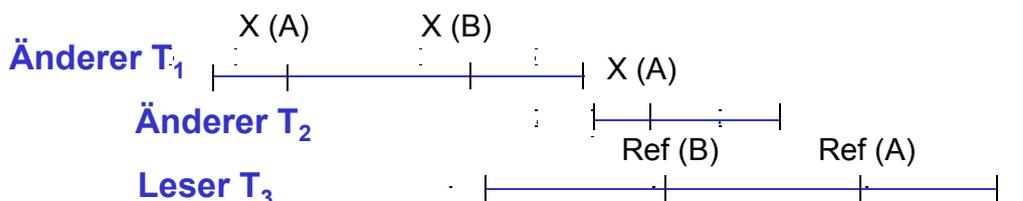
- Nutzung von (synchronisierten) EOT-Zeitstempeln pro Transaktion



# Mehrversionen-Synchronisation

## ■ Prinzip

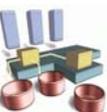
- jede Änderung erzeugt neue Objektversion
- Lesezugriffe sehen den beim BOT gültigen DB-Zustand
- > keine Synchronisation mehr für Lese-Transaktionen (dennoch Serialisierbarkeit)
- erheblich weniger Synchronisationskonflikte
- Realisierung über Commit-Zähler für Änderungen
- anwendbar für Sperrverfahren und optimistische Synchronisation



## ■ Variation *Snapshot Isolation* (i.a. nicht serialisierbar)

- auch Änderer lesen Daten vom BOT-Zustand; quasi-optimistische Synchronisation (keine WS-Überlappung mit anderen Transaktionen)

## ■ Nutzung in rel. DBS (Oracle, PostgreSQL, ...) und NoSQL Stores



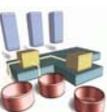
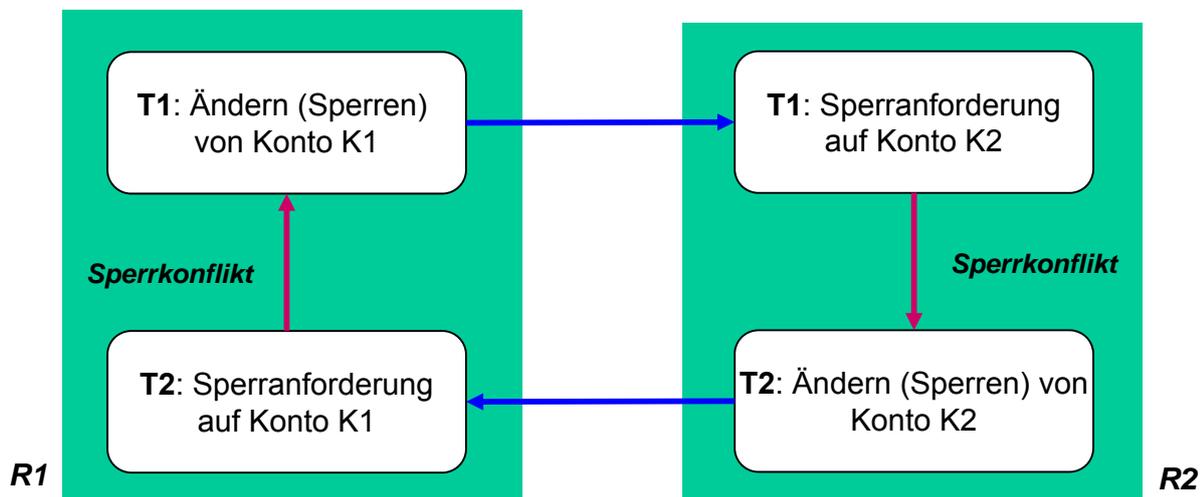
# Mehrversionen-Synchronisation in VDBS

- **Zentrale Kontrolle** (u.a. in HBase)
  - zentrale Vergabe von Commit- und BOT-Zeitstempel
  - zentrale Validierung von Änderungstransaktionen
- **Verteilte Kontrolle** (u.a. in Google Spanner)
  - verteilte Vergabe von BOT- und Commit-Zeitstempeln erfordert eng synchronisierte lokale Uhren (Spanner: max 10 ms über Atomuhren + GPS)
  - Optimistische oder pessimistische Synchronisation von Änderungstransaktionen
  - Spanner: Sperren für Änderungstransaktionen nur während Commit-Protokoll, Leser lesen zu BOT gültige Versionen



## Deadlock-Behandlung

- Sperrverfahren erfordern Deadlock-Behandlung
- **Deadlock**: zyklische Wartebeziehung zwischen zwei oder mehr Transaktionen
  - Deadlock-Behandlung in DBS erfordert Rücksetzung von Transaktionen
- **Beispiel** (Überweisungen zwischen Konten K1 und K2)



# Deadlock-Behandlung: Timeout-Verfahren

- Festsetzen einer maximalen Wartezeit auf eine Sperre (Timeout)
- Nach Überschreiten des Timeout wird wartende Transaktion zurückgesetzt
- Vorteile
  - jeder Deadlock wird irgendwann aufgelöst
  - geringer Implementierungsaufwand
  - keine zusätzliche Nachrichten für Deadlock-Behandlung
  - kann auch bei heterogenen DBS genutzt werden
- Nachteile
  - unnötige Rücksetzungen (Erreichen des Timeout auch ohne Deadlock)
  - Wahl des Timeouts (viele Rücksetzungen vs. später Auflösung von Deadlocks)
- Nutzung in den meisten VDBS bzw. verteilten Transaktionssystemen



## Deadlock-Behandlung: Weitere Lösungsmöglichkeiten

### Deadlock-Vermeidung (Avoidance)

- Zuweisung einer eindeutigen *Transaktionszeitmarke* bei BOT
- Entscheidung bei einem Sperrkonflikt, ob Warten zugelassen wird oder eine Transaktionsrücksetzung erfolgt
- kein Wartezyklus (Deadlock) möglich, falls stets nur ältere Transaktionen auf jüngere warten dürfen (Bsp.: Wait/Die) bzw. nur jüngere auf ältere Transaktion warten (Bsp.: Wound/Wait-Verfahren)
- Behandlung globaler Deadlocks ohne Kommunikation!

### Deadlock-Erkennung (Detection)

- Führen eines globalen Wartegraphen (-> Kommunikationsbedarf)
- Zyklensuche zur Erkennung von Deadlocks
- potentiell geringste Anzahl von Rücksetzungen



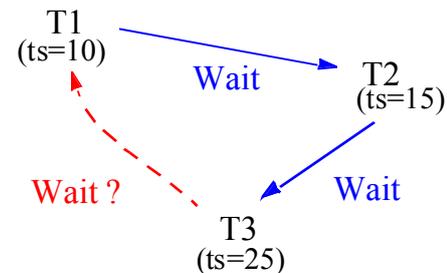
# Deadlock-Vermeidung: Wait/Die

- Zuweisung einer eindeutigen *Transaktionszeitmarke*  $ts(T)$  bei Beginn jeder Transaktion  $T$

- WAIT/DIE-Verfahren

- anfordernde Transaktion  $T_i$  wird zurückgesetzt, falls sie in Sperrkonflikt mit älterer Transaktion gerät
- $T_i$  wartet bei einem Sperrkonflikt, falls sie älter ist als Sperrbesitzer
- kein Zyklus möglich, da nur ältere auf jüngere Transaktionen warten

```
Ti fordert Sperre, Konflikt mit Tj:  
if ts(Ti) < ts(Tj) {Ti älter als Tj}  
then WAIT(Ti)  
else Rollback(Ti) {'Die'}
```



- Bewertung

- Behandlung globaler Deadlocks ohne Kommunikation
- unnötige Rückstzungen auch ohne Deadlock



# Deadlock-Vermeidung: Wound/Wait

- preemptiver Ansatz: Sperrbesitzer wird zurückgesetzt, wenn er bei einem Sperrkonflikt jünger als anfordernde Transaktion ist
- kein Zyklus möglich, da nur jüngere auf ältere Transaktionen warten

```
Ti fordert Sperre, Konflikt mit Tj:  
if ts(Ti) < ts(Tj) {Ti älter als Tj}  
then ABORT(Tj) {'Wound'}  
else Wait(Ti)
```

- Bewertung ähnlich zu Wait/Die

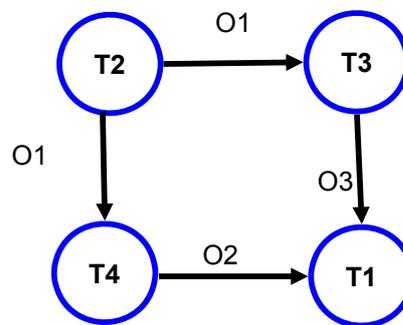
- noch stärkere Bevorzugung älterer Transaktionen positiv zu bewerten

- Verwendung in Google Spanner



# Deadlock-Erkennung

- Explizites Führen eines *Wartegraphen* (wait-for graph)
  - Knoten: laufende Transaktionen
  - gerichtete Kanten: Wartebeziehungen aufgrund von Sperrkonflikten
  - Zyklus kennzeichnet Deadlock
- Zyklensuche zur Erkennung von Verklemmungen
  - bei jedem Sperrkonflikt bzw.
  - verzögert (z. B. über Timeout gesteuert)
- Deadlock-Auflösung durch Zurücksetzen einer oder mehrerer Transaktionen, deren Wegfall Zyklus auflöst
  - z. B. Verursacher des Deadlocks
  - "billigste" Opfer



## Deadlock-Erkennung in Verteilten DBS

- Nachrichtenaustausch zur Erstellung des Wartegraphen
- Zentrale Deadlock-Erkennung
  - ausgezeichnete Knoten verwaltet globalen Wartegraphen
  - hoher Kommunikationsaufwand (Übertragung aller neuen / wegfallenden Wartebeziehungen)
  - Einschränkung der Knotenautonomie
- Verteilte Deadlock-Erkennung
  - verteilte Verwaltung eines globalen Wartegraphen
  - korrektes Verfahren schwierig zu realisieren:
    - Nachrichtenverzögerungen
    - Empfangs- ≠ Sendereihenfolge
    - Rechnerausfälle
  - oftmals
    - doppelte Erkennung von Deadlocks
    - "falsche" Deadlocks

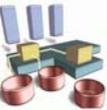


# Verteilte Deadlock-Erkennung in R\*

- "Deadlock Detector" pro Rechner, der periodisch lokalen Wartegraphen auf Zyklen durchsucht
  - spezieller Knoten "EXTERNAL" im Wartegraph zur Darstellung von Wartebeziehungen zu Sub-Transaktionen auf anderen Rechnern
  - Zyklus mit EXT-Knoten kennzeichnet potentiellen globalen Deadlock
- Weitergabe der Zyklusinformation an andere Rechner, um globalen Deadlock ggf. zu erkennen
- Ausgangsbeispiel

R1:

R2:

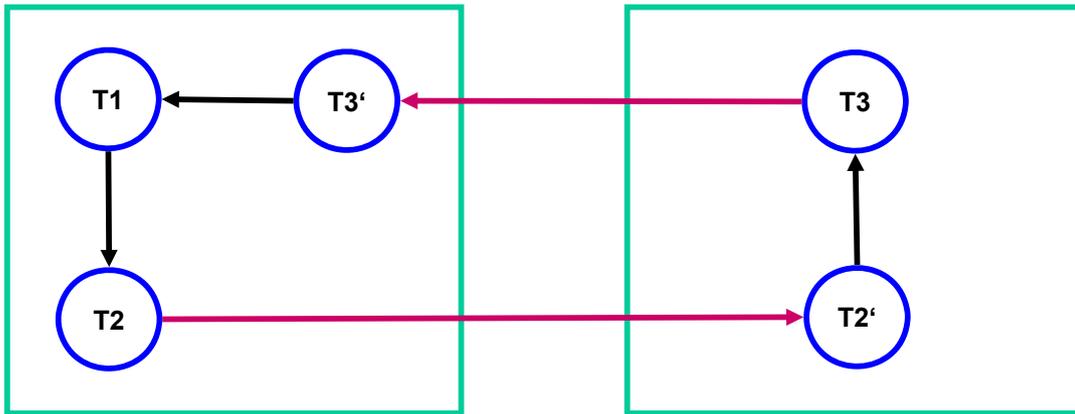


## Deadlock-Erkennung in R\* (2)

- Kooperation mit anderen Rechnern:
  1. Empfange Deadlock-Information anderer Rechner
  2. Erweitere damit lokalen Wartegraphen
  3. löse lokale/vollständige Zyklen durch Bestimmung und Rücksetzung eines "Opfers" auf
  4. für globale Zyklen sende lineare Darstellung:  
$$\text{EXT} \rightarrow T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow \dots \rightarrow T_n \rightarrow \text{EXT}$$
  
an Rechner, auf den  $T_n$  wartet (falls  $T_1 > T_n$ )
- Bewertung
  - **max.  $N(N-1)/2$  Nachrichten** zur Erkennung eines globalen Deadlocks bei  $N$  beteiligten Rechnern
  - Erkennung falscher Deadlocks möglich



# Beispiel



## Commit-Protokolle

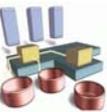
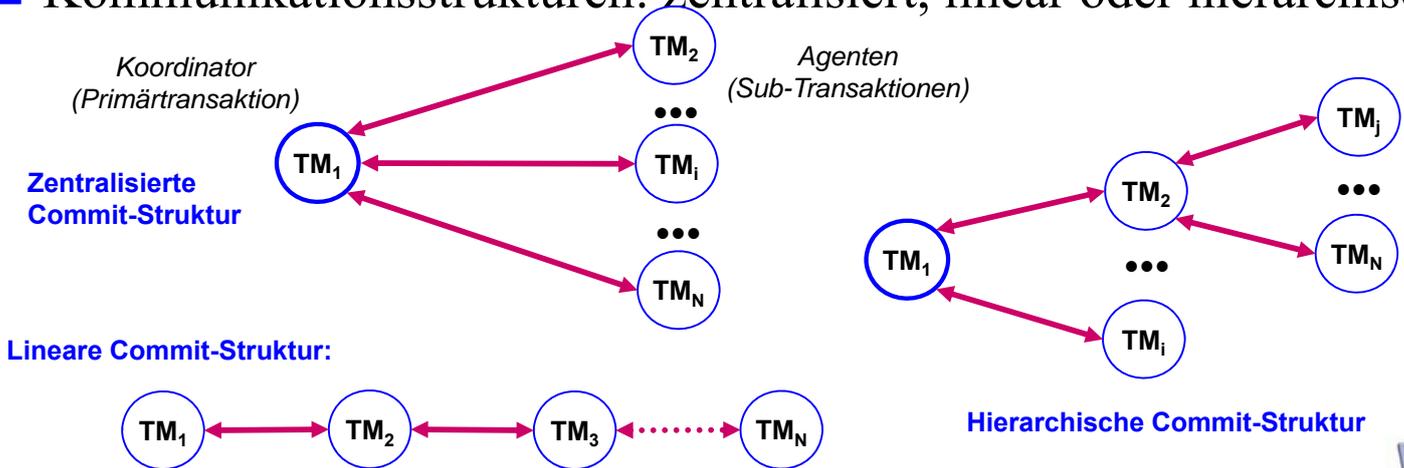
- Sicherstellen der ***Atomizität*** verteilter Transaktionen durch rechnerüber-greifendes Mehrphasen-Commit-Protokoll
- Anforderungen an geeignetes Commit-Protokoll:
  - Korrektheit
  - Geringer Aufwand (#Nachrichten, #Log-Writes)
  - Geringe Antwortzeitverlängerung
  - Robustheit gegenüber Rechnerausfällen und Kommunikationsfehlern
  - Knotenautonomie: jeder an einer verteilten Transaktionsausführung beteiligte Rechner soll möglichst lange das Recht des einseitigen Transaktionsabbruchs (*unilateral abort*) haben

"Nicht-Fehler-Fall" ist zu optimieren

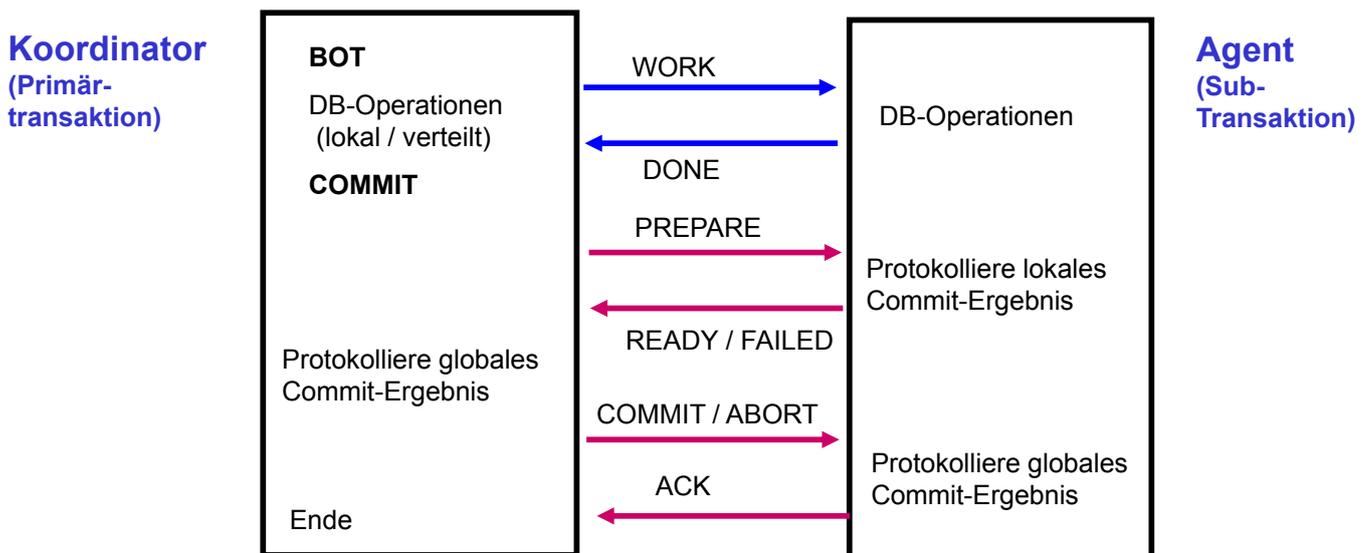


# Commit-Protokolle (2)

- Ausführung des Commit-Protokolls erfolgt durch *Transaktions-Manager (TM)* an jedem Knoten (1 Koordinator + N-1 Agenten)
- Wesentliche Alternativen
  - 2-Phasen-Commit (zentral, linear, hierarchisch)
  - 1-Phasen-Commit
  - 3-Phasen-Commit
- Kommunikationsstrukturen: zentralisiert, linear oder hierarchisch



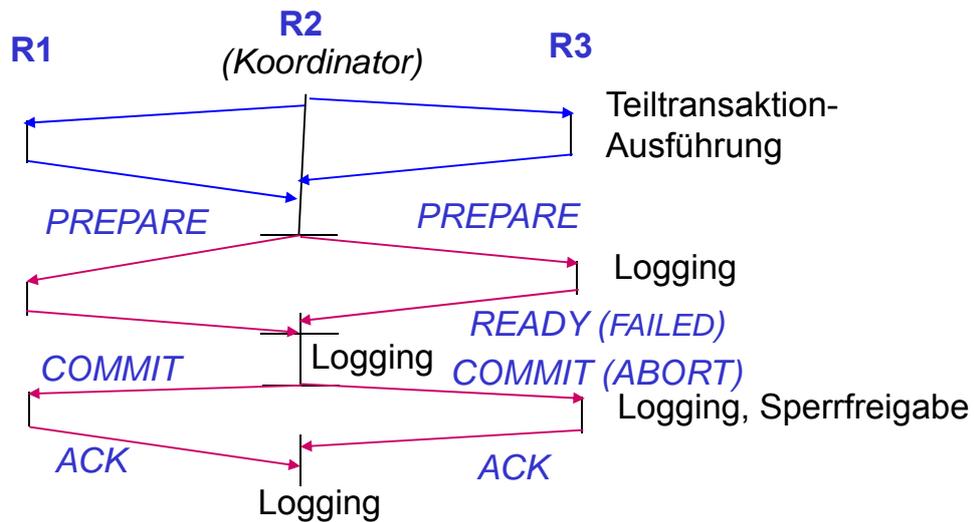
## Zentralisiertes 2-Phasen-Commit (N=2)



- Aufwand
  - Erfolgreicher Ausgang: 4 Nachrichten, 4 Log-Writes
  - ABORT-Nachrichten gehen nur an Teiltransaktionen, die nicht mit FAILED gestimmt haben
- Kernproblem Koordinatorausfall => ggf. lange Blockierung



# Zentralisiertes 2-Phasen-Commit (N=3)



## ■ Basisverfahren:

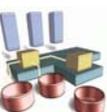
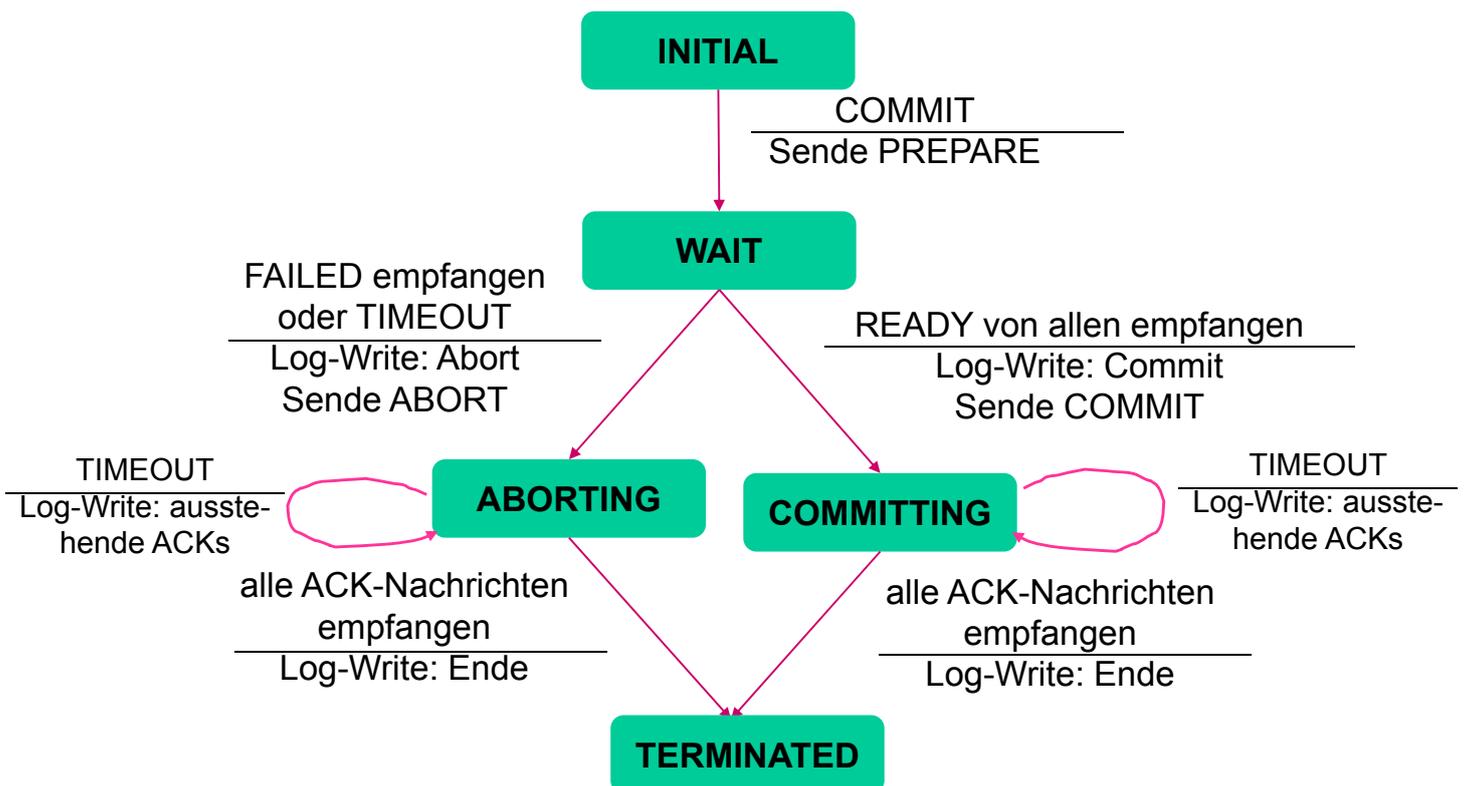
- 4 (N-1) Nachrichten (N = Anzahl der beteiligten Knoten)
- 2 N Log-Writes

## ■ Optimierung für lesende Sub-Transaktionen (Anzahl M)

- 4 (N-1) - 2M Nachrichten für  $M < N$ , 2 (N-1) für  $M=N$
- 2 N - M Log-Writes



# Zustandsgraph Koordinator (2PC)



# 2PC: Fehlerbehandlung

## ■ Timeout-Bedingungen Koordinator:

- WAIT => setze Transaktion zurück; verschicke ABORT-Nachr.
- ABORTING, COMMITTING => vermerke Agenten, für die ACK noch aussteht

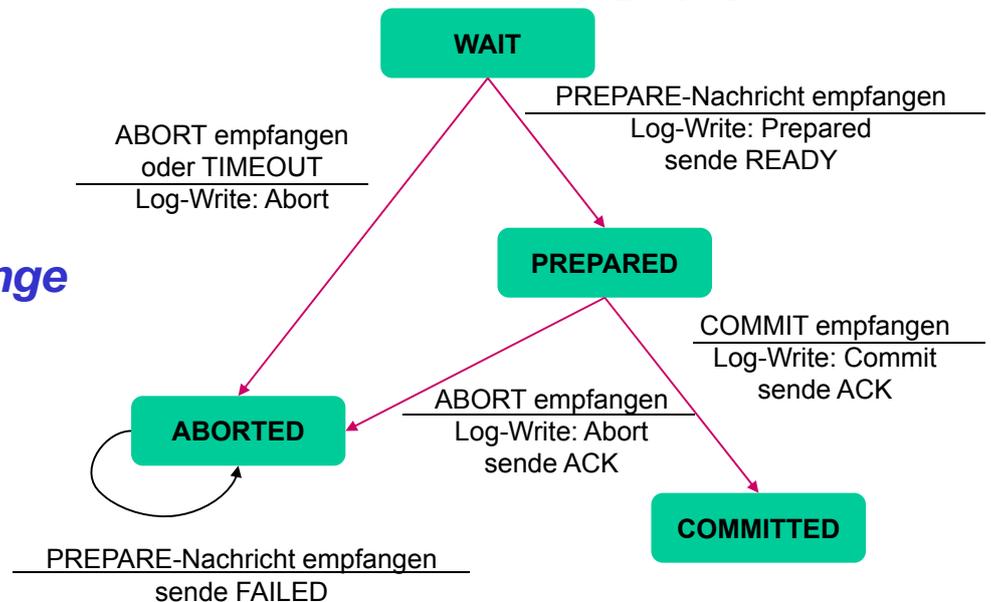
## ■ Ausfall des Koordinatorknotens:

- Log-Zustand TERMINATED:
  - UNDO bzw. REDO-Recovery, je nach Transaktionsausgang
  - keine "offene" Teiltransaktionen möglich
- Log-Zustand ABORTING:
  - UNDO-Recovery
  - ABORT-Nachricht an Rechner, von denen ACK noch aussteht
- Log-Zustand COMMITTING:
  - REDO-Recovery
  - COMMIT-Nachricht an Rechner, von denen ACK noch aussteht
- Sonst: UNDO-Recovery



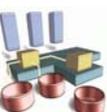
## 2PC: Fehlerbehandlung (2)

### Zustandsübergänge Agent



## ■ Timeout-Bedingungen für Agenten:

- WAIT => setze Teiltransaktion zurück (unilateral ABORT)
- PREPARED => erfrage Transaktionsausgang bei Koordinator (bzw. anderen Rechnern)



# 2PC: Fehlerbehandlung (3)

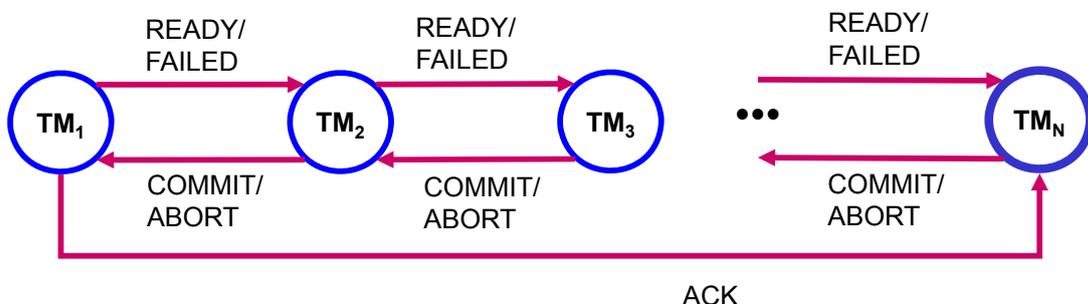
## ■ Rechnerausfall für Agenten:

- Log-Zustand COMMITTED: REDO-Recovery
- Log-Zustand ABORTED bzw. kein 2PC-Log-Satz vorhanden: UNDO-Recovery
- *Log-Zustand PREPARED: Anfrage an Koordinator-Knoten, wie Transaktion beendet wurde (Koordinator hält Information, da noch kein ACK erfolgte)*

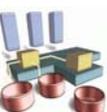
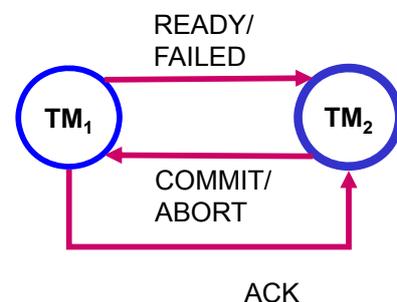


## Lineares 2PC

- sequenzielle Commit-Behandlung, dafür Halbierung der Nachrichtenanzahl:  $(N-1) + N = 2N-1$
- Transfer der Commit-Koordinierung: Koordinatorrolle geht auf letzten Agenten über ("*Last Agent*"-Optimierung)

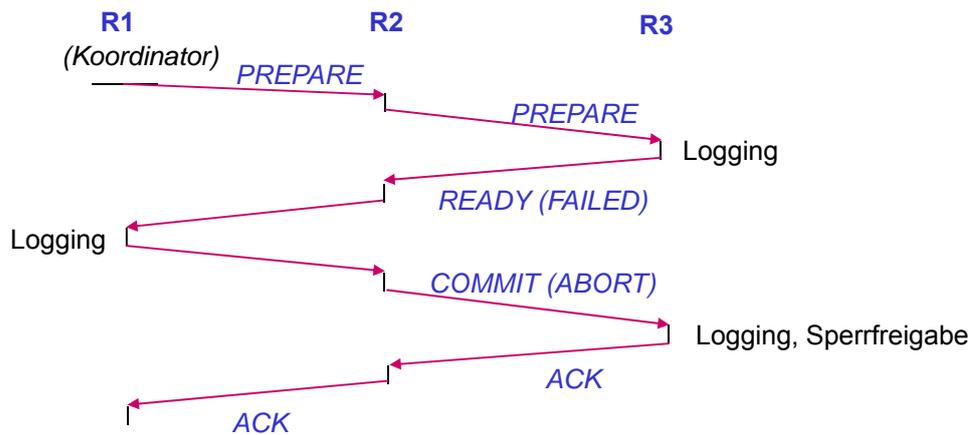


- Besonders vorteilhaft für N=2: **3 Nachrichten**



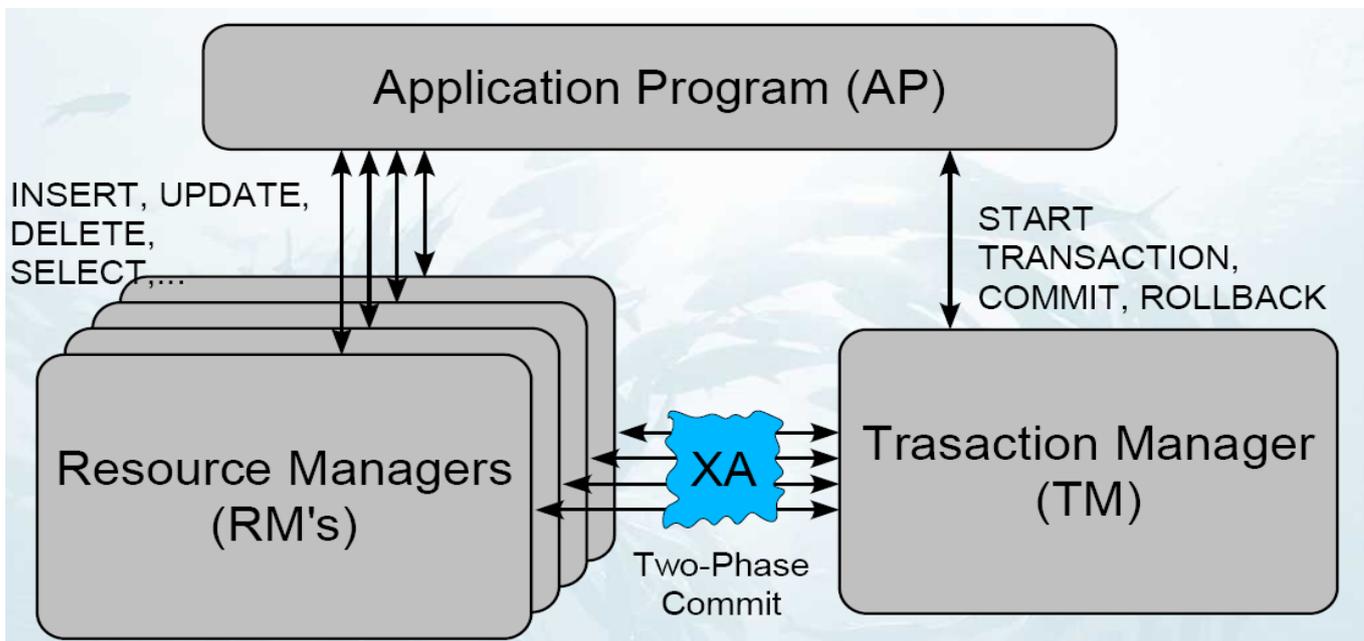
# Hierarchisches 2PC

- allgemeineres Ausführungsmodell mit beliebiger Schachtelungstiefe
  - Nutzung im XA-Standard für verteilte Transaktionen
  - Antwortzeiterhöhung steigt mit Schachtelungstiefe
- bekanntester Vertreter: *Presumed-Abort-Protokoll*
  - Optimierung für ABORT: keine ACK-Nachrichten und kein synchrones Logging
    - wenn keine Angaben im Log gefunden werden, wird per Default ABORT angenommen
  - Optimierung für lesende Teiltransaktionen:
    - kein Logging, Sperrfreigabe in Phase 1
    - Kommunikation für zweite Phase wird umgangen

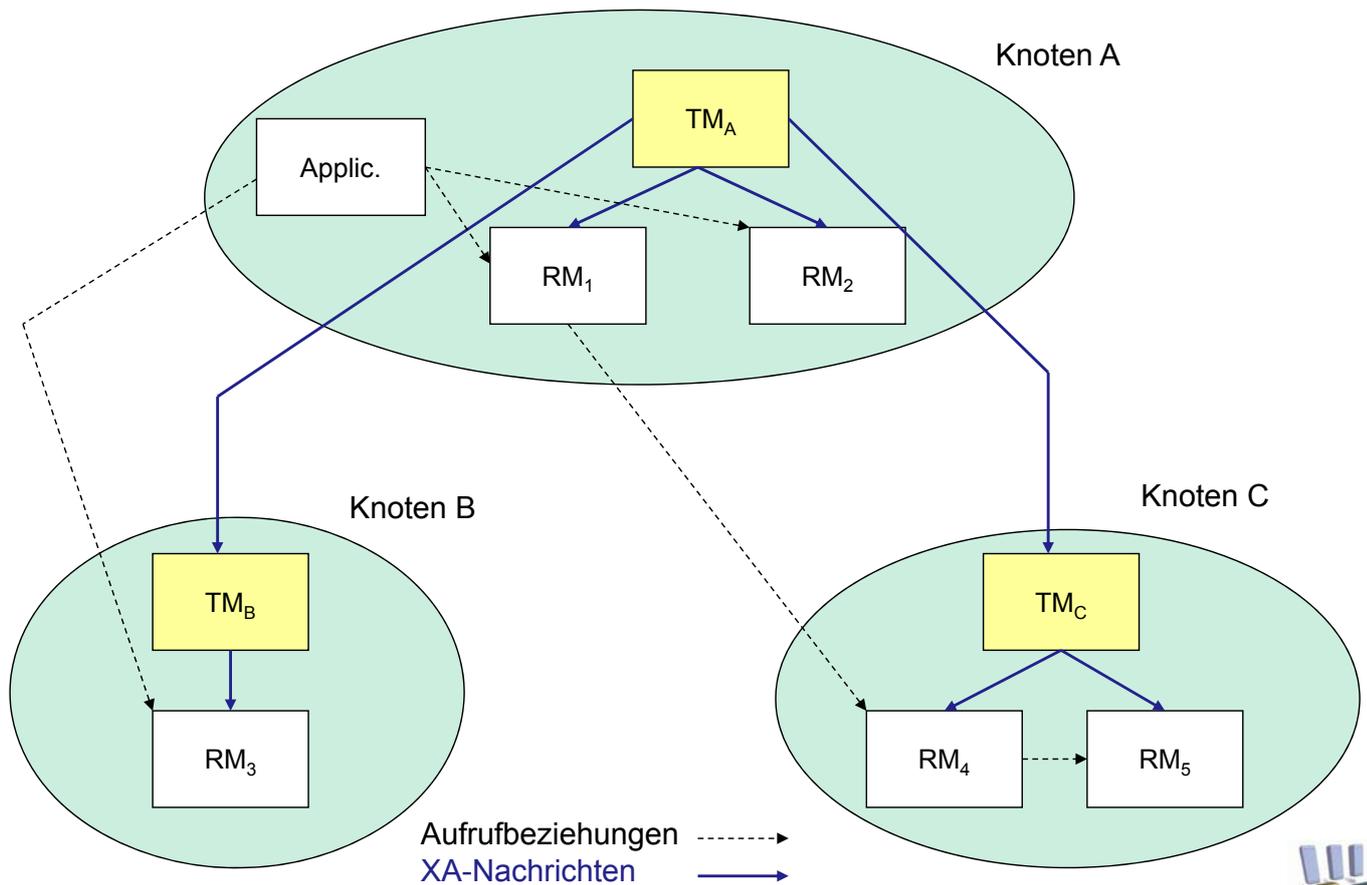


# X/OPEN Modell für verteilte Transaktionen

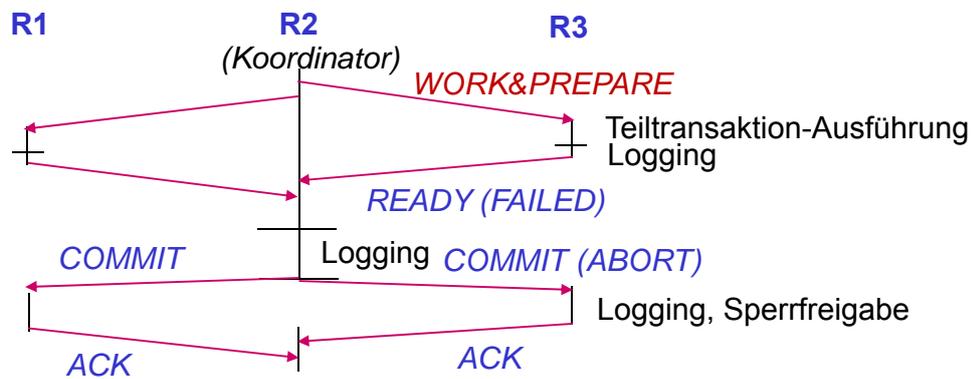
- TM: Teil von Betriebssystem oder Applikations-Server
- DBS wichtiger RM-Typ
  - XA-Unterstützung durch Oracle, DB2, SQLServer, MySQL, ...



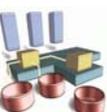
# Verteilte Transaktionsausführung



## 1-Phasen-Commit

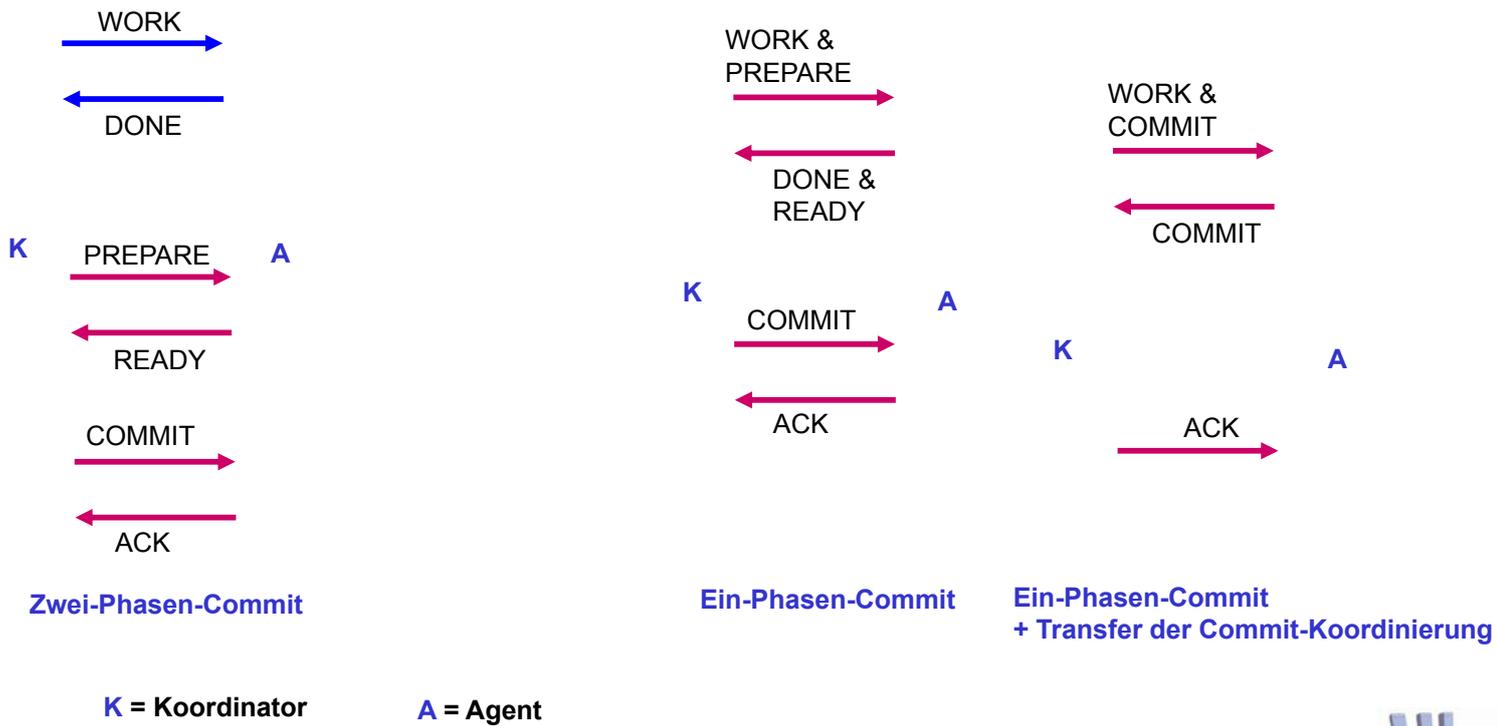


- Teil-Transaktionen sichern ihre Änderungen bereits vor Rückgabe der Ergebnisse an Primärtransaktion
  - nach lokalem Commit am Koordinator steht Erfolg der Transaktion fest
- Einsparung von 2 Nachrichten pro Agent: 2 (N-1) Nachrichten
  - Besonders vorteilhaft für kurze (verteilte) Transaktionen
- Nachteile
  - starke Abhängigkeit vom Koordinator durch frühzeitigen Verzicht auf Unilateral Abort
  - mehrfaches Logging (READY) pro Transaktion und Knoten möglich



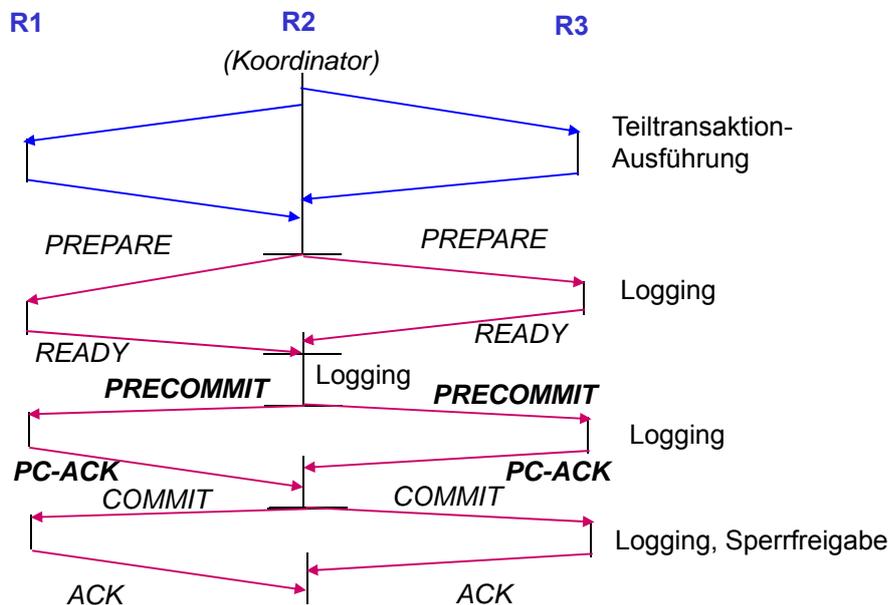
# 1-Phasen-Commit (2)

- für  $N=2$  kann weitere Nachricht durch Transfer der Commit-Koordinierung eingespart werden



# 3-Phasen-Commit

- nicht-blockierendes Verfahren
- Annahmen:
  - keine Netzwerkpartitionierung
  - höchstens  $F < N$  Rechner fallen gleichzeitig aus



## 3-Phasen-Commit (2)

- ABORT-Behandlung wie im 2PC
- neue Zwischenphase (Zustand PRECOMMIT) falls alle Agenten Phase 1 mit READY abschließen:
  - Koordinator teilt PRECOMMIT allen Teiltransaktionen mit
  - nach Eingang von F Quittungen (PC-ACK) erfolgt COMMIT-Entscheidung
  - erst jetzt ist Überleben der Transaktion gewährleistet
- **Koordinatorausfall:** Wahl eines neuen Koordinators
  - Erfragen des Transaktionszustandes noch nicht abschließend bearbeiteter Transaktionen bei überlebenden Rechnern:
  - Commit / Abort (bzw. keine Information): Mitteilung des Transaktionsausgangs
  - Precommit bei wenigstens einem überlebenden Rechner: Commit-Protokoll wird von neuem Koordinator mit Verschicken von Precommit-Nachrichten fortgeführt
- löst Blockierungsproblem im Prepared-Zustand
  - lag negative Koordinator-Entscheidung vor: kein Precommit möglich
  - positive Koordinator-Entscheidung: wenigstens 1 Knoten muss Precommit-Zustand haben
  - Precommit-Zustand beim Koordinator: positive oder negative Entscheidung möglich



## Paxos: verteiltes Consensus-Protokoll

- mehrere Knoten müssen sich auf einen Wert einigen
  - Szenarien: Commit-Entscheidung, Datenreplikation (welche Kopie ist gültig); Neuwahl eines Primary-Knotens, ...
- Vorteile
  - fehlertolerant, d.h. geringer Einfluss von Knotenausfällen (im Gegensatz zu 2PC)
  - garantierte Korrektheit und Terminierung (im Gegensatz zu 3PC)
- Beteiligte
  - N beteiligte Knoten, z.B. Resource Manager (RM)
  - ein Client initiiert Entscheidungsprozess mit einem bestimmten Wert
  - Leader / Proposer (kann nach Ausfall gewechselt werden)
  - Abstimmung unter  $2F+1$  *Acceptor*-Knoten
- bis zu F Acceptor-Ausfälle verkraftbar
  - Mehrheitsentscheid noch möglich
- Nutzung u.a. in Google Chubby (Lock-Service), Spanner (Replikation)



# Paxos – Commit\*

- Paxos-Entscheidung über Prepared-Ergebnisse der einzelnen Knoten / Resource-Manager
- Leader veranlasst auf Client-Anforderung N Prepared-Abstimmungsprozesse mit den selben  $2F+1$  Acceptor-Knoten
- Commit-Entscheidung, wenn  $F+1$  Acceptors Prepared-Ergebnis für alle RM bestätigen

## Nachrichtenaufwand

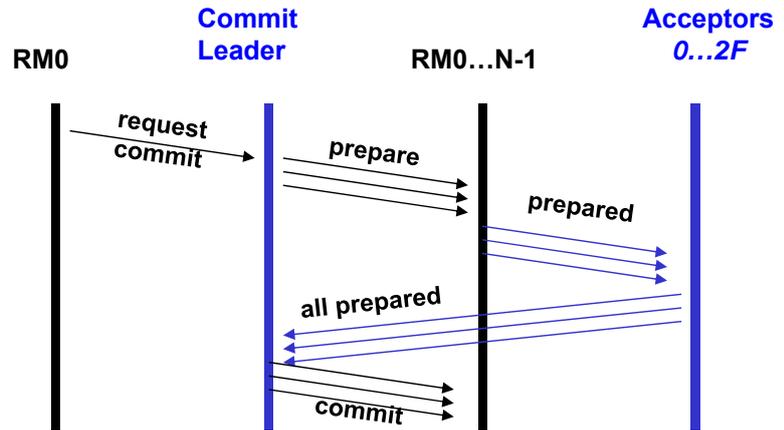
$$N + N(2F+1) + (2F+1) + N = 3N + 2F(N+1) + 1$$

falls Leader=RM:  $3N + 2F(N+1) - 2$

für  $F+1$  statt  $2F+1$ :  $3N + F(N+1) - 2$

-  $F=0$ : analog 2PC (ohne ACK)

-  $F=1$ :  $4N-1$  Nachrichten



\* J. Gray, L. Lamport: Consensus on transaction commit. ACM Trans. Database Syst. 31(1): 133-160 (2006)



## Nachrichtenbedarf verteilter Commit-Protokolle

N: Anzahl beteiligter Knoten

F: #erlaubter Koordinator/Acceptor-Ausfälle (Paxos)

	Allgemein	Beispiel 1 (N=2, F=1)	Beispiel 2 (N=10, F=1)
1-Phasen-Commit	$2*(N-1)$	2	18
Lineares 2PC	$2*N-1$	3	19
zentralisiertes/hierarchisches 2PC	$4*(N-1)$	4	36
3-Phasen-Commit	$6*(N-1)$	6	54
Paxos-Commit	$3N+2F(N+1)-2$	10	50
	$3N+F(N+1)-2$	7	39



# Zusammenfassung

- ACID-Eigenschaften für verteilte Transaktionen
- Synchronisation
  - Sicherstellung der globalen Serialisierbarkeit
  - verteilte Sperrverfahren verursachen geringen Kommunikationsaufwand
  - Trend zu Mehrversionen-Synchronisation / Snapshot Isolation
- Globale Deadlock-Behandlung
  - einfachste Lösung: Timeout
  - Deadlock-Vermeidung (z.B. Wound/Wait) vermeidet Kommunikation, führt jedoch zu unnötigen Rücksetzungen
  - verteilte Deadlock-Erkennung aufwändig: reduziert aber Rücksetzungen
- Verteilte Commit-Protokolle
  - Sicherstellung der Atomarität und Dauerhaftigkeit bei verteilten Änderungen
  - Standardverfahren: hierarchisches 2PC
  - Varianten mit verbesserter Leistungsfähigkeit oder Verfügbarkeit (1PC, 3PC, Paxos)
  - relativ hoher Aufwand

