

Rechnerarchitektur SS 2012

— Cachekohärenz —

Gernot A. Fink

TU Dortmund, Fakultät für Informatik XII

- Literatur:**
- ▶ Hennessy/Patterson: Computer Architecture, 3. Auflage, 2003, Abschnitte 6.2, S. 549ff und 6.5, S. 576ff.
 - ▶ Huang: Advanced Computer Architecture, 1993, Abschnitte 5.4, S. 248ff und 9.1.5, S. 487ff.

Speicher in MP-Systemen

Zentrales Problem vom Mehrprozessorsystemen: Zugriff auf gemeinsamen Speicher

- ▶ Heutige Prozessoren erzeugen hohe Anforderung an Speicherbandbreite
 - ⇒ Kann durch Verwendung von Caches (ggf. mit mehreren Ebenen) *deutlich* reduziert werden!
- ✓ Durch Verwendung von Caches können auch *mehrere* Prozessoren (Haupt-)Speicher gemeinsam verwenden
- ▶ Seit 1980er viele kleine Mehrprozessorsysteme (<16) auf der Basis von Mikroprozessoren entworfen
 - ▶ Gemeinsamer Speicher
 - ▶ Bus verbindet Speicher und alle Prozessoren (bzw. Caches)
 - ⇒ kosteneffektive Architektur
- ▶ Hardware-Realisierung
 - ▶ Früher: 1 Prozessor + Cache auf einem "Board"
 - ▶ Später: mehrere Prozessoren (≥ 4) pro Board
 - ▶ Heute auch: mehrere Prozessoren auf einem Chip ($\hat{=}$ Multi-Cores)

Wieso?

Speicher in MP-Systemen II

- ▶ Kleine MPs mit gemeinsamem Speicher (*shared*) unterstützen Caching für:
 - ▶ Private Daten (nur von einem Prozessor verwendet)
 - ▶ *shared data*, d.h. von mehreren Prozessoren gemeinsam verwendeten Daten ⇒ dienen zur Kommunikation
- ▶ Caching von privaten Daten
 - ▶ Inhalte in Cache transferiert
 - ✓ reduziert Zugriffszeit und Bandbreitenanforderung
 - ✓ Programmverhalten unverändert, da keine anderen Prozessoren Daten benützen
- ▶ Caching von “geshareten” Daten
 - ▶ Daten können in *mehreren* Caches repliziert werden/sein
 - ✓ reduziert neben Latenz & Bandbreitenanforderung Busbelastung bei gleichzeitigem Zugriff mehrerer Prozessoren
 - ⊘ Replikation erzeugt Problem der **Cache-Kohärenz!**

Konsistenz & Kohärenz von Speicher

Grundproblem: Mehrere Prozessoren können *unterschiedliche* Sicht auf Speicher/Cache haben!

Beispiel:

Zeit	Ereignis	Cache CPU A	Cache CPU B	Speicher für Zelle X
0				1
1	CPU A liest X	1		1
2	CPU B liest X	1	1	1
3	CPU A schreibt Wert 0 in X	0	1	0

Hier: Betrachten *write-through* Cache

Wie mit *write-back*?

Konsistenz & Kohärenz von Speicher II

Informeller Formulierungsversuch:

Speichersystem ist kohärent, wenn Leseoperationen einer Zelle den letzten zuvor in diese Zelle geschriebenen Wert liefern.

Problem: Definition ist zu vereinfachend und vage: *Wie Reihenfolge in MPs definieren?*

 Betrachtet werden müssen zwei Aspekte:

1. Welcher Wert wird von Leseoperation geliefert?

⇒ Kohärenz

2. Wann wird ein geschriebener Wert von einer Leseoperation geliefert?

⇒ Konsistenz

⇒ Betrachten zunächst (einfachere) Kohärenz

Cache-Kohärenz

Speichersystem ist kohärent, wenn:

1. Lesen einer Zelle X durch Prozessor P nach Schreiben dieser Zelle durch P ...
 - ▶ immer geschriebenen Wert liefert, ...
 - ▶ sofern zwischen beiden Operationen kein Schreiben eines anderen Prozessors erfolgt ist.
- ⇒ Eigenschaft erhält Programmreihenfolge (bezogen auf einen Prozessor!), sollte insbes. für Uni-Prozessoren erfüllt sein.

Cache-Kohärenz II

(Speichersystem ist kohärent, wenn:)

2. Lesen einer Zelle X durch Prozessor P nach Schreiben von Zelle X durch anderen Prozessor P' ...
 - ▶ immer geschriebenen Wert liefert, ...
 - ▶ sofern zwischen beiden Operationen *hinreichend viel Zeit* vergeht und ...
 - ▶ kein Schreiben eines anderen Prozessors erfolgt ist.
- ⇒ Zentraler Aspekt der Kohärenz

Beachte: Falls beliebig lange Lesen alter Daten möglich
⇒ Speichersystem ist klar inkohärent!

Cache-Kohärenz III

(Speichersystem ist kohärent, wenn:)

3. Schreiboperationen in dieselbe Zelle serialisiert werden, d.h. Schreibvorgänge verschiedener Prozessoren in dieselbe Zelle werden in derselben Reihenfolge von allen anderen Prozessoren gesehen.

Beachte: Beachte: Reihenfolge selbst ist *unspezifiziert*, muss nur für alle "Beobachter" gleich sein!

Beispiel: Zuerst 1, dann 2 in Zelle X geschrieben:

Kein Prozessor kann zuerst 2 und dann 1 lesen!

⇒ Alle Prozessoren, die zuletzt geschriebenen Wert einer Zelle anfordern, erhalten *denselben* Wert!

Cache-Kohärenz IV

- ▶ Betrachtete Eigenschaften (1.-3.) sind hinreichend für Sicherstellung von Kohärenz
- ▶ Außerdem wichtig: Wann wird geschriebener Wert von anderen Prozessoren gesehen?
(... sofern ... *hinreichend viel Zeit* vergeht ...)

Beachte: Leseoperation kann von anderem Prozessor geschriebenen Wert nie instantan sehen!

- ▶ Daten haben Prozessor ggf. noch nicht verlassen
 - ▶ Durchlaufen der Speicherhierarchie erfordert Zeit
- ⇒ **Konsistenz** definiert, *wann* geschriebener Wert von lesenden Prozessoren gesehen werden muss!
(behandelt aber nicht absolute Zeiten, sondern *Ordnung* von Schreib- und Lesevorgängen)

Cache-Kohärenz V

- ▶ Kohärenz und Konsistenz sind *komplementär*:
 - Kohärenz** definiert Verhalten von Schreib-Leseoperationen auf *derselben* Speicherzelle
 - Konsistenz** definiert Verhalten von Schreib-Lese-Operationen bezogen auf Zugriffe von *anderen* Speicherzellen
- ▶ Nehmen zunächst an:
 - ▶ Schreiboperation nicht beendet bevor nicht alle Prozessoren Effekt gesehen haben
 - ▶ Prozessoren ändern Reihenfolge von Schreiboperationen bzgl. beliebiger anderer Speicherzugriffe nicht
(Lesevorgänge können [untereinander] umgeordnet werden, Schreibvorgänge erfolgen in Programm-Reihenfolge)

Mechanismen für Cache-Kohärenz

- ▶ Speichersystem unterstützt sowohl ...
 - Migration von Daten (Transfer in lokalen Cache) als auch ...
 - Replikation (d.h. Kopieren der Daten in mehrere Caches bei gleichzeitigem Zugriff durch mehrere Prozessoren).
⇒ Wichtig für Performanz des Zugriffs auf shared data
- ▶ Prinzipielle Lösungsmöglichkeiten: Hardware / Software
Wegen notwendiger Effizienz: Hardware-Realisierung
- ⇒ Cache-Kohärenz Protokolle (zw. Cache und Bus/Prozessor)
 - ▶ Grundprinzip: Verfolgung des Zustands eines gemeinsam genutzten Speicherblocks
 - ▶ Zwei Klassen von Protokollen:
Verzeichnisbasiert und Snooping (dt. "Schnüffeln")

Mechanismen für Cache-Kohärenz: Protokollklassen

Verzeichnisbasiert:

- ▶ Verwendungstatus eines Speicherblocks wird über zentrale Instanz verwaltet
- ⇒ "Verzeichnis" (*directory*)
- Beachte: Daten aber ggf. in mehreren Caches vorhanden!
(Auch: Status dort partiell repräsentiert)

Snooping:

- ▶ Jeder Cache, der Kopie eines Speicherblocks enthält, besitzt auch Kopie des Verwendungstatus dieses Blocks
- ⇒ kein zentral verwalteter Zustand
- ▶ Alle Caches kommunizieren über Bussystem (speziell: SMPs)
- ⇒ beobachten Anfragen auf dem Bus ("schnüffeln")
- ▶ Reagieren mit Statusänderung, falls Bus-Anfragen gecacheten Speicherblock betreffen
- ⇒ dezentral repräsentierter Zustand durch Kooperation der

Caches

Cache-Kohärenz: Snooping-Protokolle

Zwei prinzipielle Vorgehensweisen:

1. Aktualisierung aller Kopien eines Blocks beim Schreiben von Daten in den Block
 - ⇒ *write update*
 - ⚡ Problem: Hohe Anforderungen an Speicherbandbreite
 - ▶ Reduzierbar, falls sharing von Einträgen verfolgt und nur dann Kopien aktualisiert
2. Exklusiven Zugriff auf Block sicherstellen, *bevor* Prozessor diesen beschreibt
 - ⇒ *write invalidate*
 - ▶ Andere Kopien werden durch Schreiben ungültig gemacht
 - ▶ Hauptsächlicher Protokolltyp (auch bei verzeichnisbasierten Methoden)

Cache-Kohärenz: Snooping-Protokolle II

Beispiel für write update Prinzip:

Prozessor- aktivität	Bus- aktivität	Cache CPU A	Cache CPU B	Speicher für Zelle X
				0
A liest X	Cache miss für X	0		0
B liest X	Cache miss für X	0	0	0
A schreibt 1	Broadcast von X	1	1	1
B liest X		1	1	1

Beachte:

- ▶ write update nur in Kombination mit write through Cache sinnvoll
- ▶ Aktualisierung (broadcast) betrifft Speicher und alle gecacheten Kopien des jeweiligen Blocks

Cache-Kohärenz: Snooping-Protokolle III

Beispiel für write invalidate Prinzip:

Prozessor- aktivität	Bus- aktivität	Cache CPU A	Cache CPU B	Speicher für Zelle X
				0
A liest X	Cache miss für X	0	0	
B liest X	Cache miss für X	0	0	0
A schreibt 1	“Invalidierung” von X	1	–	0(!)
B liest X	Cache miss für X	1	1	1(!)

Beachte: Bei zweitem Cache miss von B für X antwortet A mit korrektem Wert; Antwort des Speichers wird verworfen!

Cache-Kohärenz: Snooping-Protokolle IV

Leistungsunterschiede von write update vs write invalidate:

- ▶ Mehrere Schreibzugriffe auf gleichen Block (ohne dazwischenliegendes Lesen)
 - ▶ erfordern mehrere Broadcasts,
 - ▶ aber nur eine initiale "Invalidierung"
- ▶ Falls Cache-Blöcke mehrere Speicherworte enthalten:
 - ▶ Jeder Schreibzugriff erfordert Broadcast
 - ▶ Nur erster Schreibzugriff erzeugt "Invalidierung"

⇒ write update arbeitet wort-weise, write invalidate auf Cache-Blöcken
- ▶ Verzögerung zwischen Schreiben und "entferntem" Lesen:
 - ▶ i.d.R. kleiner bei write update, da Daten sofort im Cache des lesenden Prozessors aktualisiert (sofern dort gecached)
 - ▶ Bei write invalidate wird "lesender" Cache zuerst ungültig, dann Speicherzugriff verzögert, bis Daten aus Hauptspeicher nachgeladen

⇒ Wegen Bandbreitenanforderung: write invalidate dominiert!

Cache-Kohärenz: Snooping-Beispiel Protokoll

- ▶ Drei Zustände pro Cache-Block:
 - invalid:** Nicht belegt oder Inhalt wurde verworfen
 - shared:** Cache-Block wird in mehreren Caches (lesend) gehalten
 - exclusive:** Cache kann exklusiv (schreibend) auf Block zugreifen
- ▶ Kommunikation über Zustandsänderung durch Bus
⇒ Bus-Aktivität + CPU-Aktionen verändern Zustand!

Schreiben eines Blocks

⇒ andere existierende Kopien für ungültig erklären

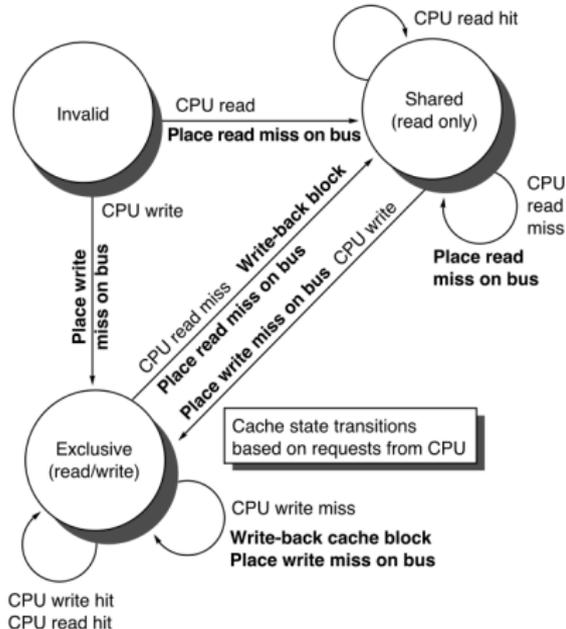
Lesen eines Blocks

⇒ Wird shared im akt. Cache, falls nicht modifiziert

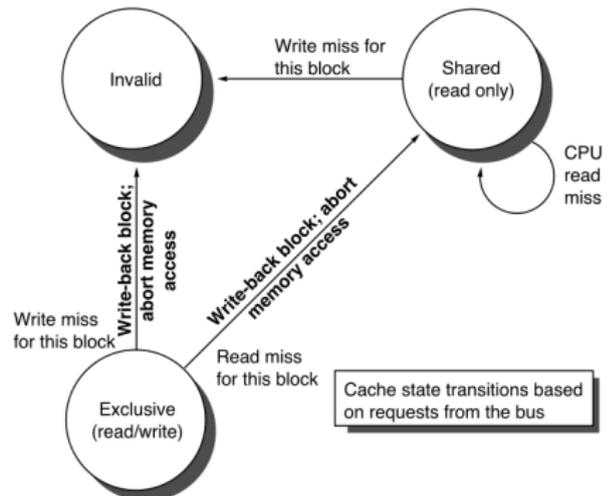
⇒ Muss aus Speicher (write through) oder anderem Cache, der aktuelle Kopie (exclusive) hat, geholt werden (write back)

Cache-Kohärenz: Snooping-Beispiel Protokoll II

CPU-Aktionen



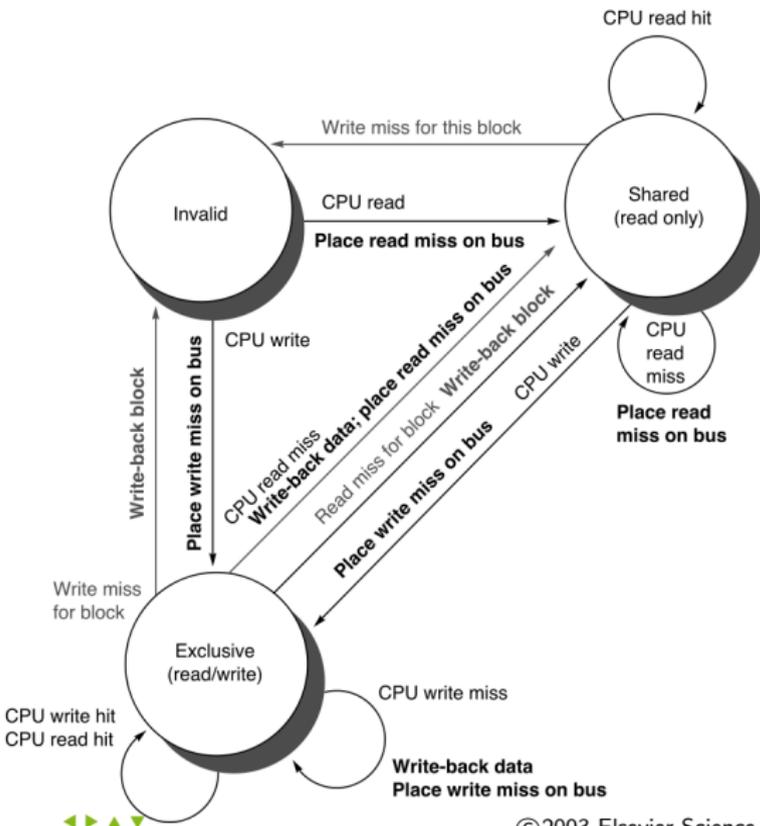
Aktionen auf dem Bus



© 2003 Elsevier Science

Cache-Kohärenz: Snooping-Beispiel Protokoll III

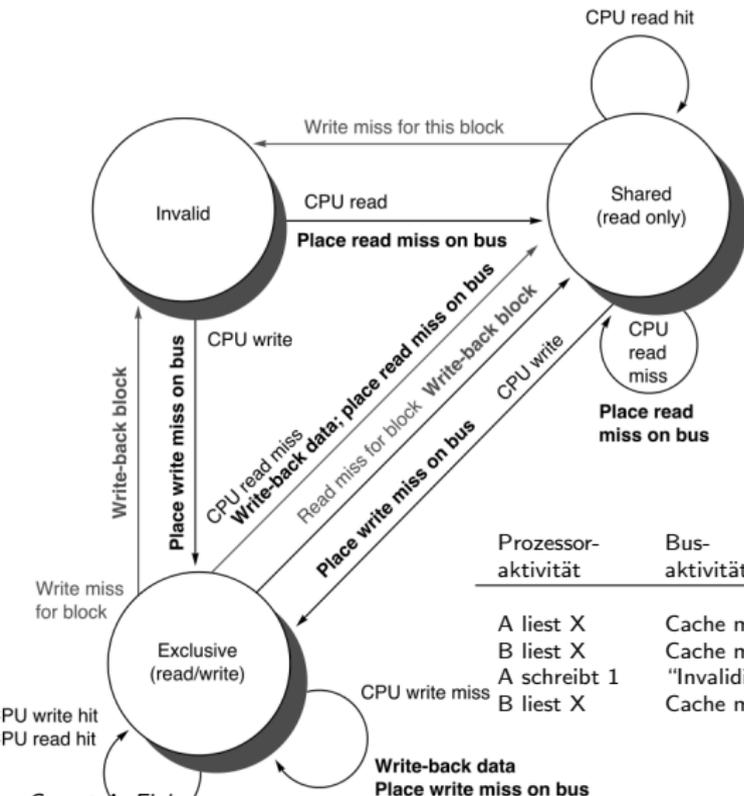
Zusammengefasstes Zustands-Diagramm des Cache-Blocks



Cache-Kohärenz: Snooping-Beispiel Protokoll IV

Verhalten des Protokolls am Beispiel

Beachte: Eigentlich zwei Zustandsdiagramme notwendig: Cache-Block für X in CPU A / B!



Prozessoraktivität	Busaktivität	Cache CPU A	Cache CPU B	Speicher für Zelle X
				0
A liest X	Cache miss für X	0	0	
B liest X	Cache miss für X	0	0	0
A schreibt 1	"Invalidierung" von X	1	-	0(!)
B liest X	Cache miss für X	1	1	1(!)

Snooping-Protokolle: Erweiterungen

- ▶ Beispielprotokoll auch als MSI-Protokoll bezeichnet (wg. dreier verwendeter Zustände *modified* [hier: *exclusive*], *shared*, *invalid*)
- ▶ Erweiterung zu MESI-Protokoll:
Einführung eines *exclusive* Zustands, d.h. betreffender Inhalt ist nur in genau einem Cache \Rightarrow Effizienzgewinn bei Lesen gefolgt von Schreiben (ohne "entfernte" Aktionen)
- ▶ Ggf. Einführung weiterer spezialisierter Zustände z.B. *owned*, d.h. Cacheinhalt ist einzige aktuelle Kopie der betreffenden Daten (Speicherinhalt ist ungültig)
- ▶ Auch: Erweiterung auf nicht-bus-basierte Systeme möglich!

Wo ist das Problem?

Distributed Shared-Memory Architekturen

Problem: Anforderungen bzgl. Bandbreite an gemeinsamen Speicher steigt mit Anzahl der Prozessoren

⇒ MP-Systeme mit vielen (>100) Prozessoren nicht in UMA-Architektur realisierbar!

Lösung: MP-Systeme mit verteiltem Speicher, logisch gemeinsam nutzbar: *distributed shared memory*

Cache Kohärenz in best. Architekturen explizit ausgeschlossen (z.B. Cray T3E, nur Caching von privaten Daten)

Wie Cache-Kohärenz in *distributed shared memory* sicherstellen?

Beachte: Caches *nicht* über gemeinsamen Bus verbunden wg. Bandbreite (Verbindung durch z.B. Gitter, Hyperkubus, ...)

Cache-Kohärenz: Verzeichnisbasierte Protokolle

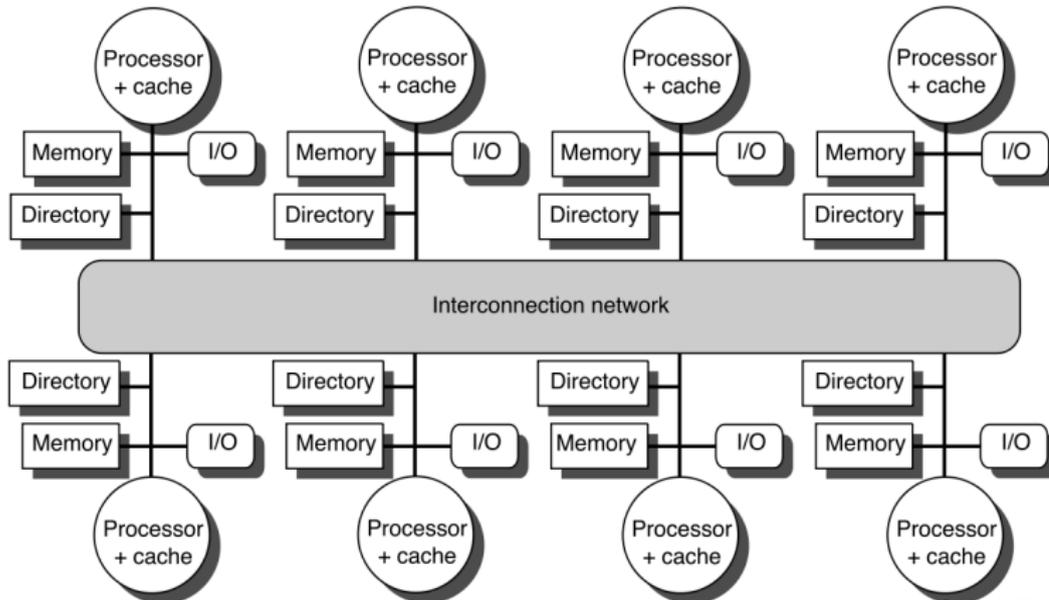
Ziel: Cache-Kohärenz für gemeinsame Daten sicherstellen *ohne* zentrale Kommunikation über Bussystem

Methode:

- ▶ Zentrale Verwaltung des Status eines Speicherblocks in Verzeichnis (directory), jedem verteiltem Speichersystem zugeordnet
- ▶ Lokale partielle Repräsentation des Status im Cache
 - ⇒ Cache und "Heimat"-Verzeichnis der gecacheten Daten kommunizieren über Nachrichten
(Mechanismen ggf. komplexer, wenn nicht atomar, zeitl. Reihenfolge nicht eingehalten, ...)
- ▶ Zustände des Cache/Speicher-Blocks analog zu Snooping

Cache-Kohärenz: Verzeichnisbasierte Protokolle II

Struktur eines DSM-MP-Systems mit verzeichnisbasiertem Cache-Kohärenzprotokoll



Beachte: Ein Directory pro Speicher

©2003 Elsevier Science

Cache-Kohärenz: Verzeichnisbasiertes Beispiel-Protokoll

Zustandsdiagramm für Status eines Cache-Blocks

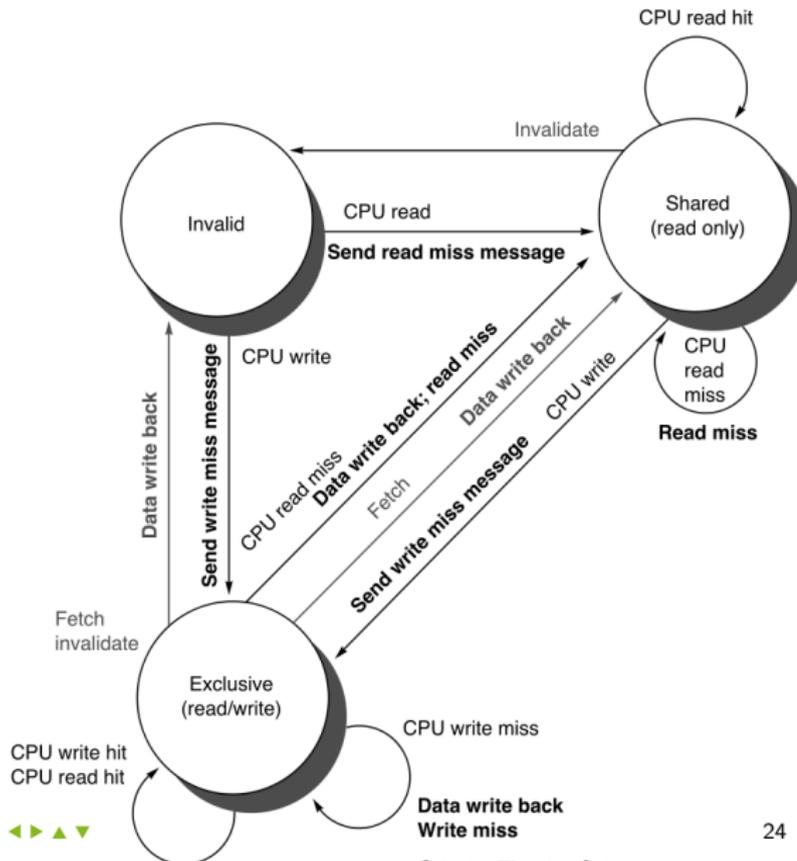
- ▶ Zustände wie Snooping
- ▶ Kommunikation mit Verzeichnis, das zentralen Zustand enthält

Beachte: Bei verzeichnisbasiertem Protokoll:

- ▶ Zustand des Speicherblocks ⇒ Verzeichnis
- ▶ Zustand im Cache: Cache-Block ≠ Speicher

(d.h. kann über Zeit verschiedene

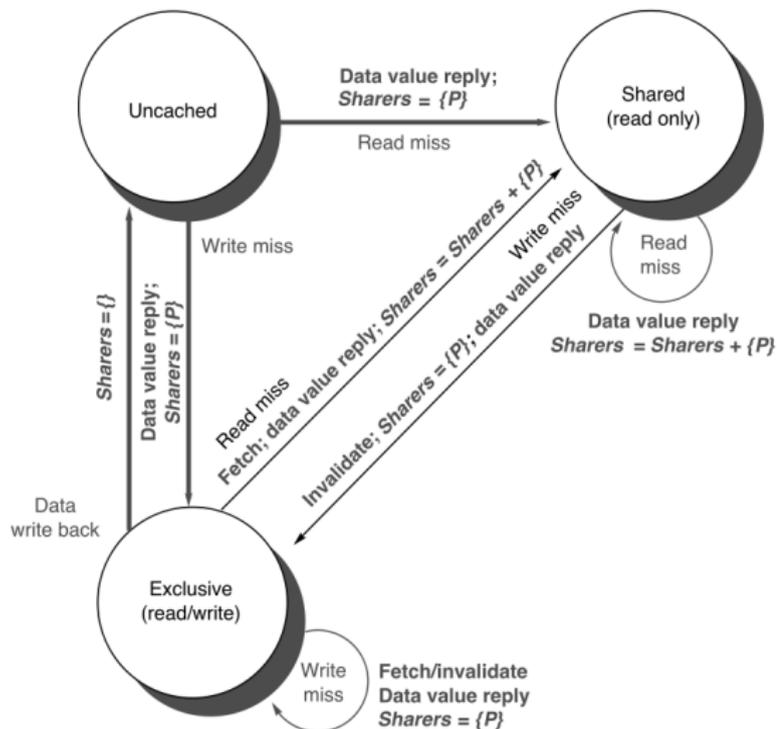
Speicherblöcke enthalten!)



Cache-Kohärenz: Verzeichnisbasiertes Beispiel-Protokoll II

Zustandsdiagramm für Status eines Speicherblocks

- ▶ 3 "bekannte" Zustände (invalid \rightarrow uncached)
- ▶ Zusätzlich: Liste der Prozessoren, die Kopie der Daten des Speicherblocks besitzen (= *sharers*)
- ▶ Kommunikation mit Caches der sharer



Cache-Kohärenz: Verzeichnisbasiertes Beispiel-Protokoll III

Aktionen des Verzeichnisses je nach Zustand:

Uncached: Daten im Speicher haben aktuellen Wert

Read miss:

- ▶ Anfragender Prozessor erhält Daten a.d. Speicher
- ▶ Wird zum einzigen sharer des Speicherblocks
- ▶ Speicherblock ist jetzt im Zustand shared

Write miss:

- ▶ Anfragender Prozessor erhält Daten, wird sharer
- ▶ Zustand des Blocks wird exclusive
(d.h. einzige gültige Kopie der Daten jetzt von sharer gecachet)

Shared: ...

Exclusive: ...

Cache-Kohärenz: Verzeichnisbasiertes Beispiel-Protokoll IV

(Aktionen des Verzeichnisses ...)

Uncached: ...

Shared: Speicherinhalt ist aktuell, ex. gecachete Kopien

Read miss:

- ▶ Anfragender Prozessor erhält Daten aus Speicher
- ▶ Wird zur Menge der sharer hinzugefügt

Write miss:

- ▶ Anfragender Prozessor erhält Daten aus Speicher
- ▶ Alle Prozessoren in aktueller Menge der sharer erhalten invalidate-Nachrichten (Cache-Daten für ungültig erklärt)
- ▶ Anfragender Prozessor wird einziger sharer
- ▶ Zustand des Speicherblocks wird exclusive

Exclusive: ...

Cache-Kohärenz: Verzeichnisbasiertes Beispiel-Protokoll V

(Aktionen des Verzeichnisses ...)

Uncached: ...

Shared: ...

Exclusive: Aktueller Wert im Cache des einzigen sharers

Read miss: Anderer Prozessor will lesen

- ▶ “Besitzer” der Daten erhält data fetch Nachricht
- Daten: “Besitzer”-Cache → Directory → Speicher
- “Besitzer”-Cache: Block-Status → shared
- ▶ Anfragender Prozessor erhält Daten aus Speicher
- ▶ Wird zu Menge der sharer hinzugefügt
- ▶ Zustand des Speicherblocks wird shared

Data write back: Besitzer muss Cache-Block ersetzen

- ▶ ...

Write miss: Speicherblock hat neuen Besitzer

Cache-Kohärenz: Verzeichnisbasiertes Beispiel-Protokoll VI

(Aktionen des Verzeichnisses ...)

Uncached: ...

Shared: ...

Exclusive: Aktueller Wert im Cache des einzigen sharers

Read miss: ...

Data write back: Besitzer muss Cache-Block ersetzen

- ▶ Speicher wird wieder aktuell, Verzeichnis wird "Besitzer"
- ▶ Block wird uncached, Menge der sharer ist leer

Write miss: Speicherblock hat neuen Besitzer

- ▶ Wird bei altem Besitzer ungültig
- ▶ Wert von altem Besitzer geholt, an anfragenden Prozessor
- ▶ Wird neuer Besitzer (= sharer), Status unverändert

Cache-Kohärenz: Zusammenfassung

- ▶ Kohärenz definiert in MP-System mit Caches Verhalten von Schreib-Leseoperationen auf *derselben* Speicherzelle
- ▶ Für shared memory (bus-basiert / SMP) oder DSM (distributed shared memory) Systeme möglich (ex. gemeinsamer oder *logisch* gemeinsam genutzter Speicher)
 - ▶ bus-basiert / SMP: Snooping-Protokolle, d.h. verteilte Repräsentation / Verwaltung des Cachezustands durch Beobachtung des Buses (→ MSI, MESI, ...)
 - ▶ DSM: Verzeichnis (pro [verteiletem] Speichermodul) verwaltet Caching-Zustand der Daten; Caches agieren wie bei Snooping-Protokollen
- ⊙ Kohärenz definiert nicht Beziehungen zwischen Schreib-Lese-Operationen auf *unterschiedlichen* Speicherzellen
⇒ Konsistenz

Cache-Kohärenz: Zusammenfassung

- ▶ Kohärenz definiert in MP-System mit Caches Verhalten von Schreib-Leseoperationen auf *derselben* Speicherzelle
- ▶ Für shared memory (bus-basiert / SMP) oder DSM (distributed shared memory) Systeme möglich (ex. gemeinsamer oder *logisch* gemeinsam genutzter Speicher)
 - ▶ bus-basiert / SMP: Snooping-Protokolle, d.h. verteilte Repräsentation / Verwaltung des Cachezustands durch Beobachtung des Buses (→ MSI, MESI, ...)
 - ▶ DSM: Verzeichnis (pro [verteiletem] Speichermodul) verwaltet Caching-Zustand der Daten; Caches agieren wie bei Snooping-Protokollen
- ◉ Kohärenz definiert nicht Beziehungen zwischen Schreib-Lese-Operationen auf *unterschiedlichen* Speicherzellen
⇒ **Konsistenz**