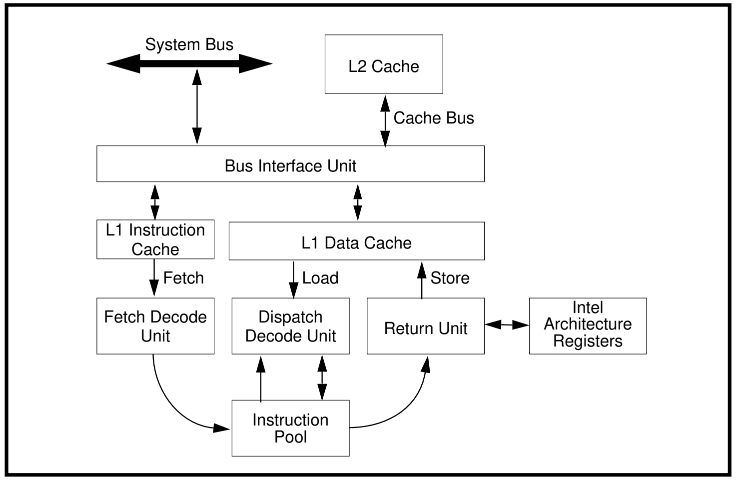
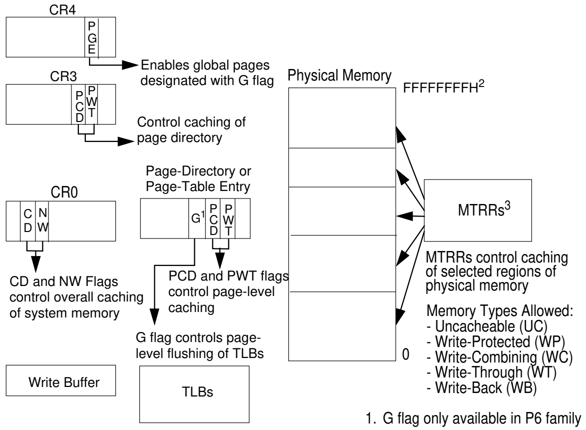
- The processing units in the Pentium® Pro processor microarchitecture and their interface with the memory subsystem



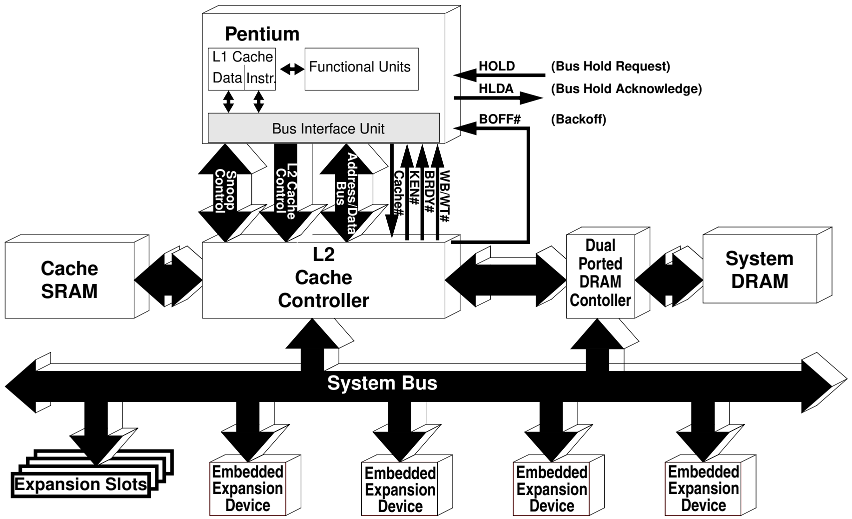
Universität Erlangen-Nürnberg, IMMD IV, F. Hofmann

- Cache-control mechanisms available in the Intel Architecture processors



1. G flag only available in P6 family processors.
2. If 36-bit physical addressing is being used, the maximum physical address size is FFFFFFFFFH
3. MTRRs available only in P6 familly processors; similar control available in Pentium® processor with KEN# and WB/WT# pins, and in Intel486™ processor

Universität Erlangen-Nürnberg, IMMD IV, F. Hofmann

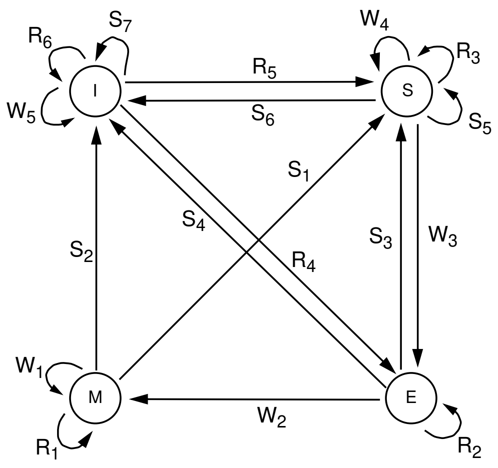


Universität Erlangen-Nürnberg, IMMD IV, F. Hofmann

- MESI Cache Line States

Cache Line State	M (Modified)	E (Exclusive)	S (Shared)	I (Invalid)
This cache line is valid	Yes	Yes	Yes	No
The memory copy is ...	... out of date	... valid	...valid	-
Copies exist in caches of other processors?	No	No	Maybe	Maybe
A write to this line ...	... does not go to bus	... does not go to bus	... causes the processor to gain exclusive ownership of the line	... goes directly to bus

Universität Erlangen-Nürnberg, IMMD IV, F. Hofmann



- Lesezugriffe
  - **M nach M (R_1):** Ein Lesezugriff hat zu einem Treffer geführt, die Daten sind im Pufferspeicher enthalten und werden der CPU übergeben.
  - **E nach E (R_2):** Auch hier hat der Lesezugriff zu einem Treffer geführt, und die Daten werden an die CPU übergeben.
  - **S nach S (R_3):** Der Lesezugriff ergab einen Treffer, die Daten werden an die CPU übergeben. Selbstverständlich führen die drei angeführten Lesezugriffe (R_1 bis R_3) nicht zu einer Änderung des Pufferspeicher-Zustands oder der gespeicherten Daten.
  - **I nach E (R_4):** Der Lesezugriff verursachte einen Fehlzugriff, die Daten sind nicht im Pufferspeicher abgelegt. Es wird ein externer Lesezyklus ausgelöst, um die Daten zu lesen. Damit sich die Pufferspeicherzeile nach dem Lesevorgang im 'exclusive'-Zustand befindet, müssen die angesprochenen Daten pufferbar sein, sonst erfolgt keine Übernahme in den Pufferspeicher. Außerdem muß eine 'write-back'-Strategie implementiert sein.

- Lesezugriffe (Fortsetzung)
  - **I nach S (R_5):** Der Lesezugriff hat wie oben zu einem Fehlzugriff geführt. Die Pufferspeicherverwaltung löst auch hier das Füllen der entsprechenden Pufferzeile aus, um die Daten zu lesen. Soll die Pufferzeile anschließend im 'shared'-Zustand sein, müssen die angesprochenen Daten pufferbar sein. Außerdem ist es notwendig, ein 'write-through' vorzusehen.
  - **I nach I (R_5):** Der Lesezugriff hat zu einem Fehlzugriff geführt. Die Pufferspeicherverwaltung kann aber die entsprechende Pufferzeile nicht laden (die Daten sind z. B. als 'Memory-Mapped-Register' nicht pufferbar); sie bleibt weiter ungültig.

- Schreibzugriffe
  - **M nach M (W_1):** Der Schreibzugriff hat zu einem Treffer geführt, die Daten sind im Pufferspeicher vorhanden und werden dort aktualisiert. Nach dem MESI-Protokoll betrifft das einen 'write-back'-Pufferspeicher (für einen 'write-through'-Pufferspeicher sind nur die beiden MESI-Zustände 'shared' und 'invalid' gültig, um das Durchschreiben zu erzwingen), so daß kein Schreibzyklus auf den externen Bus gelegt wird.
  - **E nach M (W_2):** Der Schreibzugriff hat einen Treffer auf eine vorher noch nicht überschriebene Pufferspeicherzeile verursacht. Die Pufferspeicherverwaltung kennzeichnet die Zeile nun als modifiziert. Nach dem MESI-Protokoll betrifft auch dieser Fall einen 'write-back'-Pufferspeicher, so daß kein Schreibzyklus auf dem externen Bus erfolgt.
  - **S nach E (W_3):** Der Schreibzugriff hat einen Treffer ergeben. Weil die Zeile als 'shared' gekennzeichnet ist, kann sie auch in anderen Pufferspeichern als Kopie abgelegt sein. Diese Einträge müssen invalidiert werden, die Pufferspeicherverwaltung veranlaßt daher einen Schreibzyklus auf dem externen Bus. Die Zeile ist dann nur noch im lokalen Pufferspeicher enthalten und darf folglich als 'exclusive' gekennzeichnet werden.

- Schreibzugriffe (Fortsetzung)
  - **S nach S (W_4):** Der Schreibzugriff hat auch hier einen Treffer ergeben. Der Übergang W_4 betrifft ausschließlich einen 'write-through'-Pufferspeicher (für einen 'write-back'-Pufferspeicher ist der Übergang W_3 vorgesehen), so daß die Pufferspeicherzeile als 'shared' gekennzeichnet bleibt.
  - **I nach I (W_5):** Der Schreibzugriff hat zu einem Fehlzugriff geführt. Das MESI-Protokoll sieht keine 'write-allocate'-Strategie vor und somit wird der fehlende Eintrag nicht in den Pufferspeicher geschrieben, die Pufferspeicherzeile bleibt weiter ungültig.

- Abfragezyklen (Snooping)

Abfragezyklen werden von einem externen 'Busmaster' ausgelöst, um festzustellen, ob ein Pufferspeicher eine bestimmte Zeile enthält und welchen MESI-Zustand sie gegebenenfalls aufweist.

  - **M nach S (S_1):** Der Abfragezyklus hat eine modifizierte Pufferspeicherzeile getroffen, die nicht invalidiert werden soll. Sie wird trotzdem in den Hauptspeicher zurückgeschrieben.
  - **M nach I (S_2):** Der Abfragezyklus betrifft wie oben eine Pufferspeicherzeile im Zustand 'modified'. Im Gegensatz zu S_2 soll sie hier aber invalidiert werden. Zusätzlich wird sie in den Hauptspeicher zurückgeschrieben.
  - **E nach S (S_3):** Der Abfragezyklus betrifft hat eine Pufferspeicherzeile getroffen, die als 'exclusive' markiert ist. Sie ist also bisher nicht modifiziert worden und muß somit nicht zurückgeschrieben werden. Der Zweck von S_3 ist, eine vorher nur in einem Pufferspeicher vorhandene Zeile auch in einen anderen Pufferspeicher des Systems zu übertragen. Die Pufferspeicherzeile kann dann nicht mehr 'exclusive' sein, sondern muß als 'shared' gekennzeichnet werden.

- Abfragezyklen (Fortsetzung)
  - **E nach I (S_4):** Der Abfragezyklus betrifft wie bei S_3 eine Pufferspeicherzeile, die als 'exclusive' markiert ist. S_4 wird ebenfalls dazu verwendet, eine vorher nur in einem Pufferspeicher vorhandene Zeile auch in einen anderen Pufferspeicher zu übertragen. Im Gegensatz zu S_3 wird die Zeile aber invalidiert, so daß sie als Pufferspeicherzeile im Zustand 'exclusive' im anderen Pufferspeicher vorhanden sein kann (sonst ist nur 'shared' möglich).
  - **S nach S (S_5):** Der Abfragezyklus betrifft eine Pufferspeicherzeile, die als 'shared' gekennzeichnet ist und somit möglicherweise als Kopie in einem anderen Pufferspeicher vorliegt. Der Übergang S_5 informiert das externe System also lediglich, daß die betreffende Pufferspeicherzeile im abgefragten Pufferspeicher vorhanden ist. Es erfolgt keine weitere Busaktivität.
  - **S nach I (S_6):** Der Abfragezyklus hat wie oben zu einem Treffer auf eine als 'shared' markierte Pufferspeicherzeile geführt. Sie ist nicht modifiziert worden und muß bei der folgenden Invalidierung auch nicht zurückgeschrieben werden. Der abfragende externe 'Busmaster' weiß dann, daß seine Kopie ebenfalls aktuell ist.

- Abfragezyklen (Fortsetzung)
  - **I nach I (S_7):** Der Abfragezyklus hat eine Pufferspeicherzeile ermittelt, die als 'invalid' markiert ist. Sie enthält somit keine gültigen Daten. Es erfolgt keine weitere Busaktivität und der abfragende 'Busmaster' ignoriert den Inhalt der betreffenden Zeile im angesprochenen Pufferspeicher.