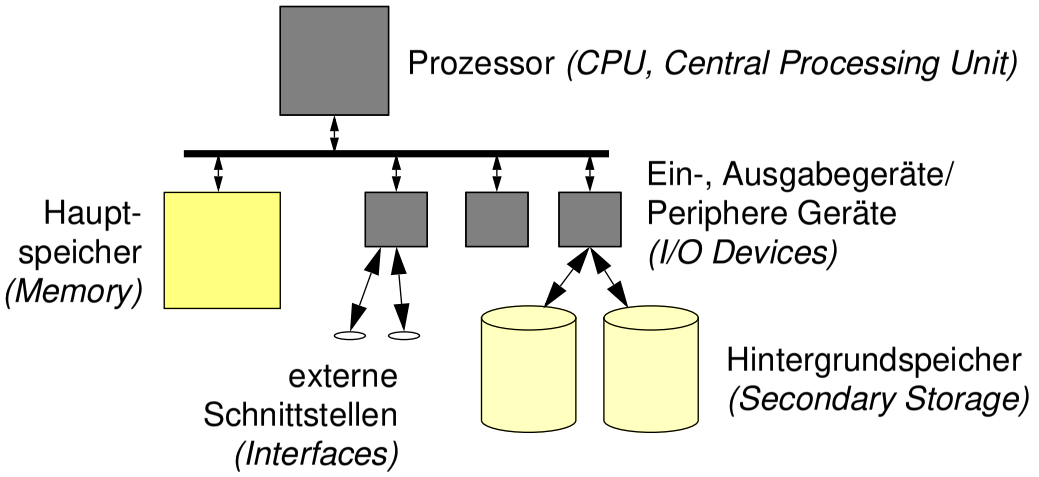
E Speicherverwaltung

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

E Speicherverwaltung

- Betriebsmittel

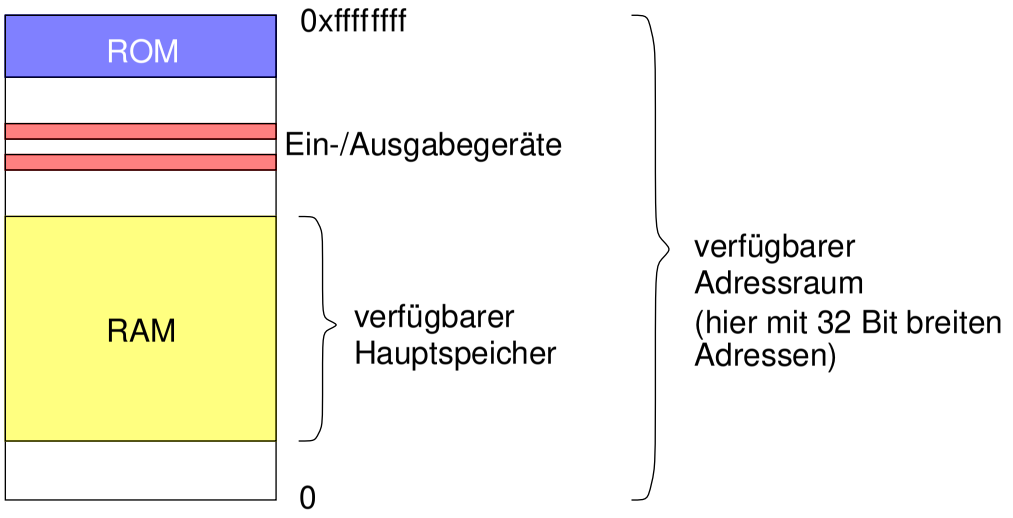


© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

1 Speichervergabe

1.1 Problemstellung

- Verfügbarer Speicher



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

1.1 Problemstellung (2)

- Belegung des verfügbaren Hauptspeichers durch
  - Benutzerprogramme
    - Programmbefehle (Code, Binary)
    - Programmdaten
  - Betriebssystem
    - Betriebssystemcode
    - Puffer
    - Systemvariablen
- ★ Zuteilung des Speichers nötig

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

1.2 Statische Speicherzuteilung

- Feste Bereiche für Betriebssystem und Benutzerprogramm
- Probleme:
  - Begrenzung anderer Ressourcen
    (z.B. Bandbreite bei Ein-/Ausgabe wg. zu kleiner Systempuffer)
  - Ungenutzter Speicher des Betriebssystems kann von Anwendungsprogramm nicht genutzt werden und umgekehrt
- Dynamische Speicherzuteilung einsetzen

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

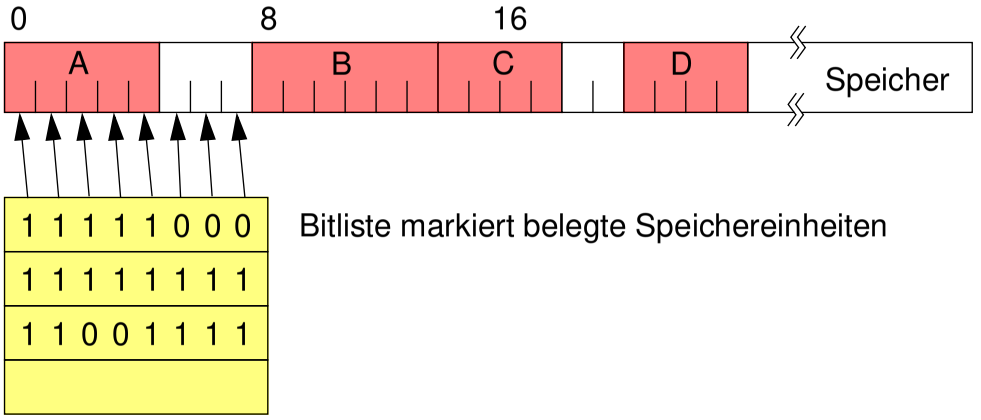
1.3 Dynamische Speicherzuteilung

- Segmente
  - zusammenhängender Speicherbereich
    (Bereich mit aufeinanderfolgenden Adressen)
- Allokation (Anforderung) und Freigabe von Segmenten
- Ein Anwendungsprogramm besitzt üblicherweise folgende Segmente (siehe auch D.2.4):
  - Codesegment
  - Datensegment
  - Stacksegment (für Verwaltungsinformationen, z.B. bei Funktionsaufrufen)
- Suche nach geeigneten Speicherbereichen zur Zuteilung
- Speicherzuteilungsstrategien nötig

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

1.4 Freispeicherverwaltung

- Freie (evtl. auch belegte) Segmente des Speichers müssen repräsentiert werden
- Bitlisten



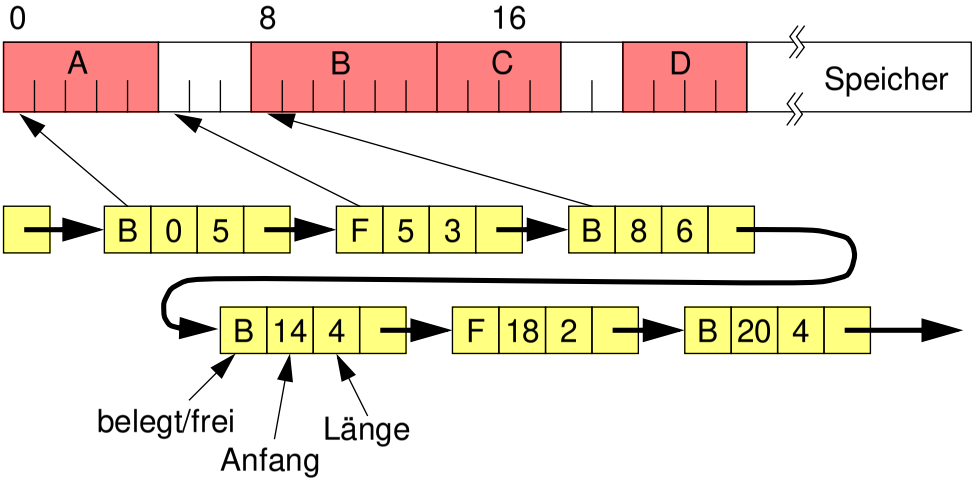
Bitliste markiert belegte Speichereinheiten

Speichereinheiten gleicher Größe (z.B. 1 Byte, 64 Byte, 1024 Byte)

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

1.4 Freispeicherverwaltung (2)

- Verkettete Liste

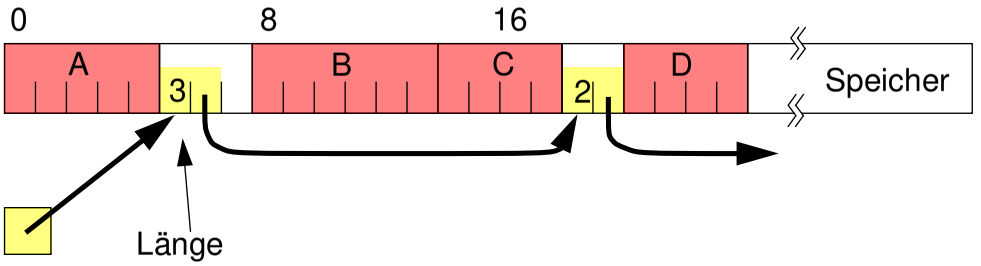


Repräsentation auch von freien Segmenten

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

1.4 Freispeicherverwaltung (3)

- Verkettete Liste in dem freien Speicher



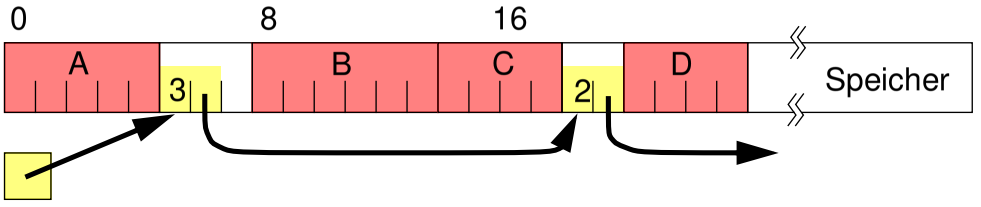
Mindestlückengröße muss garantiert werden

- Zur Effizienzsteigerung eventuell Rückwärtsverkettung nötig
- Repräsentation letztlich auch von der Vergabestrategie abhängig

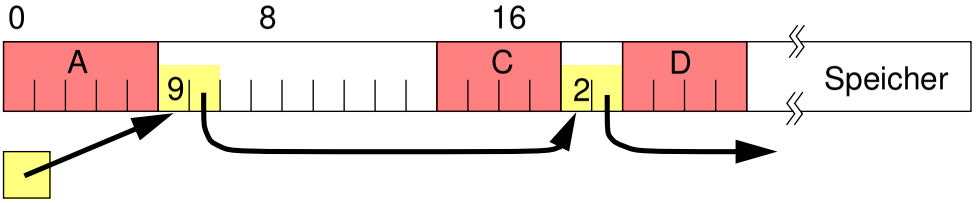
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

1.5 Speicherfreigabe

- Verschmelzung von Lücken



nach Freigabe von B:



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

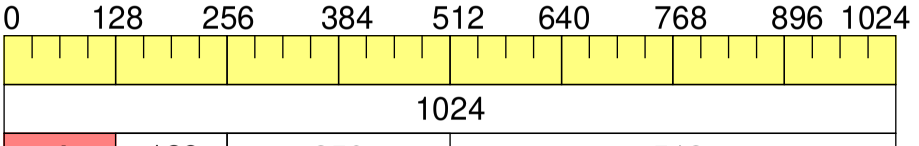
1.6 Vergabestrategien

- First Fit - die erste passende Lücke wird gesucht
  - Lücken sind sortiert nach aufsteigenden Speicheradressen
- Rotating First Fit / Next Fit
  - wie First Fit aber Start bei der zuletzt zugewiesenen Lücke
- Best Fit - die kleinste passende Lücke wird gesucht
  - Lücken sind sortiert nach aufsteigender Größe
- Worst Fit - die größte passende Lücke wird gesucht
  - Lücken sind sortiert nach absteigender Größe
- Probleme:
  - Speicherverschnitt (*externe/interne Fragmentierung*)
  - zu kleine Lücken (*Kompaktifizierung*, *Relokation*)

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

1.7 Buddy Systeme

- Einteilung in dynamische Bereiche der Größe 2^n



	1024								
Anfrage 70	A	128		256			512		
Anfrage 35	A	B	64	256			512		
Anfrage 80	A	B	64	C	128		512		
Freigabe A	128	B	64	C	128		512		
Anfrage 60	128	B	D	C	128		512		
Freigabe B	128	64	D	C	128		512		
Freigabe D	256			C	128		512		
Freigabe C	1024								

der kleinste passende Buddy wird gesucht (effizientes Verfahren)

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

1.8 Einsatz der Verfahren

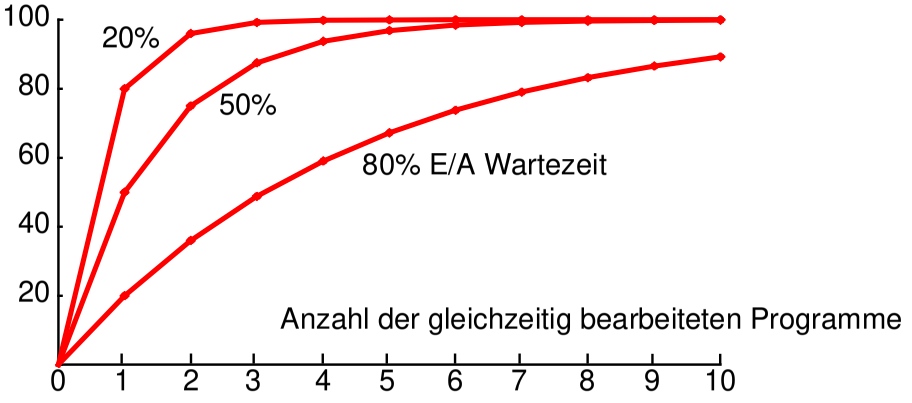
- Einsatz im Betriebssystem
  - Verwaltung des Systemspeichers
  - Zuteilung von Speicher an Prozesse und Betriebssystem
- Einsatz innerhalb eines Prozesses
  - Verwaltung des Haldenspeichers *(Heap)*
  - erlaubt dynamische Allokation von Speicherbereichen durch den Prozess (**`malloc`** und **`free`**)
- Einsatz für Bereiche des Sekundärspeichers
  - Verwaltung bestimmter Abschnitte des Sekundärspeichers z.B. Speicherbereich für Prozessauslagerungen *(Swap space)*

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

2 Mehrprogrammbetrieb

2.1 Problemstellung

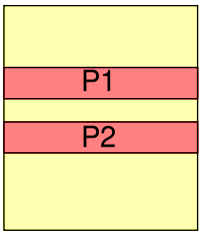
- Mehrere Prozesse laufen gleichzeitig
  - Wartezeiten von Ein-/Ausgabeoperationen ausnutzen
  - CPU Auslastung verbessern
  - CPU-Nutzung in Prozent, abhängig von der Anzahl der Prozesse



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

2.1 Problemstellung (2)

- ▲ Mehrere Prozesse benötigen Hauptspeicher
  - ◆ Prozesse liegen an verschiedenen Stellen im Hauptspeicher.
  - ◆ Speicher reicht eventuell nicht für alle Prozesse.
  - ◆ Schutzbedürfnis des Betriebssystems und der Prozesse untereinander



zwei Prozesse und deren Codesegmente im Speicher

- ★ Relokation von Programmbefehlen (Binaries)
- ★ Ein- und Auslagern von Prozessen
- ★ Hardwareunterstützung

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

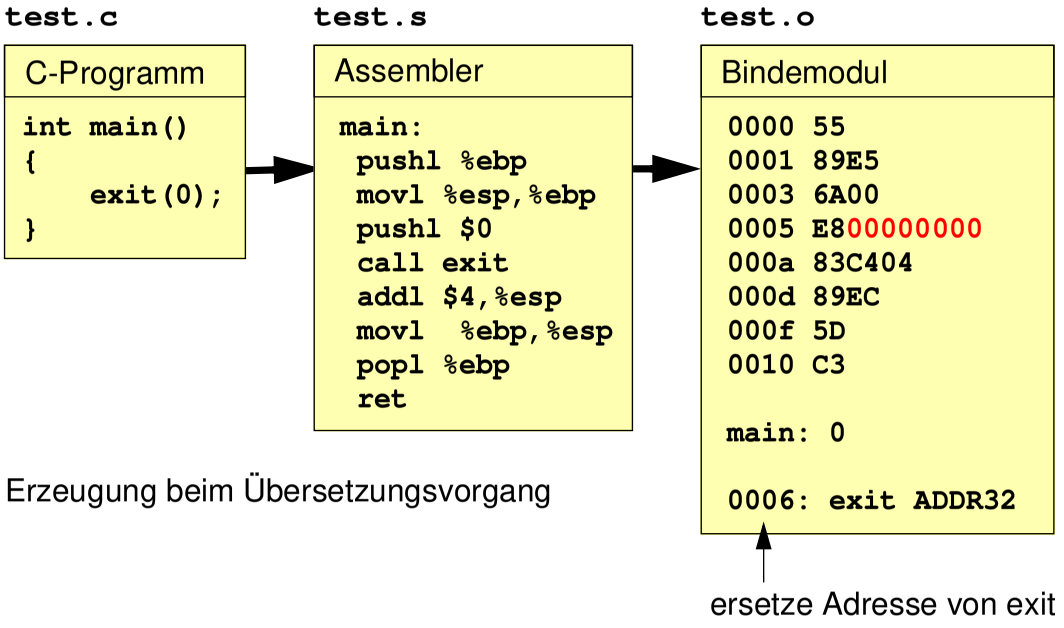
2.2 Relokation

- ■ Festlegung absoluter Speicheradressen in den Programmbefehlen
  - ◆ z.B. ein Sprungbefehl in ein Unterprogramm oder ein Ladebefehl für eine Variable aus dem Datensegment
- ■ Absolutes Binden (*Compile Time*)
  - ◆ Adressen stehen fest
  - ◆ Programm kann nur an bestimmter Speicherstelle korrekt ablaufen
- ■ Statisches Binden (*Load Time*)
  - ◆ Beim Laden (Starten) des Programms werden die absoluten Adressen angepasst (reloziert)
  - ◆ Relokationsinformation nötig, die vom Compiler oder Assembler geliefert wird

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

2.2 Relokation (2)

- Übersetzungsvorgang (Erzeugung der Relokationsinformation)

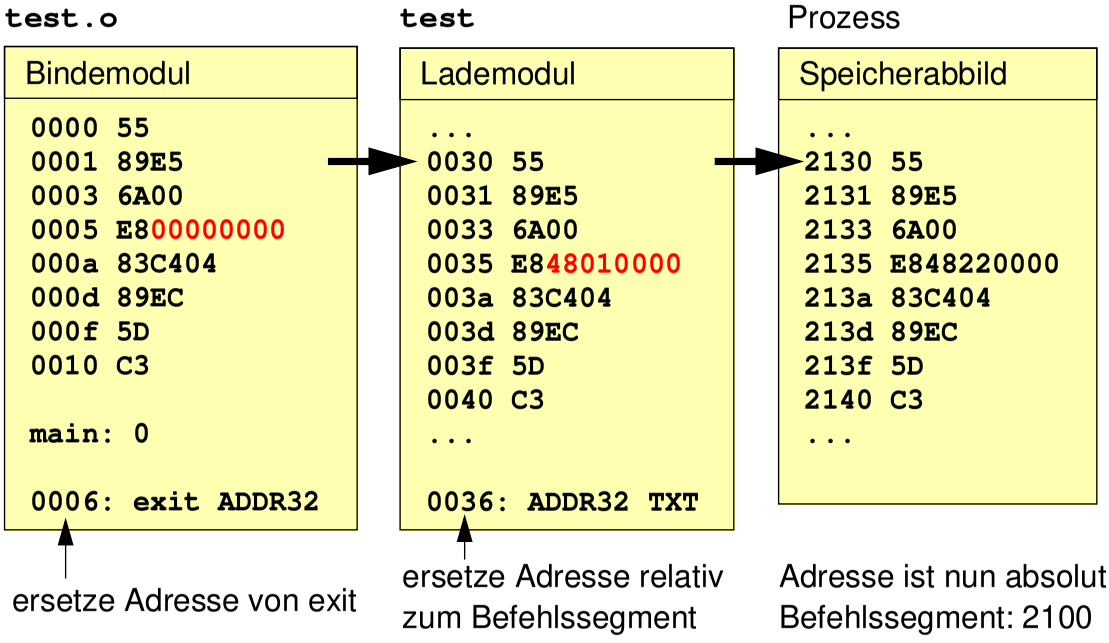


Erzeugung beim Übersetzungsvorgang

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

2.2 Relokation (3)

- Binde- und Ladevorgang



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

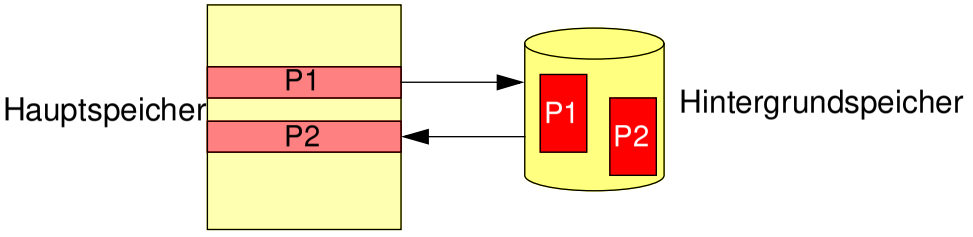
2.2 Relokation (4)

- Relokationsinformation im Bindemodul
  - erlaubt das Binden von Modulen in beliebige Programme
- Relokationsinformation im Lademodul
  - erlaubt das Laden des Programms an beliebige Speicherstellen
  - absolute Adressen werden erst beim Laden generiert
- ★ Alternative
  - Programm benutzt keine absoluten Adressen und kann daher immer an beliebige Speicherstellen geladen werden

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

2.3 Ein-, Auslagerung (*Swapping*)

- Segmente eines Prozesses werden auf Hintergrundspeicher ausgelagert und im Hauptspeicher freigegeben
  - z.B. zur Überbrückung von Wartezeiten bei E/A oder Round-Robin Schedulingstrategie
- Einlagern der Segmente in den Hauptspeicher am Ende der Wartezeit

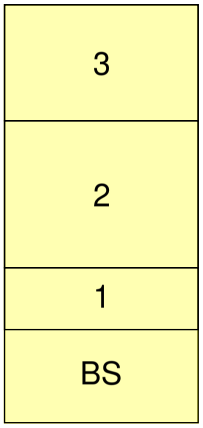


- ▲ Aus-, Einlagerzeit ist hoch
  - Latenzzeit der Festplatte
  - Übertragunszeit

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

2.3 Ein-, Auslagerung (2)

- Prozess ist statisch gebunden
  - kann nur an gleiche Stelle im Hauptspeicher wieder eingelagert werden
  - Kollisionen mit eventuell neu im Hauptspeicher befindlichen Segmenten
- Mögliche Lösung: Partitionierung des Hauptspeichers



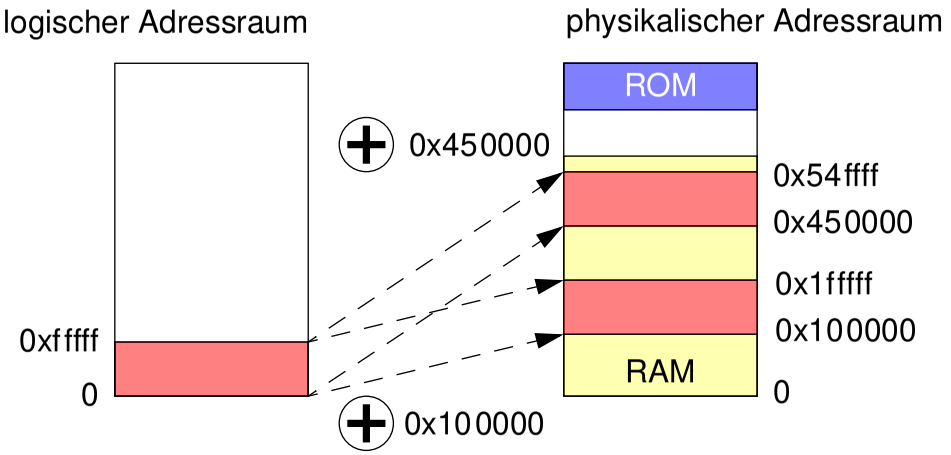
Partition 3
Partition 2
Partition 1
Betriebssystem

- In jeder Partition läuft nur ein Prozess
- Einlagerung erfolgt wieder in die gleiche Partition
- Speicher kann nicht optimal genutzt werden

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

2.4 Segmentierung

- Hardwareunterstützung: Umsetzung logischer in physikalische Adressen
  - Prozesse erhalten einen logischen Adressraum

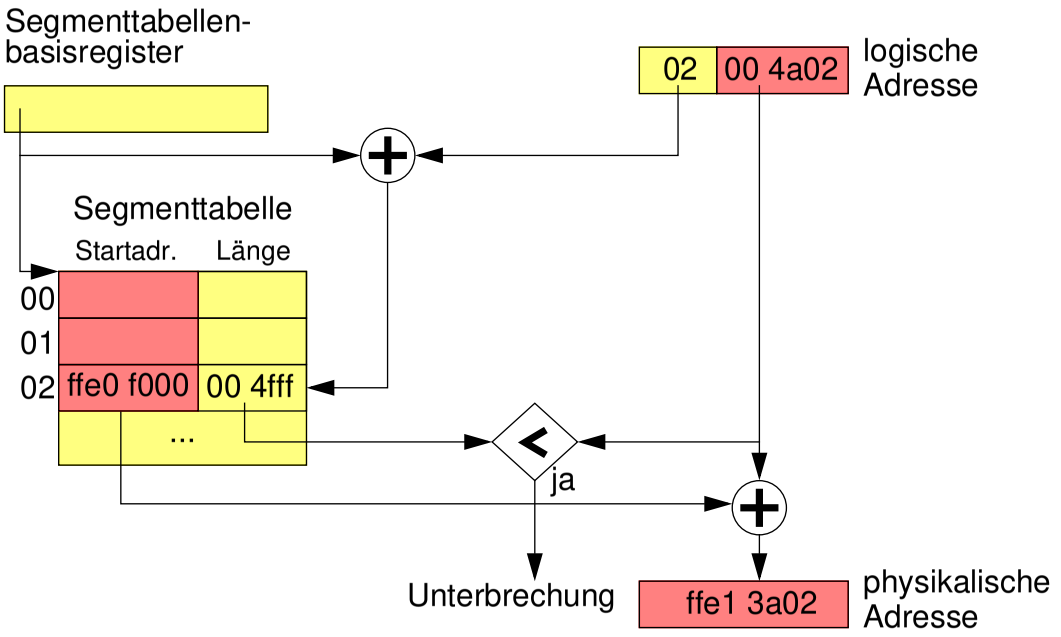


Das Segment des logischen Adressraums kann an jeder beliebige Stelle im physikalischen Adressraum liegen.

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

2.4 Segmentierung (2)

- Realisierung mit Übersetzungstabelle



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

2.4 Segmentierung (3)

- Hardware wird MMU *(Memory Management Unit)* genannt
- Schutz vor Segmentübertretung
  - Unterbrechung zeigt Speicherverletzung an
  - Programme und Betriebssystem voreinander geschützt
- Prozessumschaltung durch Austausch der Segmentbasis
  - jeder Prozess hat eigene Übersetzungstabelle
- Ein- und Auslagerung vereinfacht
  - nach Einlagerung an beliebige Stelle muss lediglich die Übersetzungstabelle angepasst werden
- Gemeinsame Segmente möglich
  - Befehlssegmente
  - Datensegmente (*Shared Memory*)

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

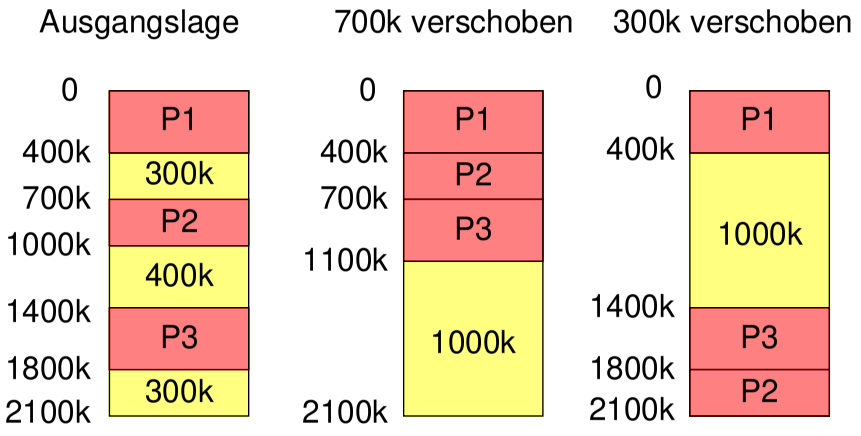
2.4 Segmentierung (4)

- Zugriffsschutz einfach integrierbar
  - z.B. Rechte zum Lesen, Schreiben und Ausführen von Befehlen, die von der MMU geprüft werden
- Fragmentierung des Speichers durch häufiges Ein- und Auslagern
  - es entstehen kleine, nicht nutzbare Lücken
- Kompaktifizieren
  - Segmente werden verschoben, um Lücken zu schließen; Segmenttabelle wird jeweils angepasst
- lange E/A Zeiten für Ein- und Auslagerung
  - nicht alle Teile eines Segments werden gleich häufig genutzt

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

2.5 Kompaktifizieren

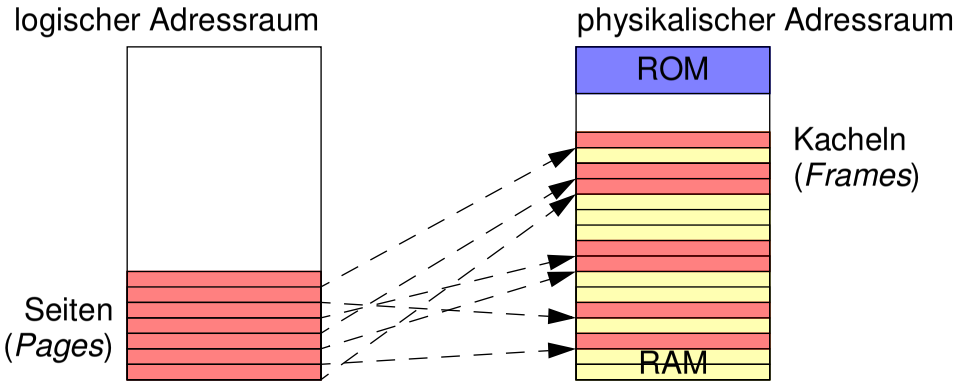
- Verschieben von Segmenten
  - Erzeugen von weniger aber größeren Lücken
  - Verringern des Verschnitts
  - aufwendige Operation, abhängig von der Größe der verschobenen Segmente



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

3 Seitenadressierung (*Paging*)

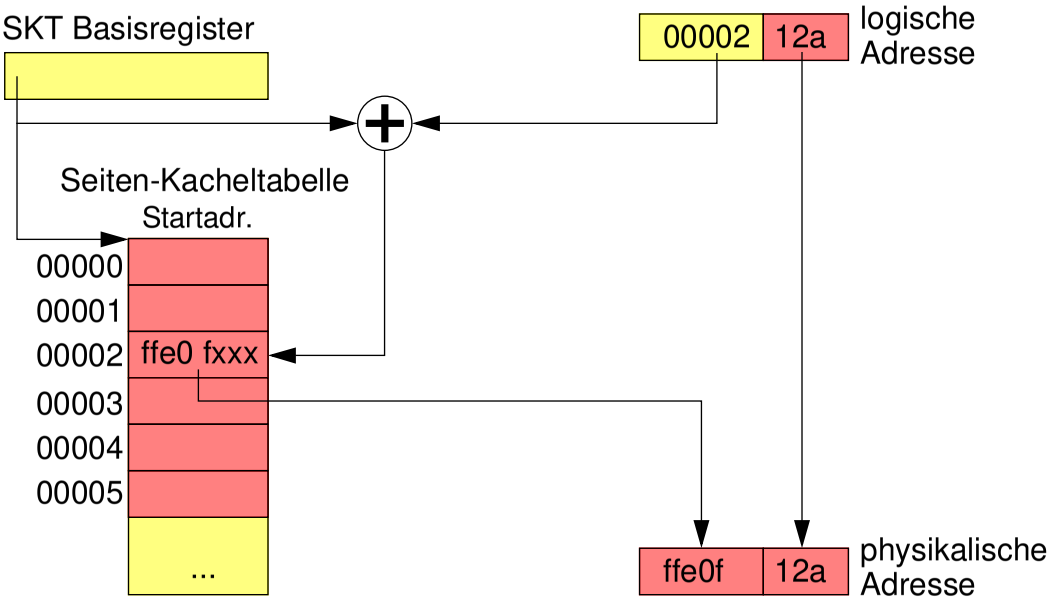
- Einteilung des logischen Adressraums in gleichgroße Seiten, die an beliebigen Stellen im physikalischen Adressraum liegen können
  - Lösung des Fragmentierungsproblem
  - keine Kompaktifizierung mehr nötig
  - Vereinfacht Speicherbelegung und Ein-, Auslagerungen



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

3.1 MMU mit Seiten-Kacheltabelle

- Tabelle setzt Seiten in Kacheln um



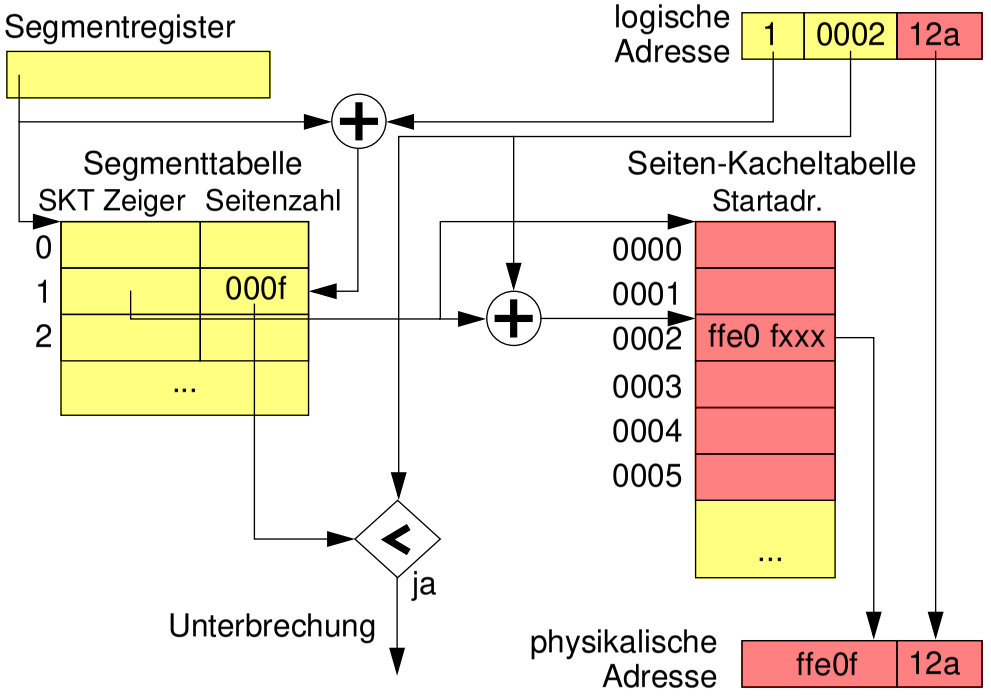
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

3.1 MMU mit Seiten-Kacheltabelle (2)

- ▲ Seitenadressierung erzeugt internen Verschnitt
  - ◆ letzte Seite eventuell nicht vollständig genutzt
- ■ Seitengröße
  - ◆ kleine Seiten verringern internen Verschnitt, vergrößern aber die Seiten-Kacheltabelle (und umgekehrt)
  - ◆ übliche Größen: 512 Bytes — 8192 Bytes
- ▲ große Tabelle, die im Speicher gehalten werden muss
- ▲ viele implizite Speicherzugriffe nötig
- ▲ nur ein „Segment“ pro Kontext
- ★ Kombination mit Segmentierung

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

3.2 Segmentierung und Seitenadressierung



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

3.2 Segmentierung und Seitenadressierung (2)

- ▲ noch mehr implizite Speicherzugriffe
- ▲ große Tabellen im Speicher
- ★ Mehrstufige Seitenadressierung mit Ein- und Auslagerung

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

3.3 Ein- und Auslagerung von Seiten

- Es ist nicht nötig ein gesamtes Segment aus- bzw. einzulagern
  - Seiten können einzeln ein- und ausgelagert werden
- Hardware-Unterstützung

Seiten-Kacheltabelle

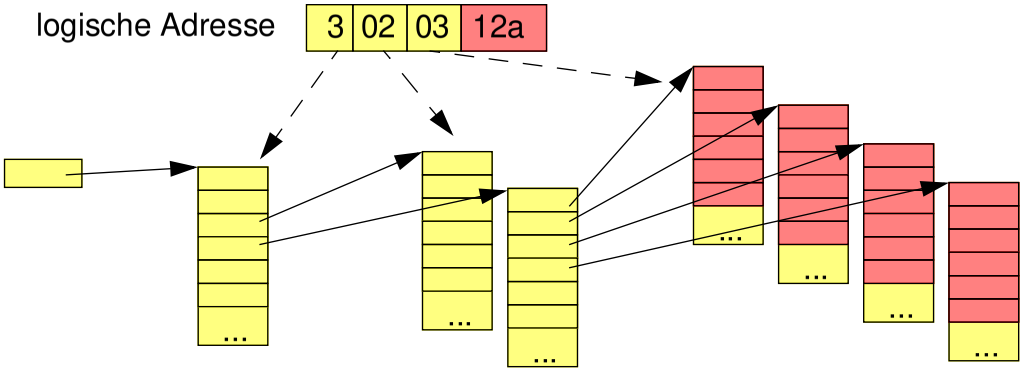
	Startadr.	Präsenzbit
0000		
0001		
0002	ffe0 fxxx	X
	...	

- Ist das Präsenzbit gesetzt, bleibt alles wie bisher.
- Ist das Präsenzbit gelöscht, wird eine Unterbrechung ausgelöst (*Page fault*).
- Die Unterbrechungsbehandlung kann nun für das Laden der Seite vom Hintergrundspeicher sorgen und den Speicherzugriff danach wiederholen (benötigt HW Support in der CPU).

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

3.4 Mehrstufige Seitenadressierung

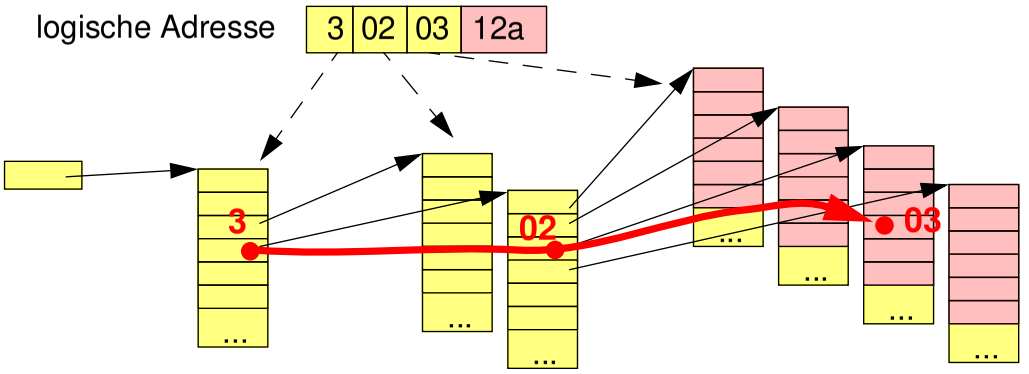
- Beispiel: zweifach indirekte Seitenadressierung



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

3.4 Mehrstufige Seitenadressierung

- Beispiel: zweifach indirekte Seitenadressierung

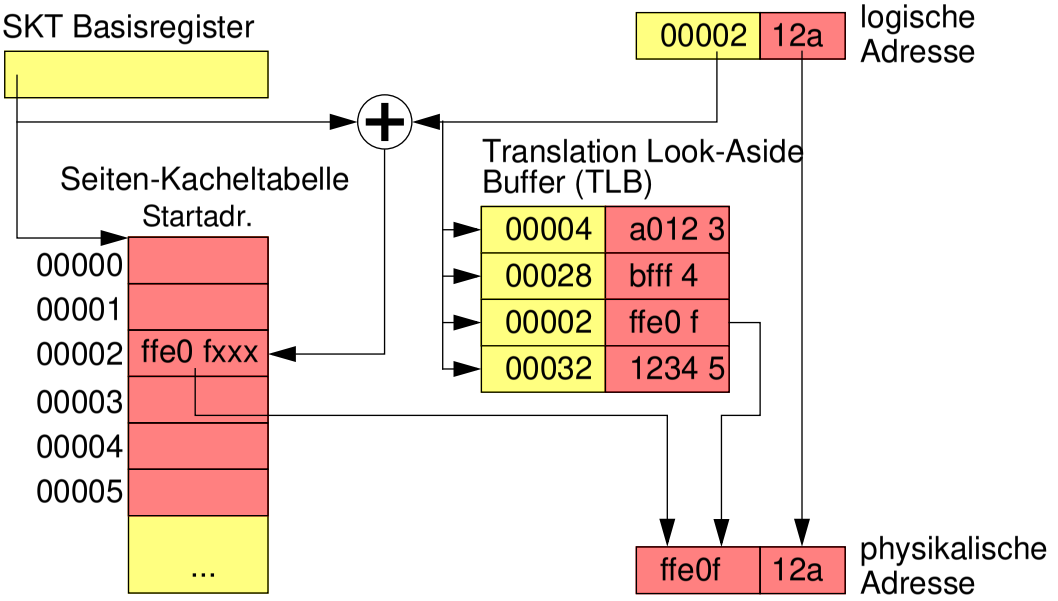


- Präsenzbit auch für jeden Eintrag in den höheren Stufen
  - Tabellen werden aus- und einlagerbar
- Noch mehr implizite Speicherzugriffe

Systemprogrammierung I
E – 32
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

3.5 Translation Look-Aside Buffer

- Schneller Registersatz wird konsultiert bevor auf die SKT zugegriffen wird:



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

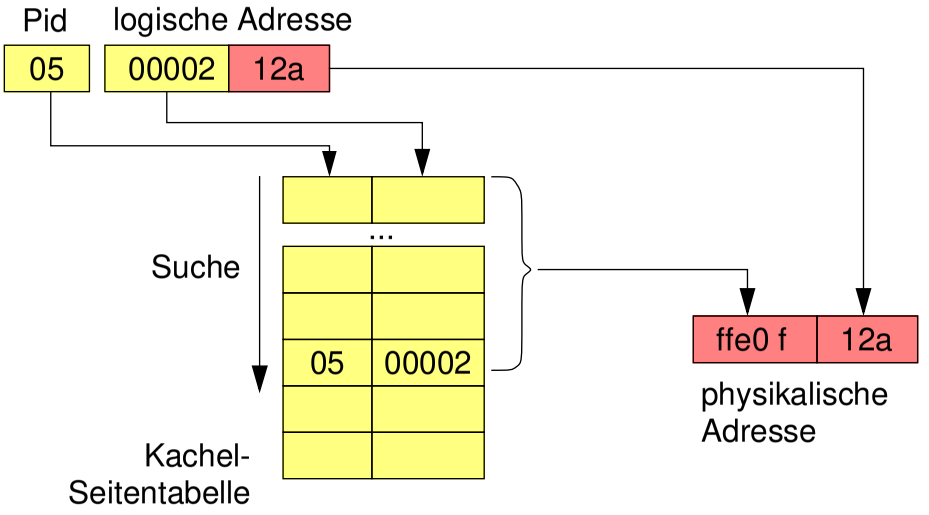
3.5 Translation Look-Aside Buffer (2)

- Schneller Zugriff auf Seitenabbildung, falls Information im voll-assoziativen Speicher des TLB
  - keine impliziten Speicherzugriffe nötig
- Bei Kontextwechseln muss TLB gelöscht werden (*Flush*)
- Bei Zugriffen auf eine nicht im TLB enthaltene Seite wird die entsprechende Zugriffsinformation in den TLB eingetragen
  - Ein alter Eintrag muss zur Ersetzung ausgesucht werden
- TLB Größe
  - Pentium: Daten TLB = 64, Code TLB = 32, Seitengröße 4K
  - Sparc V9: Daten TLB = 64, Code TLB = 64, Seitengröße 8K
  - Größere TLBs bei den üblichen Taktraten zur Zeit nicht möglich

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

3.6 Invertierte Seiten-Kacheltabelle

- Zum Umsetzen der Adressen nur Abbildung der belegten Kacheln nötig
  - eine Tabelle, die zu jeder Kachel die Seitenabbildung hält



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

3.6 Invertierte Seiten-Kacheltabelle (2)

- Vorteile
  - wenig Platz zur Speicherung der Abbildung notwendig
  - Tabelle kann immer im Hauptspeicher gehalten werden
- Nachteile
  - prozesslokale SKT zusätzlich nötig für Seiten, die ausgelagert sind
    - diese können aber ausgelagert werden
  - Suche in der KST ist aufwendig
    - Einsatz von Assoziativspeichern und Hashfunktionen

3.7 Systemaufruf

- Ermitteln der Seitengröße des Betriebssystems

```
int getpagesize(void);
```


© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

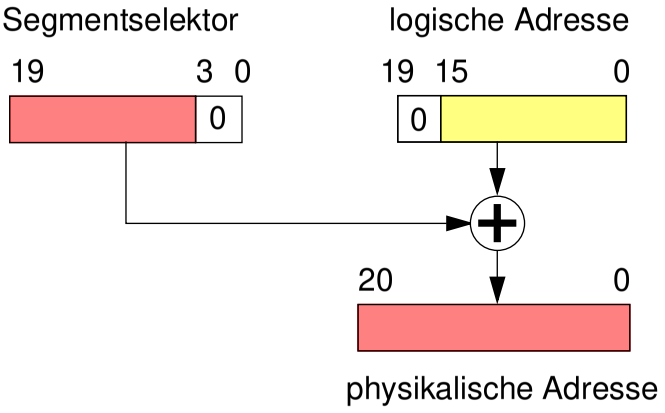
4 Fallstudie: Pentium

- Physikalische Adresse
  - 32 bit breit
- Segmente
  - CS – Codesegment: enthält Instruktionen
  - DS – Datensegment
  - SS – Stacksegment
  - ES, FS, GS – zusätzliche Segmente
  - Befehle beziehen sich auf eines oder mehrere der Segmente
- Segmentadressierung
  - Segmentselektor zur Auswahl eines Segments: 16 bit bezeichnen das Segment

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

4.1 Real Mode Adressierung

- Adressgenerierung im Real Mode
  - 16 bit breiter Segmentselektor wird als 20 bit breite Adresse interpretiert und auf die logische Adresse addiert



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

4.2 Protected Mode Adressierung

- Vier Betriebsmodi (Stufen von Privilegien)
  - Stufe 0: höchste Privilegien (privilegierte Befehle, etc.): BS Kern
  - Stufe 1: BS Treiber
  - Stufe 2: BS Erweiterungen
  - Stufe 3: Benutzerprogramme
  - Speicherverwaltung kann nur in Stufe 0 konfiguriert werden
- Segmentselektoren enthalten Privlegierungsstufe
  - Stufe des Codesegments entscheidet über Zugriffserlaubnis
- Segmentselektoren werden als Indizes interpretiert
  - Tabellen von Segmentdeskriptoren
    - Globale Deskriptor Tabelle
    - Lokale Deskriptor Tabelle

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

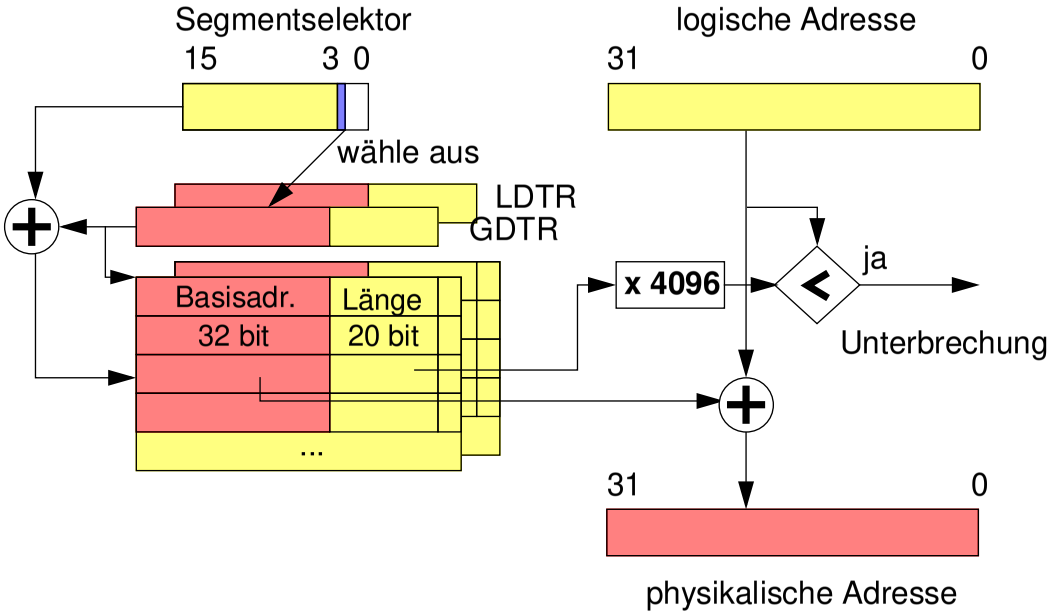
4.2 Protected Mode Adressierung (2)

- Deskriptortabelle
  - enthält bis zu 8192 Segmentdeskriptoren
  - Inhalt des Segmentdeskriptors:
    - physikalische Basisadresse
    - Längenangabe
    - Granularität (Angaben für Bytes oder Seiten)
    - Präsenzbit
    - Privilegierungsstufe
  - globale Deskriptortabelle für alle Prozesse zugänglich (Register GDTR)
  - lokale Deskriptortabelle pro Prozess möglich
    (Register LDTR gehört zum Prozesskontext)

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

4.3 Adressberechnung bei Segmentierung

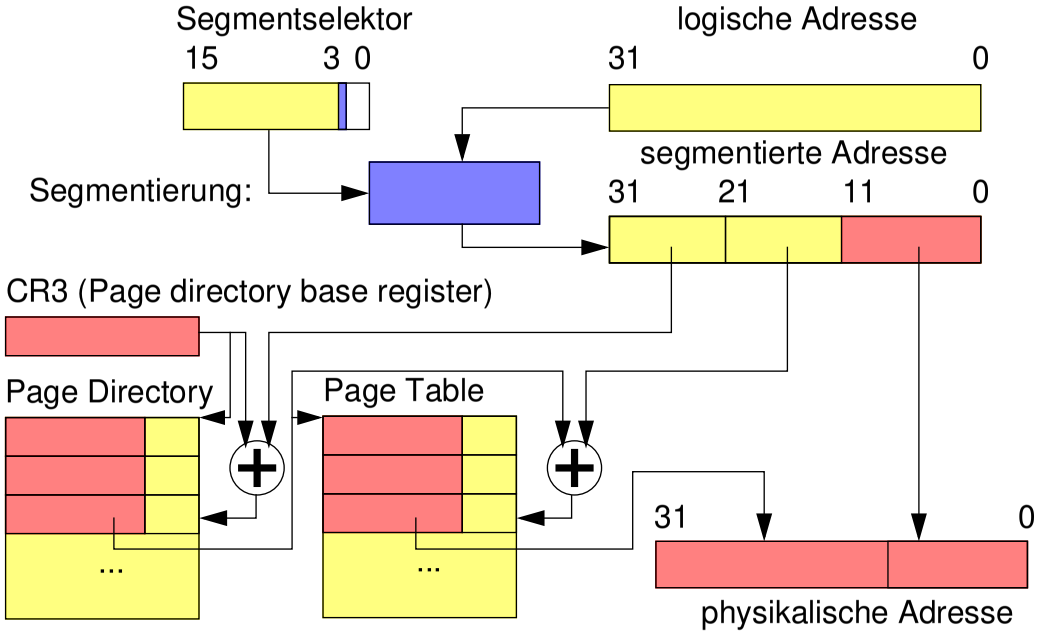
- Verwendung der Protected mode Adressierung



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

4.4 Adressberechnung bei Paging

- Seitenadressierung wird der Segmentierung nachgeschaltet



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

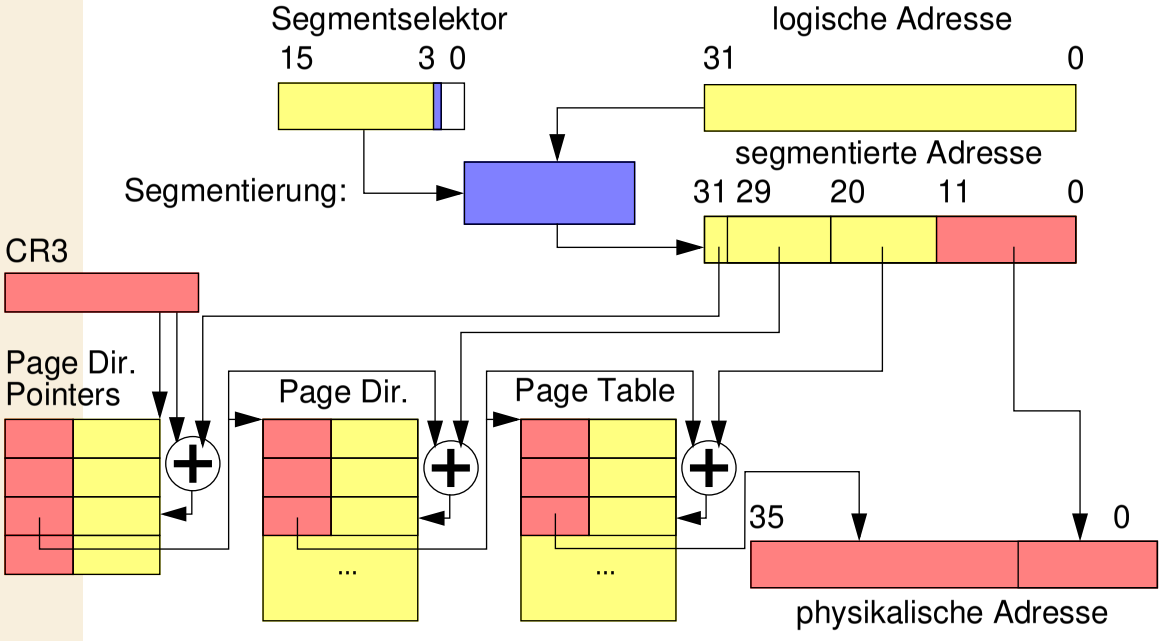
4.4 Adressberechnung bei Paging (2)

- Zweistufige Seitenadressierung
  - Directory — Page table
  - Seitengröße fest auf 4096 Bytes
- Inhalt des Seitendeskriptor
  - Kacheladresse
  - Dirty Bit: Seite wurde beschrieben
  - Access Bit: Seite wurde gelesen oder geschrieben
  - Schreibschutz: Seite nur lesbar
  - Präsenzbit: Seite ausgelagert (31 Bits für BS-Informationen nutzbar)
  - Kontrolle des Prozessorcaches
- Getrennte TLBs für Codesegment und Datensegmente
  - 64 Einträge für Datenseiten; 32 Einträge für Codeseiten

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

4.5 Physical-Address-Extension (PAE)

- Nachgeschaltete dreistufige Seitenadressierung



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

4.5 Physical-Address-Extension (PAE) (2)

- Ab Pentium Pro
  - vierelementige Tabelle von Page-Directory-Pointers
  - 24 statt 20 Bit breite physikalische Adressumsetzung für den Seitenanfang
  - 64 Bit statt 32 Bit breite Tabelleneinträge
  - spezieller Chipsatz erforderlich
- Adressierbarer Hauptspeicher von 64 GByte

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

5 Gemeinsamer Speicher (*Shared Memory*)

- Speicher, der mehreren Prozessen zur Verfügung steht
  - gemeinsame Segmente (gleiche Einträge in verschiedenen Segmenttabellen)
  - gemeinsame Seiten (gleiche Einträge in verschiedenen SKTs)
  - gemeinsame Seitenbereiche (gemeinsames Nutzen einer SKT bei mehrstufigen Tabellen)
- Gemeinsamer Speicher wird beispielsweise benutzt für
  - Kommunikation zwischen Prozessen
  - gemeinsame Befehlssegmente

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

5 Gemeinsamer Speicher (2)

- Systemaufrufe unter Solaris 2.5
  - Erzeugen bzw. Holen eines gemeinsamen Speichersegments

```
int shmget( key_t key, int size, int shmflg );
```

  - Einblenden und Ausblenden des Segments in den Speicher

```
void *shmat( int shmid, void *shmaddr, int shmflg );
int shmdt( void *shmaddr );
```

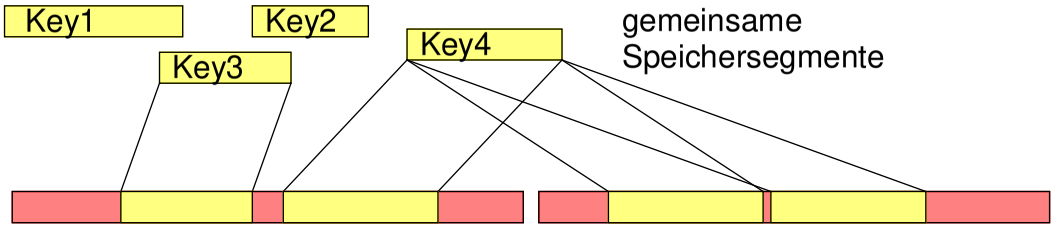
  - Kontrolloperation

```
int shmctl( int shmid, int cmd, struct shmid_ds *buf );
```


© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

5 Gemeinsamer Speicher (3)

- Prinzip der **shm*** Operationen




```
id1= shmget( Key3, ...);
shmat( id1, NULL, ...);
id2= shmget( Key4, ...);
shmat( id2, NULL, ...);
```

```
id1= shmget( Key4, ...);
shmat( id1, NULL, ...);
shmat( id1, NULL, ...);
```


© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

5 Gemeinsamer Speicher (4)

- Verwendung des Keys
  - Alle Prozesse, die auf ein Speichersegment zugreifen wollen, müssen den Key kennen
  - Keys sind eindeutig innerhalb eines (Betriebs-)Systems
  - Ist ein Key bereits vergeben, kann kein Segment mit gleichem Key erzeugt werden
  - Ist ein Key bekannt, kann auf das Segment zugegriffen werden
    - gesetzte Zugriffsberechtigungen werden allerdings beachtet
  - Es können Segmente ohne Key erzeugt werden (private Segmente)
- Keys werden benutzt für:
  - Queues
  - Semaphore
  - Shared memory segments

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

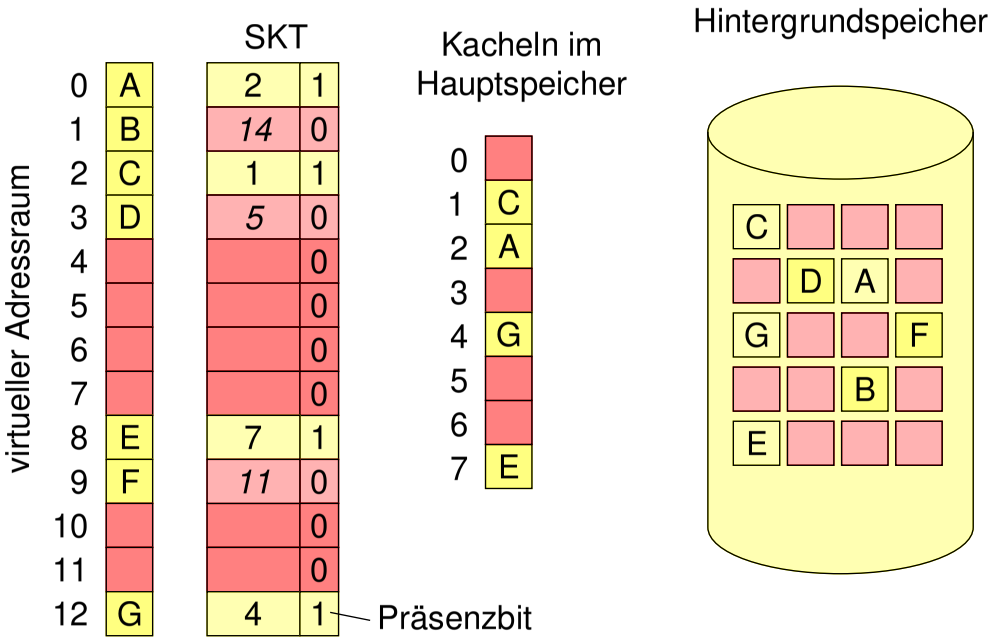
6 Virtueller Speicher

- Entkoppelung des Speicherbedarfs vom verfügbaren Hauptspeicher
  - Prozesse benötigen nicht alle Speicherstellen gleich häufig
    - bestimmte Befehle werden selten oder gar nicht benutzt (z.B. Fehlerbehandlungen)
    - bestimmte Datenstrukturen werden nicht voll belegt
  - Prozesse benötigen evtl. mehr Speicher als Hauptspeicher vorhanden
- Idee
  - Vortäuschen eines großen Hauptspeichers
  - Einblenden benötiger Speicherbereiche
  - Abfangen von Zugriffen auf nicht-eingeblendete Bereiche
  - Bereitstellen der benötigen Bereiche auf Anforderung
  - Auslagern nicht-benötigter Bereiche

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

6.1 Demand Paging

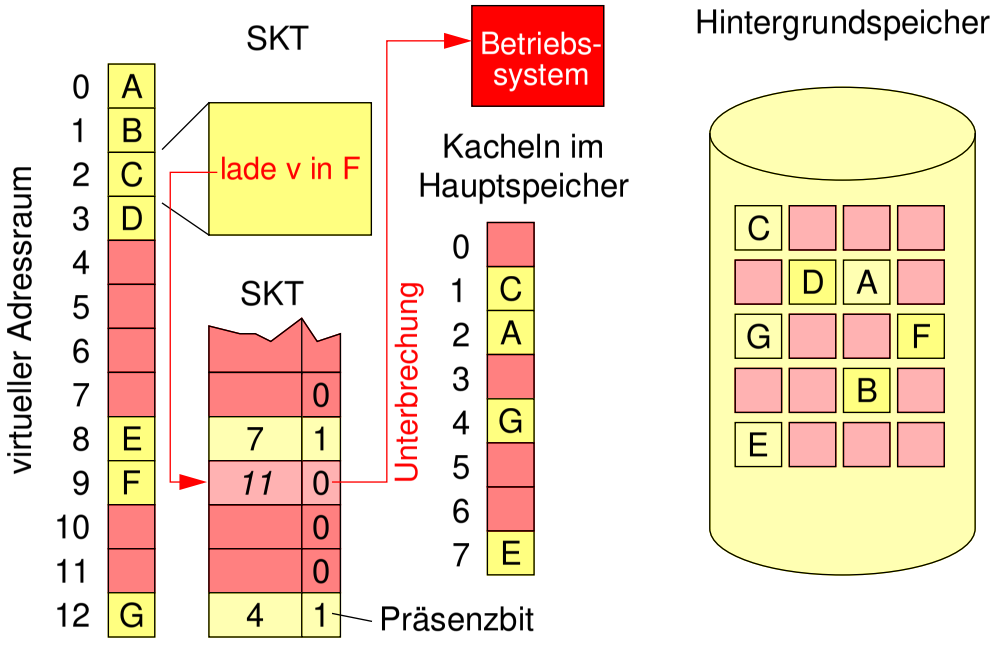
- Bereitstellen von Seiten auf Anforderung



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

6.1 Demand Paging (2)

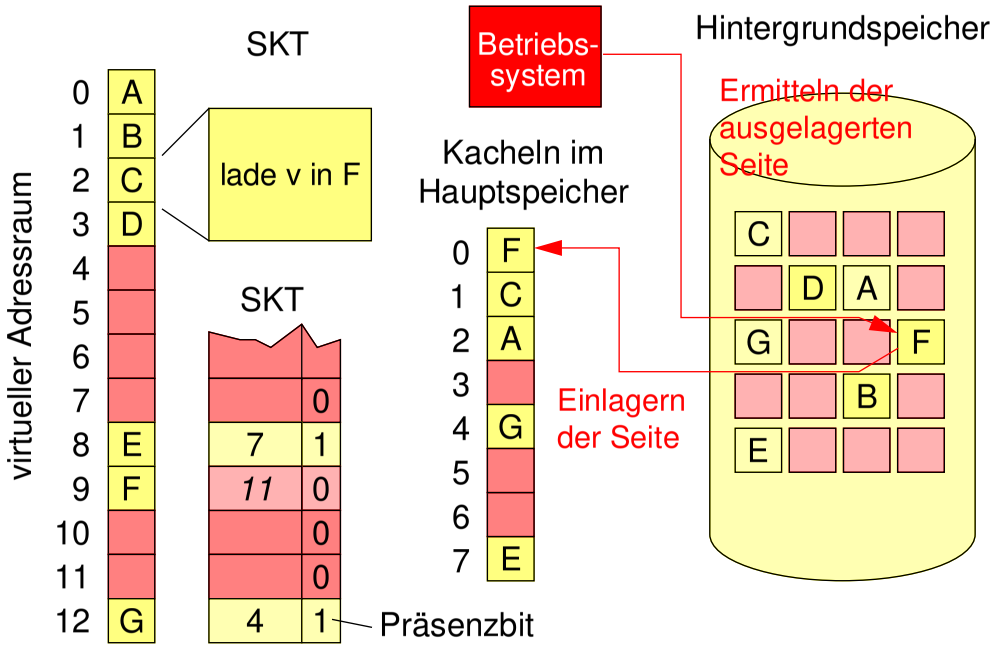
- Reaktion auf Seitenfehler



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

6.1 Demand Paging (3)

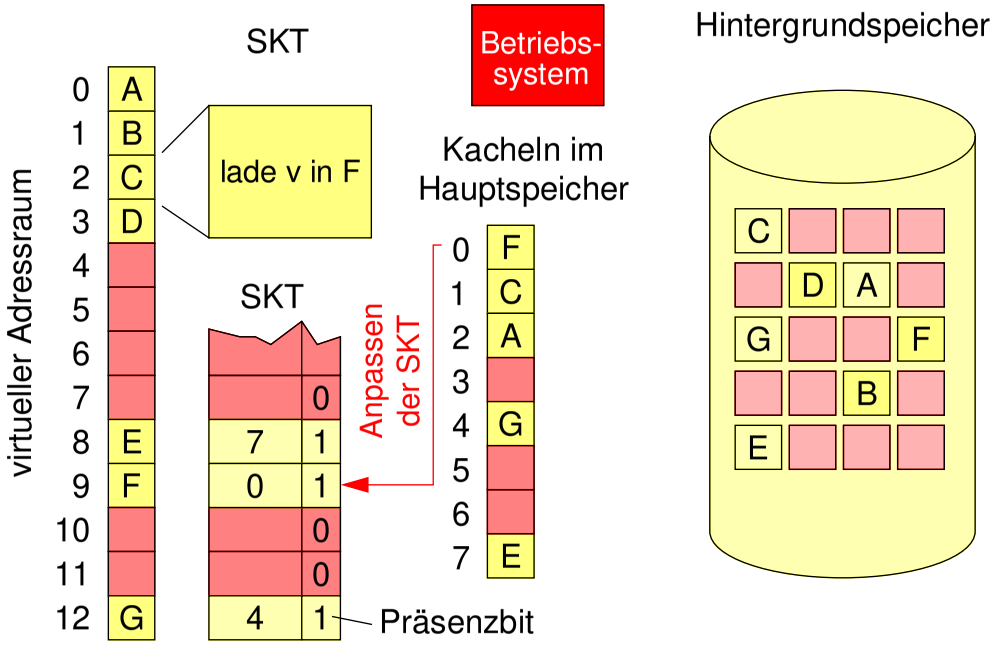
- Reaktion auf Seitenfehler



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

6.1 Demand Paging (4)

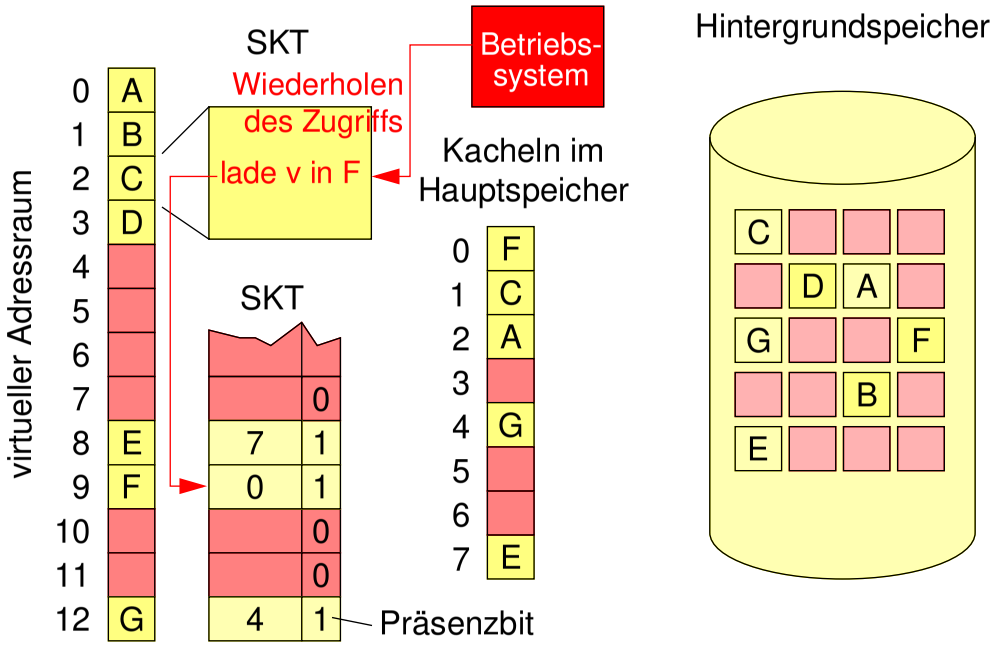
- Reaktion auf Seitenfehler



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

6.1 Demand Paging (5)

- Reaktion auf Seitenfehler



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

6.1 Demand Paging (6)

- Performanz von Demand paging
  - Keine Seitenfehler
    - effektive Zugriffszeit zw. 10 und 200 Nanosekunden
  - Mit Seitenfehler
    - p sei Wahrscheinlichkeit für Seitenfehler; p nahe Null
    - Annahme: Zeit zum Einlagern einer Seite vom Hintergrundspeicher gleich 25 Millisekunden (8 ms Latenz, 15 ms Positionierzeit, 1 ms Übertragungszeit)
    - Annahme: normale Zugriffszeit 100 ns
    - Effektive Zugriffszeit:
      $(1 - p) \times 100 + p \times 25000000 = 100 + 24999900 \times p$
- Seitenfehler müssen so niedrig wie möglich gehalten werden
- Abwandlung: *Demand zero* für nicht initialisierte Daten

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

6.2 Seitenersetzung

- Was tun, wenn keine freie Kachel vorhanden?
  - Eine Seite muss verdrängt werden, um Platz für neue Seite zu schaffen!
  - Auswahl von Seiten, die nicht geändert wurden (*Dirty bit* in der SKT)
  - Verdrängung erfordert Auslagerung, falls Seite geändert wurde
- Vorgang:
  - Seitenfehler *(Page fault)*: Unterbrechung
  - Auslagern einer Seite, falls keine freie Kachel verfügbar
  - Einlagern der benötigten Seite
  - Wiederholung des Zugriffs
- Problem
  - Welche Seite soll ausgewählt werden?

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7 Ersetzungsstrategien

- Betrachtung von Ersetzungsstrategien und deren Wirkung auf Referenzfolgen
- Referenzfolge
  - Folge von Seitennummern, die das Speicherzugriffsverhalten eines Prozesses abbildet
  - Ermittlung von Referenzfolgen z.B. durch Aufzeichnung der zugegriffenen Adressen
    - Reduktion der aufgezeichneten Sequenz auf Seitennummern
    - Zusammenfassung von unmittelbar hintereinanderstehenden Zugriffen auf die gleiche Seite
  - Beispiel für eine Referenzfolge: 1, 2, 3, 4, 1, 2, 5, 1, 2, 3, 4, 5

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.1 First-In, First-Out

- Älteste Seite wird ersetzt
- Notwendige Zustände:
  - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jede Kachel
- Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1											
	Kachel 2												
	Kachel 3												
Kontrollzustände (Alter pro Kachel)	Kachel 1	0											
	Kachel 2	>											
	Kachel 3	>											

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.1 First-In, First-Out

- Älteste Seite wird ersetzt
- Notwendige Zustände:
  - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jede Kachel
- Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1										
	Kachel 2		2										
	Kachel 3												
Kontrollzustände (Alter pro Kachel)	Kachel 1	0	1										
	Kachel 2	>	0										
	Kachel 3	>	>										

Systemprogrammierung I
E – 59
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.1 First-In, First-Out

- Älteste Seite wird ersetzt
- Notwendige Zustände:
  - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jede Kachel
- Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1									
	Kachel 2		2	2									
	Kachel 3			3									
Kontrollzustände (Alter pro Kachel)	Kachel 1	0	1	2									
	Kachel 2	>	0	1									
	Kachel 3	>	>	0									

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.1 First-In, First-Out

- Älteste Seite wird ersetzt
- Notwendige Zustände:
  - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jede Kachel
- Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4								
	Kachel 2		2	2	2								
	Kachel 3			3	3								
Kontrollzustände (Alter pro Kachel)	Kachel 1	0	1	2	0								
	Kachel 2	>	0	1	2								
	Kachel 3	>	>	0	1								

Systemprogrammierung I
E – 59
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.1 First-In, First-Out

- Älteste Seite wird ersetzt
- Notwendige Zustände:
  - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jede Kachel
- Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4	4							
	Kachel 2		2	2	2	1							
	Kachel 3			3	3	3							
Kontrollzustände (Alter pro Kachel)	Kachel 1	0	1	2	0	1							
	Kachel 2	>	0	1	2	0							
	Kachel 3	>	>	0	1	2							

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.1 First-In, First-Out

- Älteste Seite wird ersetzt
- Notwendige Zustände:
  - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jede Kachel
- Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4	4	4						
	Kachel 2		2	2	2	1	1						
	Kachel 3			3	3	3	2						
Kontrollzustände (Alter pro Kachel)	Kachel 1	0	1	2	0	1	2						
	Kachel 2	>	0	1	2	0	1						
	Kachel 3	>	>	0	1	2	0						

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.1 First-In, First-Out

- Älteste Seite wird ersetzt
- Notwendige Zustände:
  - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jede Kachel
- Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4	4	4	5					
	Kachel 2		2	2	2	1	1	1					
	Kachel 3			3	3	3	2	2					
Kontrollzustände (Alter pro Kachel)	Kachel 1	0	1	2	0	1	2	0					
	Kachel 2	>	0	1	2	0	1	2					
	Kachel 3	>	>	0	1	2	0	1					

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.1 First-In, First-Out

- Älteste Seite wird ersetzt
- Notwendige Zustände:
  - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jede Kachel
- Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4	4	4	5	5				
	Kachel 2		2	2	2	1	1	1	1				
	Kachel 3			3	3	3	2	2	2				
Kontrollzustände (Alter pro Kachel)	Kachel 1	0	1	2	0	1	2	0	1				
	Kachel 2	>	0	1	2	0	1	2	3				
	Kachel 3	>	>	0	1	2	0	1	2				

Systemprogrammierung I
E – 59
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.1 First-In, First-Out

- Älteste Seite wird ersetzt
- Notwendige Zustände:
  - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jede Kachel
- Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4	4	4	5	5	5			
	Kachel 2		2	2	2	1	1	1	1	1			
	Kachel 3			3	3	3	2	2	2	2			
Kontrollzustände (Alter pro Kachel)	Kachel 1	0	1	2	0	1	2	0	1	2			
	Kachel 2	>	0	1	2	0	1	2	3	4			
	Kachel 3	>	>	0	1	2	0	1	2	3			

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.1 First-In, First-Out

- Älteste Seite wird ersetzt
- Notwendige Zustände:
  - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jede Kachel
- Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4	4	4	5	5	5	5		
	Kachel 2		2	2	2	1	1	1	1	1	3		
	Kachel 3			3	3	3	2	2	2	2	2		
Kontrollzustände (Alter pro Kachel)	Kachel 1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	3		
	Kachel 2	>	0	1	2	0	1	2	3	4	0		
	Kachel 3	>	>	0	1	2	0	1	2	3	4		

Systemprogrammierung I
E – 59
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.1 First-In, First-Out

- Älteste Seite wird ersetzt
- Notwendige Zustände:
  - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jede Kachel
- Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4	4	4	5	5	5	5	5	
	Kachel 2		2	2	2	1	1	1	1	1	3	3	
	Kachel 3			3	3	3	2	2	2	2	2	4	
Kontrollzustände (Alter pro Kachel)	Kachel 1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	3	4	
	Kachel 2	>	0	1	2	0	1	2	3	4	0	1	
	Kachel 3	>	>	0	1	2	0	1	2	3	4	0	

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.1 First-In, First-Out

- Älteste Seite wird ersetzt
- Notwendige Zustände:
  - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jede Kachel
- Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4	4	4	5	5	5	5	5	5
	Kachel 2		2	2	2	1	1	1	1	1	3	3	3
	Kachel 3			3	3	3	2	2	2	2	2	4	4
Kontrollzustände (Alter pro Kachel)	Kachel 1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	3	4	5
	Kachel 2	>	0	1	2	0	1	2	3	4	0	1	2
	Kachel 3	>	>	0	1	2	0	1	2	3	4	0	1

Systemprogrammierung I
E – 59
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.1 First-In, First-Out (2)

- Größerer Hauptspeicher mit 4 Kacheln (10 Einlagerungen)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	5	4	4
	Kachel 2		2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	5
	Kachel 3			3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
	Kachel 4				4	4	4	4	4	4	3	3	3
Kontrollzustände (Alter pro Kachel)	Kachel 1	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	0	1
	Kachel 2	>	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	0
	Kachel 3	>	>	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3
	Kachel 4	>	>	>	0	1	2	3	4	5	0	1	2

- FIFO Anomalie (Belady's Anomalie, 1969)

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.2 Optimale Ersetzungsstrategie

- Vorwärtsabstand
  - ◆ Zeitdauer bis zum nächsten Zugriff auf die entsprechende Seite
- Strategie B_0 (OPT oder MIN) ist optimal (bei fester Kachelmenge): minimale Anzahl von Einlagerungen/Ersetzungen (hier 7)
  - ◆ „Ersetze immer die Seite mit dem größten Vorwärtsabstand!“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1											
	Kachel 2												
	Kachel 3												
Kontrollzustände (Vorwärts-abstand)	Kachel 1	4											
	Kachel 2	>											
	Kachel 3	>											

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.2 Optimale Ersetzungsstrategie

- Vorwärtsabstand
  - ◆ Zeitdauer bis zum nächsten Zugriff auf die entsprechende Seite
- Strategie B_0 (OPT oder MIN) ist optimal (bei fester Kachelmenge): minimale Anzahl von Einlagerungen/Ersetzungen (hier 7)
  - ◆ „Ersetze immer die Seite mit dem größten Vorwärtsabstand!“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1										
	Kachel 2		2										
	Kachel 3												
Kontrollzustände (Vorwärts-abstand)	Kachel 1	4	3										
	Kachel 2	>	4										
	Kachel 3	>	>										

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.2 Optimale Ersetzungsstrategie

- Vorwärtsabstand
  - ◆ Zeitdauer bis zum nächsten Zugriff auf die entsprechende Seite
- Strategie B_0 (OPT oder MIN) ist optimal (bei fester Kachelmenge): minimale Anzahl von Einlagerungen/Ersetzungen (hier 7)
  - ◆ „Ersetze immer die Seite mit dem größten Vorwärtsabstand!“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1									
	Kachel 2		2	2									
	Kachel 3			3									
Kontrollzustände (Vorwärts-abstand)	Kachel 1	4	3	2									
	Kachel 2	>	4	3									
	Kachel 3	>	>	7									

Systemprogrammierung I
E – 61
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.2 Optimale Ersetzungsstrategie

- Vorwärtsabstand
  - ◆ Zeitdauer bis zum nächsten Zugriff auf die entsprechende Seite
- Strategie B_0 (OPT oder MIN) ist optimal (bei fester Kachelmenge): minimale Anzahl von Einlagerungen/Ersetzungen (hier 7)
  - ◆ „Ersetze immer die Seite mit dem größten Vorwärtsabstand!“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	1								
	Kachel 2		2	2	2								
	Kachel 3			3	4								
Kontrollzustände (Vorwärts-abstand)	Kachel 1	4	3	2	1								
	Kachel 2	>	4	3	2								
	Kachel 3	>	>	7	7								

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.2 Optimale Ersetzungsstrategie

- Vorwärtsabstand
  - ◆ Zeitdauer bis zum nächsten Zugriff auf die entsprechende Seite
- Strategie B_0 (OPT oder MIN) ist optimal (bei fester Kachelmenge): minimale Anzahl von Einlagerungen/Ersetzungen (hier 7)
  - ◆ „Ersetze immer die Seite mit dem größten Vorwärtsabstand!“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	1	1							
	Kachel 2		2	2	2	2							
	Kachel 3			3	4	4							
Kontrollzustände (Vorwärts-abstand)	Kachel 1	4	3	2	1	3							
	Kachel 2	>	4	3	2	1							
	Kachel 3	>	>	7	7	6							

Systemprogrammierung I
E – 61
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.2 Optimale Ersetzungsstrategie

- Vorwärtsabstand
  - ◆ Zeitdauer bis zum nächsten Zugriff auf die entsprechende Seite
- Strategie B_0 (OPT oder MIN) ist optimal (bei fester Kachelmenge): minimale Anzahl von Einlagerungen/Ersetzungen (hier 7)
  - ◆ „Ersetze immer die Seite mit dem größten Vorwärtsabstand!“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	1	1	1						
	Kachel 2		2	2	2	2	2						
	Kachel 3			3	4	4	4						
Kontrollzustände (Vorwärts-abstand)	Kachel 1	4	3	2	1	3	2						
	Kachel 2	>	4	3	2	1	3						
	Kachel 3	>	>	7	7	6	5						

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.2 Optimale Ersetzungsstrategie

- Vorwärtsabstand
  - ◆ Zeitdauer bis zum nächsten Zugriff auf die entsprechende Seite
- Strategie B_0 (OPT oder MIN) ist optimal (bei fester Kachelmenge): minimale Anzahl von Einlagerungen/Ersetzungen (hier 7)
  - ◆ „Ersetze immer die Seite mit dem größten Vorwärtsabstand!“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	1	1	1	1					
	Kachel 2		2	2	2	2	2	2					
	Kachel 3			3	4	4	4	5					
Kontrollzustände (Vorwärts-abstand)	Kachel 1	4	3	2	1	3	2	1					
	Kachel 2	>	4	3	2	1	3	2					
	Kachel 3	>	>	7	7	6	5	5					

Systemprogrammierung I
E – 61
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.2 Optimale Ersetzungsstrategie

- Vorwärtsabstand
  - Zeitdauer bis zum nächsten Zugriff auf die entsprechende Seite
- Strategie B_0 (OPT oder MIN) ist optimal (bei fester Kachelmenge): minimale Anzahl von Einlagerungen/Ersetzungen (hier 7)
  - „Ersetze immer die Seite mit dem größten Vorwärtsabstand!“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	1	1	1	1	1				
	Kachel 2		2	2	2	2	2	2	2				
	Kachel 3			3	4	4	4	5	5				
Kontrollzustände (Vorwärts-abstand)	Kachel 1	4	3	2	1	3	2	1	>				
	Kachel 2	>	4	3	2	1	3	2	1				
	Kachel 3	>	>	7	7	6	5	5	4				

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.2 Optimale Ersetzungsstrategie

- Vorwärtsabstand
  - Zeitdauer bis zum nächsten Zugriff auf die entsprechende Seite
- Strategie B_0 (OPT oder MIN) ist optimal (bei fester Kachelmenge): minimale Anzahl von Einlagerungen/Ersetzungen (hier 7)
  - „Ersetze immer die Seite mit dem größten Vorwärtsabstand!“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	Kachel 2		2	2	2	2	2	2	2	2			
	Kachel 3			3	4	4	4	5	5	5			
Kontrollzustände (Vorwärts-abstand)	Kachel 1	4	3	2	1	3	2	1	>	>			
	Kachel 2	>	4	3	2	1	3	2	1	>			
	Kachel 3	>	>	7	7	6	5	5	4	3			

Systemprogrammierung I
E – 61
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.2 Optimale Ersetzungsstrategie

- Vorwärtsabstand
  - Zeitdauer bis zum nächsten Zugriff auf die entsprechende Seite
- Strategie B_0 (OPT oder MIN) ist optimal (bei fester Kachelmenge): minimale Anzahl von Einlagerungen/Ersetzungen (hier 7)
  - „Ersetze immer die Seite mit dem größten Vorwärtsabstand!“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3		
	Kachel 2		2	2	2	2	2	2	2	2	2		
	Kachel 3			3	4	4	4	5	5	5	5		
Kontrollzustände (Vorwärts-abstand)	Kachel 1	4	3	2	1	3	2	1	>	>	>		
	Kachel 2	>	4	3	2	1	3	2	1	>	>		
	Kachel 3	>	>	7	7	6	5	5	4	3	2		

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.2 Optimale Ersetzungsstrategie

- Vorwärtsabstand
  - Zeitdauer bis zum nächsten Zugriff auf die entsprechende Seite
- Strategie B_0 (OPT oder MIN) ist optimal (bei fester Kachelmenge): minimale Anzahl von Einlagerungen/Ersetzungen (hier 7)
  - „Ersetze immer die Seite mit dem größten Vorwärtsabstand!“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	4	
	Kachel 2		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
	Kachel 3			3	4	4	4	5	5	5	5	5	
Kontrollzustände (Vorwärts-abstand)	Kachel 1	4	3	2	1	3	2	1	>	>	>	>	
	Kachel 2	>	4	3	2	1	3	2	1	>	>	>	
	Kachel 3	>	>	7	7	6	5	5	4	3	2	1	

Systemprogrammierung I
E – 61
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.2 Optimale Ersetzungsstrategie

- Vorwärtsabstand
  - Zeitdauer bis zum nächsten Zugriff auf die entsprechende Seite
- Strategie B_0 (OPT oder MIN) ist optimal (bei fester Kachelmenge): minimale Anzahl von Einlagerungen/Ersetzungen (hier 7)
  - „Ersetze immer die Seite mit dem größten Vorwärtsabstand!“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	4	4
	Kachel 2		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Kachel 3			3	4	4	4	5	5	5	5	5	5
Kontrollzustände (Vorwärts-abstand)	Kachel 1	4	3	2	1	3	2	1	>	>	>	>	>
	Kachel 2	>	4	3	2	1	3	2	1	>	>	>	>
	Kachel 3	>	>	7	7	6	5	5	4	3	2	1	>

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.2 Optimale Ersetzungsstrategie (2)

- Vergrößerung des Hauptspeichers (4 Kacheln): 6 Einlagerungen

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	4
	Kachel 2		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Kachel 3			3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Kachel 4				4	4	4	5	5	5	5	5	5
Kontrollzustände (Vorwärts-abstand)	Kachel 1	4	3	2	1	3	2	1	>	>	>	>	>
	Kachel 2	>	4	3	2	1	3	2	1	>	>	>	>
	Kachel 3	>	>	7	6	5	4	3	2	1	>	>	>
	Kachel 4	>	>	>	7	6	5	5	4	3	2	1	>

- keine Anomalie

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.2 Optimale Ersetzungsstrategie (3)

- Implementierung von B_0 nahezu unmöglich
  - Referenzfolge müsste vorher bekannt sein
  - B_0 meist nur zum Vergleich von Strategien brauchbar
- Suche nach Strategien, die möglichst nahe an B_0 kommen
  - z.B. *Least recently used* (LRU)

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.3 Least Recently Used (LRU)

- Rückwärtsabstand
  - Zeitdauer, seit dem letzten Zugriff auf die Seite
- LRU Strategie (10 Einlagerungen)
  - „Ersetze die Seite mit dem größten Rückwärtsabstand !“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1											
	Kachel 2												
	Kachel 3												
Kontrollzustände (Rückwärts-abstand)	Kachel 1	0											
	Kachel 2	>											
	Kachel 3	>											

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.3 Least Recently Used (LRU)

- Rückwärtsabstand
  - ◆ Zeitdauer, seit dem letzten Zugriff auf die Seite
- LRU Strategie (10 Einlagerungen)
  - ◆ „Ersetze die Seite mit dem größten Rückwärtsabstand !“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1										
	Kachel 2		2										
	Kachel 3												
Kontrollzustände (Rückwärts-abstand)	Kachel 1	0	1										
	Kachel 2	>	0										
	Kachel 3	>	>										

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.3 Least Recently Used (LRU)

- Rückwärtsabstand
  - ◆ Zeitdauer, seit dem letzten Zugriff auf die Seite
- LRU Strategie (10 Einlagerungen)
  - ◆ „Ersetze die Seite mit dem größten Rückwärtsabstand !“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1									
	Kachel 2		2	2									
	Kachel 3			3									
Kontrollzustände (Rückwärts-abstand)	Kachel 1	0	1	2									
	Kachel 2	>	0	1									
	Kachel 3	>	>	0									

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.3 Least Recently Used (LRU)

- Rückwärtsabstand
  - ◆ Zeitdauer, seit dem letzten Zugriff auf die Seite
- LRU Strategie (10 Einlagerungen)
  - ◆ „Ersetze die Seite mit dem größten Rückwärtsabstand !“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4								
	Kachel 2		2	2	2								
	Kachel 3			3	3								
Kontrollzustände (Rückwärts-abstand)	Kachel 1	0	1	2	0								
	Kachel 2	>	0	1	2								
	Kachel 3	>	>	0	1								

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.3 Least Recently Used (LRU)

- Rückwärtsabstand
  - ◆ Zeitdauer, seit dem letzten Zugriff auf die Seite
- LRU Strategie (10 Einlagerungen)
  - ◆ „Ersetze die Seite mit dem größten Rückwärtsabstand !“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4	4							
	Kachel 2		2	2	2	1							
	Kachel 3			3	3	3							
Kontrollzustände (Rückwärts-abstand)	Kachel 1	0	1	2	0	1							
	Kachel 2	>	0	1	2	0							
	Kachel 3	>	>	0	1	2							

Systemprogrammierung I
E – 64
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.3 Least Recently Used (LRU)

- Rückwärtsabstand
  - ◆ Zeitdauer, seit dem letzten Zugriff auf die Seite
- LRU Strategie (10 Einlagerungen)
  - ◆ „Ersetze die Seite mit dem größten Rückwärtsabstand !“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4	4	4						
	Kachel 2		2	2	2	1	1						
	Kachel 3			3	3	3	2						
Kontrollzustände (Rückwärts-abstand)	Kachel 1	0	1	2	0	1	2						
	Kachel 2	>	0	1	2	0	1						
	Kachel 3	>	>	0	1	2	0						

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.3 Least Recently Used (LRU)

- Rückwärtsabstand
  - ◆ Zeitdauer, seit dem letzten Zugriff auf die Seite
- LRU Strategie (10 Einlagerungen)
  - ◆ „Ersetze die Seite mit dem größten Rückwärtsabstand !“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4	4	4	5					
	Kachel 2		2	2	2	1	1	1					
	Kachel 3			3	3	3	2	2					
Kontrollzustände (Rückwärts-abstand)	Kachel 1	0	1	2	0	1	2	0					
	Kachel 2	>	0	1	2	0	1	2					
	Kachel 3	>	>	0	1	2	0	1					

Systemprogrammierung I
E – 64
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.3 Least Recently Used (LRU)

- Rückwärtsabstand
  - ◆ Zeitdauer, seit dem letzten Zugriff auf die Seite
- LRU Strategie (10 Einlagerungen)
  - ◆ „Ersetze die Seite mit dem größten Rückwärtsabstand !“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4	4	4	5	5				
	Kachel 2		2	2	2	1	1	1	1				
	Kachel 3			3	3	3	2	2	2				
Kontrollzustände (Rückwärts-abstand)	Kachel 1	0	1	2	0	1	2	0	1				
	Kachel 2	>	0	1	2	0	1	2	0				
	Kachel 3	>	>	0	1	2	0	1	2				

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.3 Least Recently Used (LRU)

- Rückwärtsabstand
  - ◆ Zeitdauer, seit dem letzten Zugriff auf die Seite
- LRU Strategie (10 Einlagerungen)
  - ◆ „Ersetze die Seite mit dem größten Rückwärtsabstand !“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4	4	4	5	5	5			
	Kachel 2		2	2	2	1	1	1	1	1			
	Kachel 3			3	3	3	2	2	2	2			
Kontrollzustände (Rückwärts-abstand)	Kachel 1	0	1	2	0	1	2	0	1	2			
	Kachel 2	>	0	1	2	0	1	2	0	1			
	Kachel 3	>	>	0	1	2	0	1	2	0			

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.3 Least Recently Used (LRU)

- Rückwärtsabstand
  - ◆ Zeitdauer, seit dem letzten Zugriff auf die Seite
- LRU Strategie (10 Einlagerungen)
  - ◆ „Ersetze die Seite mit dem größten Rückwärtsabstand !“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4	4	4	5	5	5	3		
	Kachel 2		2	2	2	1	1	1	1	1	1		
	Kachel 3			3	3	3	2	2	2	2	2		
Kontrollzustände (Rückwärts-abstand)	Kachel 1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0		
	Kachel 2	>	0	1	2	0	1	2	0	1	2		
	Kachel 3	>	>	0	1	2	0	1	2	0	1		

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.3 Least Recently Used (LRU)

- Rückwärtsabstand
  - ◆ Zeitdauer, seit dem letzten Zugriff auf die Seite
- LRU Strategie (10 Einlagerungen)
  - ◆ „Ersetze die Seite mit dem größten Rückwärtsabstand !“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4	4	4	5	5	5	3	3	
	Kachel 2		2	2	2	1	1	1	1	1	1	4	
	Kachel 3			3	3	3	2	2	2	2	2	2	
Kontrollzustände (Rückwärts-abstand)	Kachel 1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	
	Kachel 2	>	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	
	Kachel 3	>	>	0	1	2	0	1	2	0	1	2	

Systemprogrammierung I
E – 64
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.3 Least Recently Used (LRU)

- Rückwärtsabstand
  - ◆ Zeitdauer, seit dem letzten Zugriff auf die Seite
- LRU Strategie (10 Einlagerungen)
  - ◆ „Ersetze die Seite mit dem größten Rückwärtsabstand !“

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4	4	4	5	5	5	3	3	3
	Kachel 2		2	2	2	1	1	1	1	1	1	4	4
	Kachel 3			3	3	3	2	2	2	2	2	2	5
Kontrollzustände (Rückwärts-abstand)	Kachel 1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2
	Kachel 2	>	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1
	Kachel 3	>	>	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.3 Least Recently Used (2)

- Vergrößerung des Hauptspeichers (4 Kacheln): 8 Einlagerungen

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5
	Kachel 2		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Kachel 3			3	3	3	3	5	5	5	5	4	4
	Kachel 4				4	4	4	4	4	4	3	3	3
Kontrollzustände (Rückwärts-abstand)	Kachel 1	0	1	2	3	0	1	2	0	1	2	3	0
	Kachel 2	>	0	1	2	3	0	1	2	0	1	2	3
	Kachel 3	>	>	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1
	Kachel 4	>	>	>	0	1	2	3	4	5	0	1	2

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.3 Least Recently Used (3)

- Keine Anomalie
  - Allgemein gilt: Es gibt eine Klasse von Algorithmen (Stack-Algorithmen), bei denen keine Anomalie auftritt:
    - Bei Stack-Algorithmen ist bei n Kacheln zu jedem Zeitpunkt eine Untermenge der Seiten eingelagert, die bei n+1 Kacheln zum gleichen Zeitpunkt eingelagert wären!
    - LRU: Es sind immer die letzten n benutzten Seiten eingelagert
    - B_0: Es sind die n bereits benutzten Seiten eingelagert, die als nächstes zugegriffen werden
- Problem
  - Implementierung von LRU nicht ohne Hardwareunterstützung möglich
  - Es muss jeder Speicherzugriff berücksichtigt werden

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.3 Least Recently Used (4)

- Hardwareunterstützung durch Zähler
  - CPU besitzt einen Zähler, der bei jedem Speicherzugriff erhöht wird (inkrementiert wird)
  - bei jedem Zugriff wird der aktuelle Zählerwert in den jeweiligen Seitendeskriptor geschrieben
  - Auswahl der Seite mit dem kleinsten Zählerstand
- Aufwendige Implementierung
  - viele zusätzliche Speicherzugriffe

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

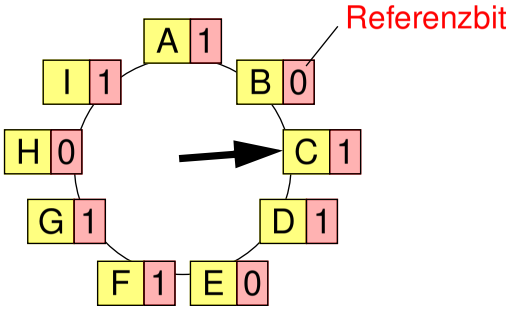
7.4 Second Chance (Clock)

- Einsatz von Referenzbits
  - Referenzbit im Seitendeskriptor wird automatisch durch Hardware gesetzt, wenn die Seite zugegriffen wird
    - einfacher zu implementieren
    - weniger zusätzliche Speicherzugriffe
    - moderne Prozessoren bzw. MMUs unterstützen Referenzbits (z.B. Pentium: *Access bit*)
- Ziel: Annäherung von LRU
  - das Referenzbit wird zunächst auf 0 gesetzt
  - wird eine Opferseite gesucht, so werden die Kacheln reihum inspiziert
  - ist das Referenzbit 1, so wird es auf 0 gesetzt (zweite Chance)
  - ist das Referenzbit 0, so wird die Seite ersetzt

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.4 Second Chance (2)

- Implementierung mit umlaufendem Zeiger *(Clock)*

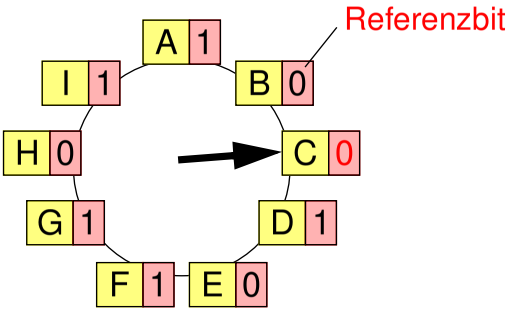


  - an der Zeigerposition wird Referenzbit getestet
    - falls Referenzbit eins, wird Bit gelöscht
    - falls Referenzbit gleich Null, wurde ersetzbare Seite gefunden
    - Zeiger wird weitergestellt; falls keine Seite gefunden: Wiederholung
  - falls alle Referenzbits auf 1 stehen, wird Second chance zu FIFO

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.4 Second Chance (2)

- Implementierung mit umlaufendem Zeiger *(Clock)*

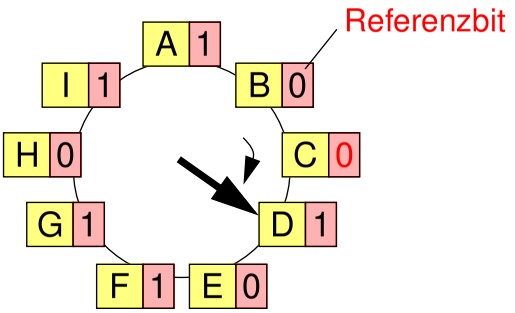


- ◆ an der Zeigerposition wird Referenzbit getestet
  - falls Referenzbit eins, wird Bit gelöscht
  - falls Referenzbit gleich Null, wurde ersetzbare Seite gefunden
  - Zeiger wird weitergestellt; falls keine Seite gefunden: Wiederholung
- ◆ falls alle Referenzbits auf 1 stehen, wird Second chance zu FIFO

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.4 Second Chance (2)

- Implementierung mit umlaufendem Zeiger *(Clock)*

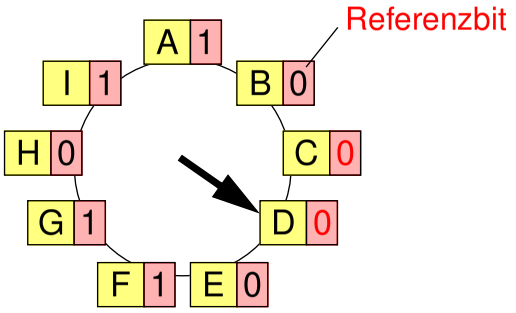


- ◆ an der Zeigerposition wird Referenzbit getestet
  - falls Referenzbit eins, wird Bit gelöscht
  - falls Referenzbit gleich Null, wurde ersetzbare Seite gefunden
  - Zeiger wird weitergestellt; falls keine Seite gefunden: Wiederholung
- ◆ falls alle Referenzbits auf 1 stehen, wird Second chance zu FIFO

Systemprogrammierung I
E – 69
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.4 Second Chance (2)

- Implementierung mit umlaufendem Zeiger *(Clock)*

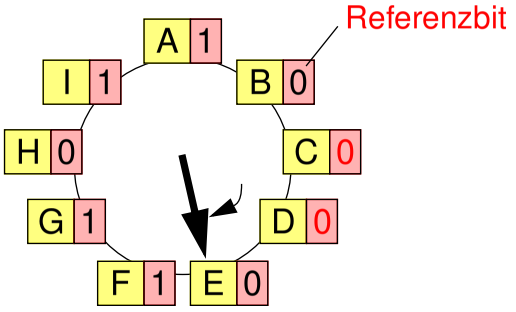


- ◆ an der Zeigerposition wird Referenzbit getestet
  - falls Referenzbit eins, wird Bit gelöscht
  - falls Referenzbit gleich Null, wurde ersetzbare Seite gefunden
  - Zeiger wird weitergestellt; falls keine Seite gefunden: Wiederholung
- ◆ falls alle Referenzbits auf 1 stehen, wird Second chance zu FIFO

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.4 Second Chance (2)

- Implementierung mit umlaufendem Zeiger *(Clock)*

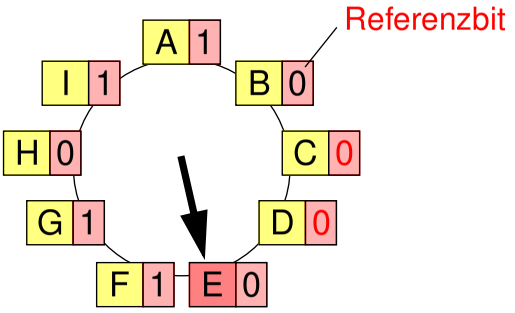


- ◆ an der Zeigerposition wird Referenzbit getestet
  - falls Referenzbit eins, wird Bit gelöscht
  - falls Referenzbit gleich Null, wurde ersetzbare Seite gefunden
  - Zeiger wird weitergestellt; falls keine Seite gefunden: Wiederholung
- ◆ falls alle Referenzbits auf 1 stehen, wird Second chance zu FIFO

Systemprogrammierung I
E – 69
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.4 Second Chance (2)

- Implementierung mit umlaufendem Zeiger *(Clock)*

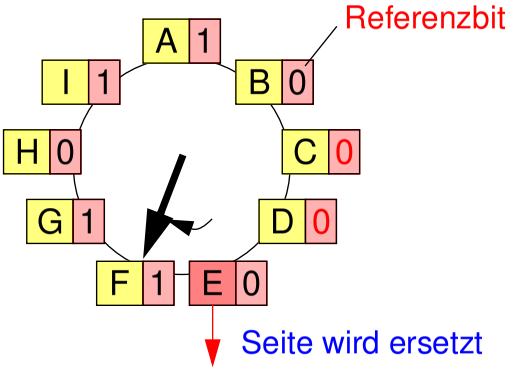


- ◆ an der Zeigerposition wird Referenzbit getestet
  - falls Referenzbit eins, wird Bit gelöscht
  - falls Referenzbit gleich Null, wurde ersetzbare Seite gefunden
  - Zeiger wird weitergestellt; falls keine Seite gefunden: Wiederholung
- ◆ falls alle Referenzbits auf 1 stehen, wird Second chance zu FIFO

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.4 Second Chance (2)

- Implementierung mit umlaufendem Zeiger *(Clock)*



- ◆ an der Zeigerposition wird Referenzbit getestet
  - falls Referenzbit eins, wird Bit gelöscht
  - falls Referenzbit gleich Null, wurde ersetzbare Seite gefunden
  - Zeiger wird weitergestellt; falls keine Seite gefunden: Wiederholung
- ◆ falls alle Referenzbits auf 1 stehen, wird Second chance zu FIFO

Systemprogrammierung I
E – 69
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.4 Second Chance (3)

- Ablauf bei drei Kacheln (9 Einlagerungen)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	4	4	4	5	5	5	5	5	5
	Kachel 2		2	2	2	1	1	1	1	1	3	3	3
	Kachel 3			3	3	3	2	2	2	2	2	4	4
Kontroll-zustände (Referenzbits)	Kachel 1	1	1	**1**	1	1	**1**	1	1	1	0	**0**	**1**
	Kachel 2	**0**	1	1	**0**	1	1	**0**	**1**	**1**	1	1	1
	Kachel 3	0	**0**	1	0	**0**	1	0	0	1	**0**	1	1
	Umlaufzeiger	2	3	1	2	3	1	2	2	2	3	1	1

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.4 Second Chance (4)

- Vergrößerung des Hauptspeichers (4 Kacheln): 10 Einlagerungen

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Kachel 1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	5	4	4
	Kachel 2		2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	5
	Kachel 3			3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
	Kachel 4				4	4	4	4	4	4	3	3	3
Kontroll-zustände (Refernzbits)	Kachel 1	1	1	1	**1**	**1**	**1**	1	1	1	**1**	1	1
	Kachel 2	**0**	1	1	1	1	1	**0**	1	1	1	**0**	1
	Kachel 3	0	**0**	1	1	1	1	0	**0**	1	1	0	**0**
	Kachel 4	0	0	**0**	1	1	1	0	0	**0**	1	0	0
	Umlaufzeiger	2	3	4	1	1	1	2	3	4	1	2	3

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.4 Second Chance (5)

- Second chance zeigt FIFO Anomalie
  - Wenn alle Referenzbits gleich 1, wird nach FIFO entschieden
- Erweiterung
  - Modifikationsbit kann zusätzlich berücksichtigt werden *(Dirty bit)*
  - drei Klassen: (0,0), (1,0) und (1,1) mit (Referenzbit, Modifikationsbit)
  - Suche nach der niedrigsten Klasse (Einsatz im MacOS)

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.5 Freiseitenpuffer

- Statt eine Seite zu ersetzen wird permanent eine Menge freier Seiten gehalten
  - Auslagerung geschieht im „voraus“
  - Effizienter: Ersetzungszeit besteht im Wesentlichen nur aus Einlagerungszeit
- Behalten der Seitenzuordnung auch nach der Auslagerung
  - Wird die Seite doch noch benutzt bevor sie durch eine andere ersetzt wird, kann sie mit hoher Effizienz wiederverwendet werden.
  - Seite wird aus Freiseitepuffer ausgetragen und wieder dem entsprechenden Prozess zugeordnet.

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.6 Seitenanforderung

- Problem: Zuordnung der Kacheln zu mehreren Prozessen
- Begrenzungen
  - Maximale Seitenmenge: begrenzt durch Anzahl der Kacheln
  - Minimale Seitenmenge: abhängig von der Prozessorarchitektur
    - Mindestens die Anzahl von Seiten nötig, die theoretisch bei einem Maschinenbefehl benötigt werden
      (z.B. zwei Seiten für den Befehl, vier Seiten für die adressierten Daten)
- Gleiche Zuordnung
  - Anzahl der Prozesse bestimmt die Kachelmenge, die ein Prozess bekommt
- Größenabhängige Zuordnung
  - Größe des Programms fließt in die zugeteilte Kachelmenge ein

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

7.6 Seitenanforderung

- Globale und lokale Anforderung von Seiten
  - lokal: Prozess ersetzt nur immer seine eigenen Seiten
    - Seitenfehler-Verhalten liegt nur in der Verantwortung des Prozesses
  - global: Prozess ersetzt auch Seiten anderer Prozesse
    - bessere Effizienz, da ungenutzte Seiten von anderen Prozessen verwendet werden können

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

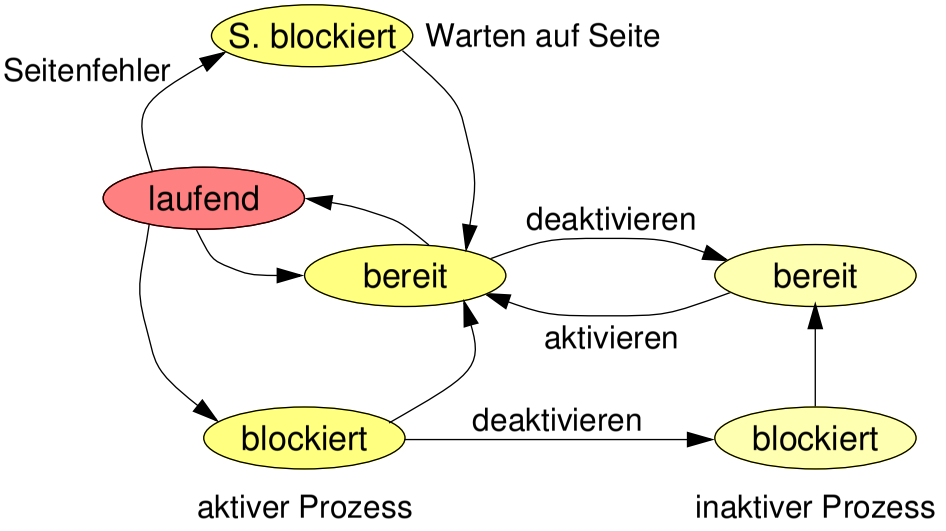
8 Seitenflattern *(Thrashing)*

- Ausgelagerte Seite wird gleich wieder angesprochen
  - Prozess verbringt mehr Zeit mit dem Warten auf das Beheben von Seitenfehler als mit der eigentlichen Ausführung
- Ursachen
  - Prozess ist nahe am Seitenminimum
  - zu viele Prozesse gleichzeitig im System
  - schlechte Ersetzungsstrategie
- ★ Lokale Seitenanforderung behebt Thrashing zwischen Prozessen
- ★ Zuteilung einer genügend großen Zahl von Kacheln behebt Thrashing innerhalb der Prozessseiten
  - Begrenzung der Prozessanzahl

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.1 Deaktivieren von Prozessen

- Einführung von „Superzuständen“



  - inaktiver Prozess benötigt keine Kacheln; Prozess ist vollständig ausgelagert (swapped out)

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

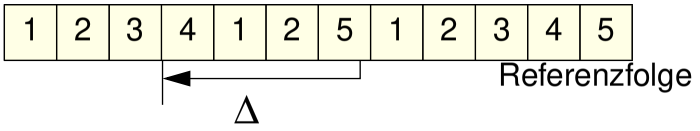
8.1 Deaktivieren von Prozessen (2)

- Sind zuviele Prozesse aktiv, werden welche deaktiviert
  - Kacheln teilen sich auf weniger Prozesse auf
  - Verbindung mit dem Scheduling nötig
    - Verhindern von Aushungerung
    - Erzielen kurzer Reaktionszeiten
  - guter Kandidat: Prozess mit wenigen Seiten im Hauptspeicher
    - geringe Latenz bei Wiedereinlagerung bzw.
      wenige Seitenfehler bei Aktivierung und Demand paging

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.2 Arbeitsmengenmodell

- Menge der Seiten, die ein Prozess wirklich braucht *(Working set)*
  - kann nur angenähert werden, da üblicherweise nicht vorhersehbar
- Annäherung durch Betrachten der letzten Δ Seiten, die angesprochen wurden
  - geeignete Wahl von Δ
    - zu groß: Überlappung von lokalen Zugriffsmustern zu klein:
      Arbeitsmenge enthält nicht alle nötigen Seiten



    - Hinweis: Δ > Arbeitsmenge, da Seiten in der Regel mehrfach hintereinander angesprochen werden

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.2 Arbeitsmengenmodell (2)

- Beispiel: Arbeitsmengen bei verschiedenen Δ

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
$\Delta = 3$	Seite 1	x	x	x		x	x	x	x	x	x		
	Seite 2		x	x	x		x	x	x	x	x	x	
	Seite 3			x	x	x					x	x	x
	Seite 4				x	x	x					x	x
	Seite 5							x	x	x			x
$\Delta = 4$	Seite 1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Seite 2		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Seite 3			x	x	x	x				x	x	x
	Seite 4				x	x	x	x				x	x
	Seite 5							x	x	x	x		x

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.2 Arbeitsmengenmodell (3)

- Annäherung der Zugriffe durch die Zeit
  - bestimmtes Zeitintervall ist ungefähr proportional zu Anzahl von Speicherzugriffen
- Virtuelle Zeit des Prozesses muss gemessen werden
  - nur die Zeit relevant, in der der Prozess im Zustand laufend ist
  - Verwalten virtueller Uhren pro Prozess

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.3 Arbeitsmengenbestimmung mit Zeitgeber

- Annäherung der Arbeitsmenge mit
  - Referenzbit
  - Altersangabe pro Seite (Zeitintervall ohne Benutzung)
  - Timer-Interrupt (durch Zeitgeber)
- Algorithmus
  - durch regelmäßigen Interrupt wird mittels Referenzbit die Altersangabe fortgeschrieben:
    - ist Referenzbit gesetzt (Seite wurde benutzt) wird das Alter auf Null gesetzt;
    - ansonsten wird Altersangabe erhöht.
    - Es werden nur die Seiten des gerade laufenden Prozesses „gealtert“.
  - Seiten mit Alter > Δ sind nicht mehr in der Arbeitsmenge des jeweiligen Prozesses

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.3 Arbeitsmengenbestimmung mit Zeitgeber (2)

- Ungenau: System ist aber nicht empfindlich auf diese Ungenauigkeit
  - Verringerung der Zeitintervalle: höherer Aufwand, genauere Messung
- Ineffizient
  - große Menge von Seiten zu betrachten

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

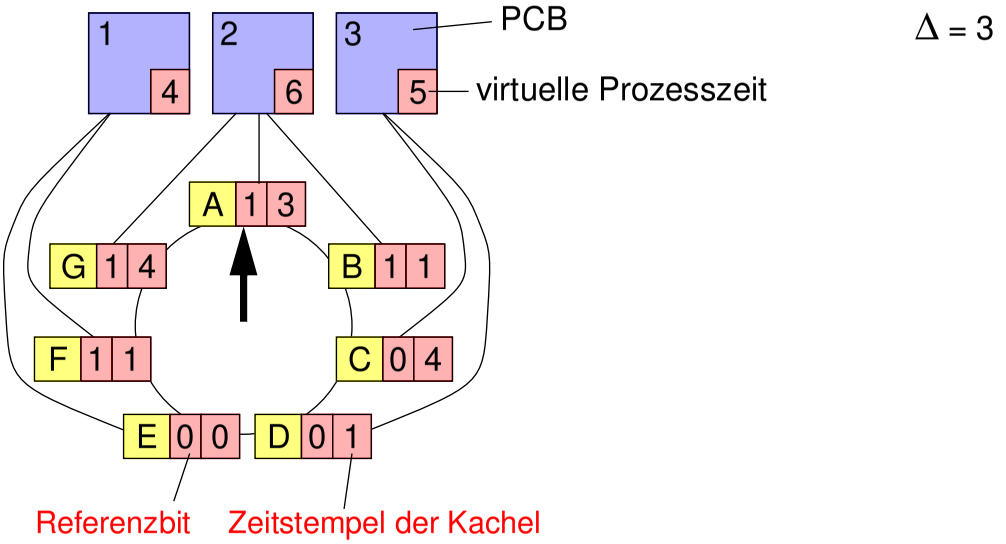
8.4 Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock

- Algorithmus WSClock (Working set clock)
  - arbeitet wie Clock
  - Seite wird nur dann ersetzt, wenn sie nicht zur Arbeitsmenge ihres Prozesses gehört oder der Prozess deaktiviert ist
  - Bei Zurücksetzen des Referenzbits wird die virtuelle Zeit des jeweiligen Prozesses eingetragen, die z.B. im PCB gehalten und fortgeschrieben wird
  - Bestimmung der Arbeitsmenge erfolgt durch Differenzbildung von virtueller Zeit des Prozesses und Zeitstempel in der Kachel

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.4 Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock (2)

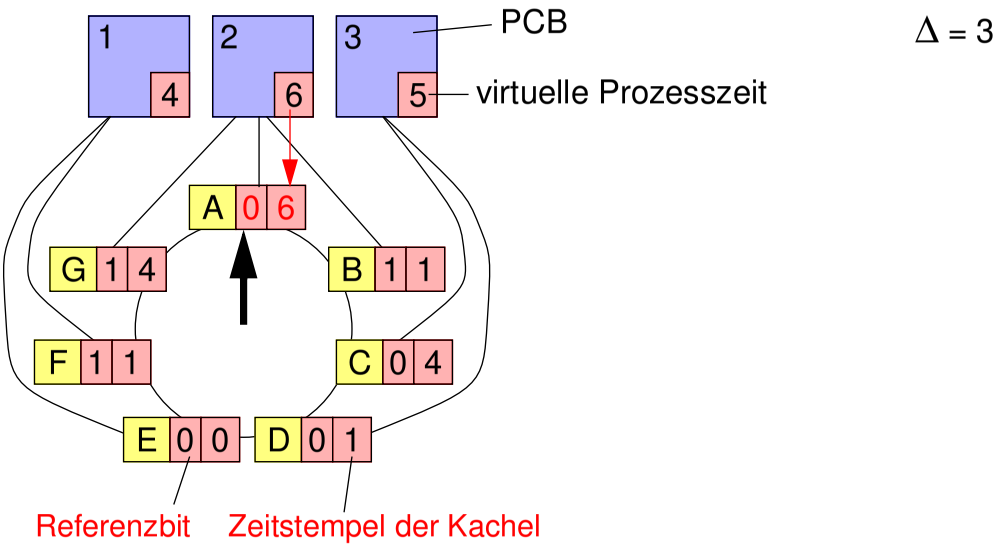
- WSClock Algorithmus



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.4 Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock (2)

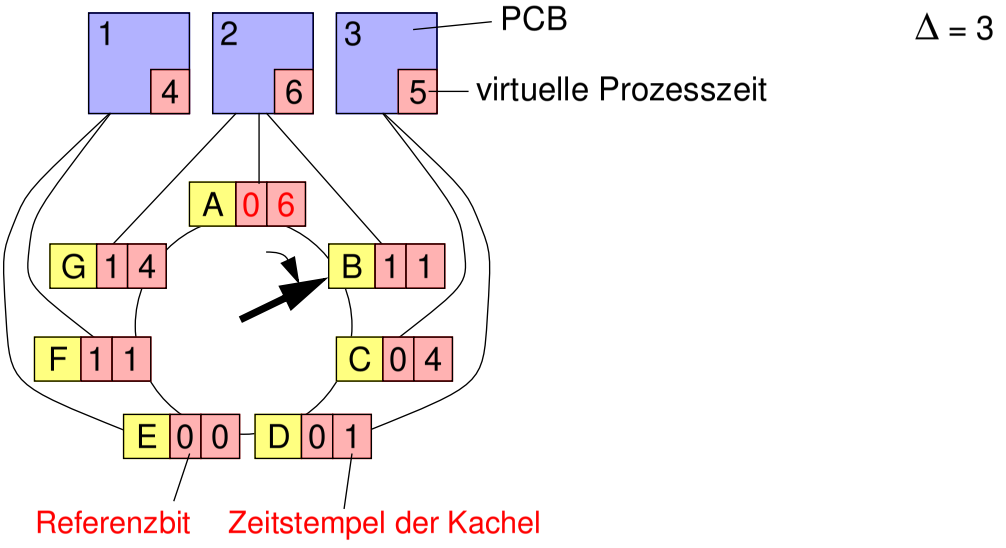
- WSClock Algorithmus



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.4 Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock (2)

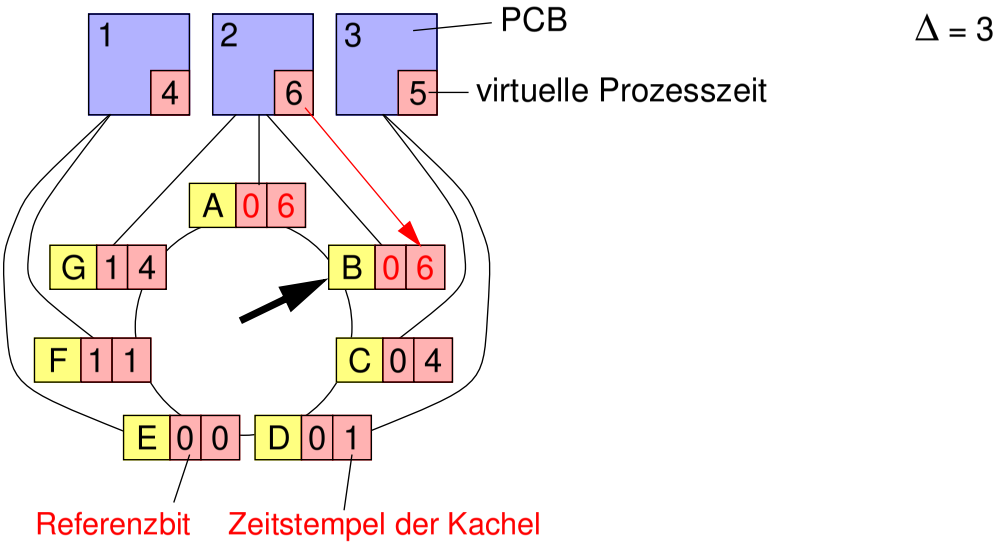
- WSClock Algorithmus



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.4 Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock (2)

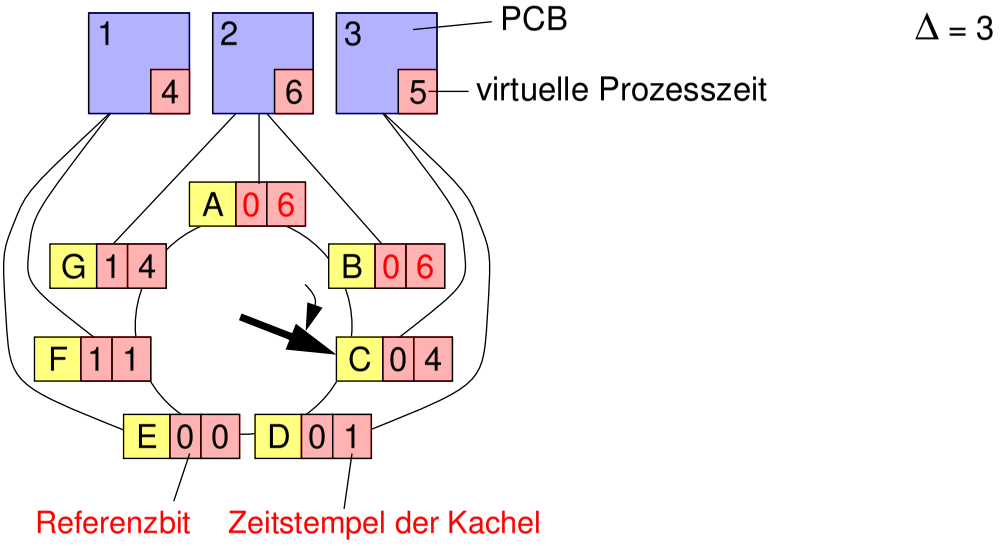
- WSClock Algorithmus



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.4 Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock (2)

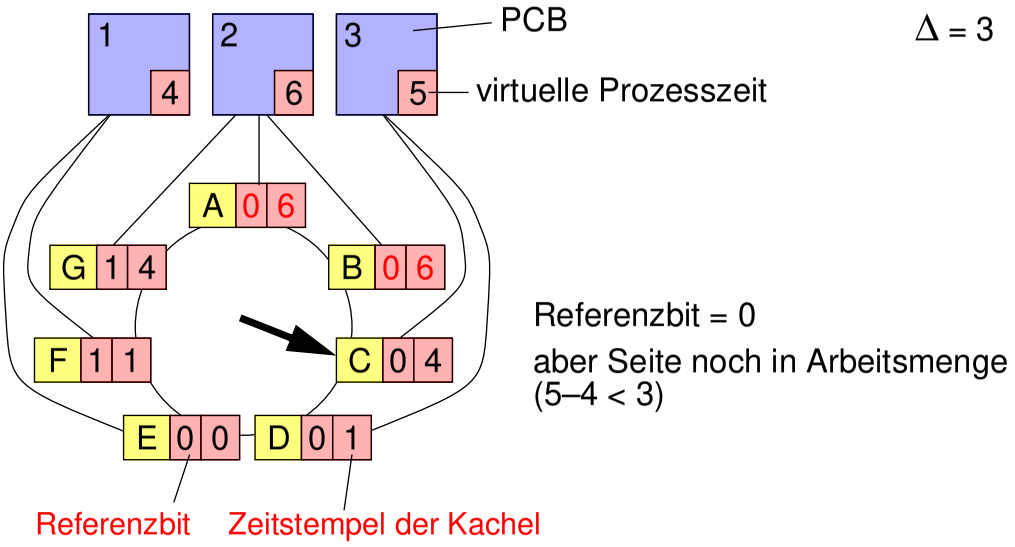
- WSClock Algorithmus



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.4 Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock (2)

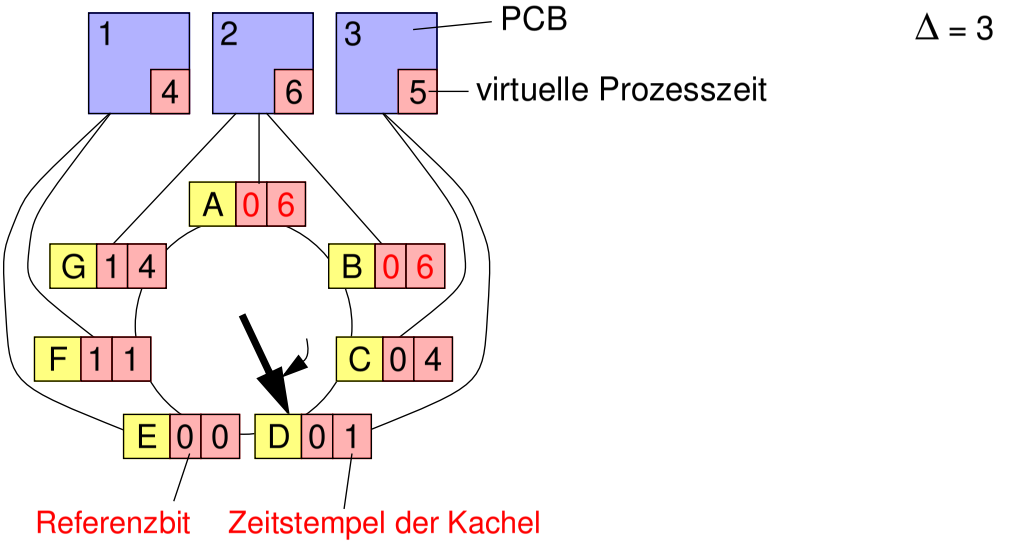
- WSClock Algorithmus



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.4 Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock (2)

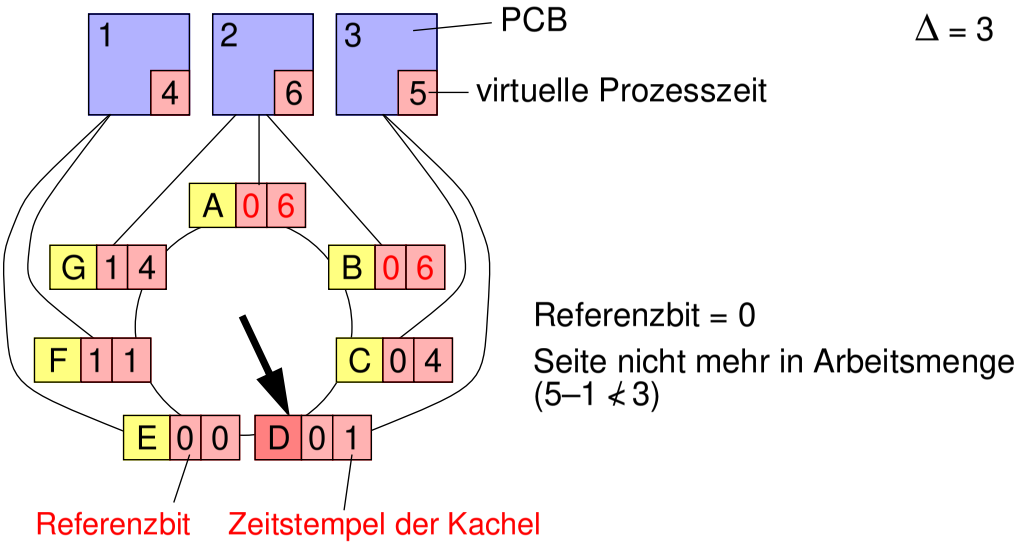
- WSClock Algorithmus



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.4 Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock (2)

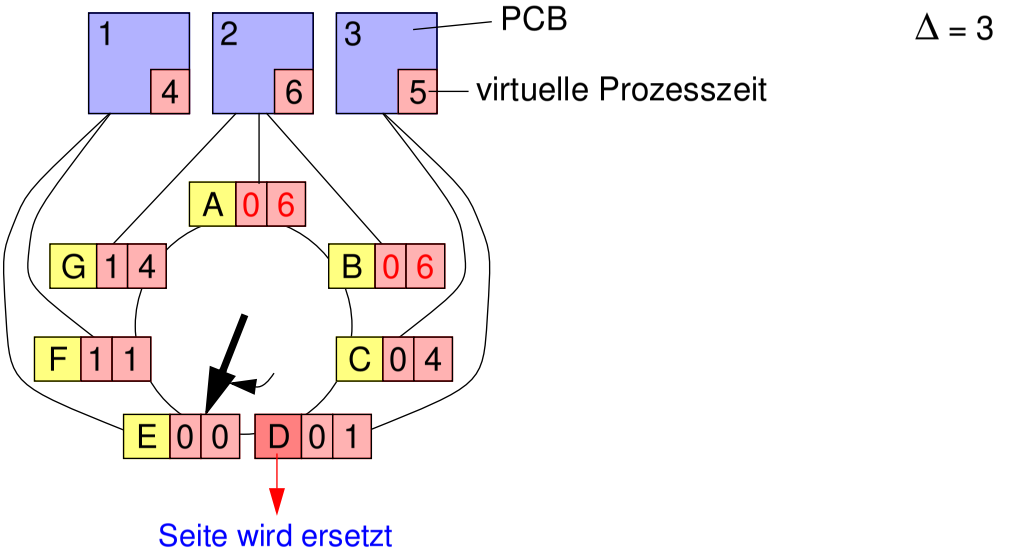
- WSClock Algorithmus



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.4 Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock (2)

- WSClock Algorithmus



Systemprogrammierung I
E – 85
© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

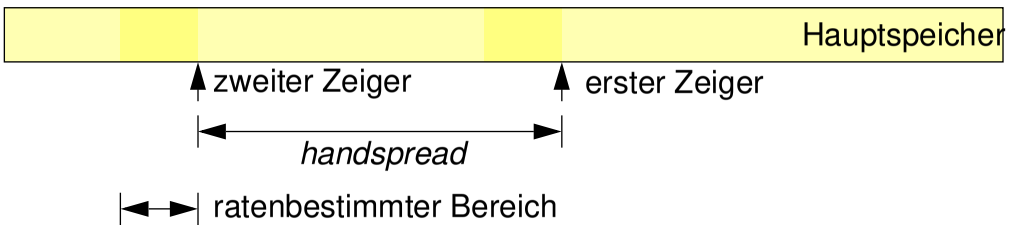
8.5 Probleme mit Arbeitsmengen

- ▲ Zuordnung zu einem Prozess nicht immer möglich
  - ◆ gemeinsam genutzte Seiten in modernen Betriebssystemen eher die Regel als die Ausnahme
    - Seiten des Codesegments
    - Shared libraries
    - Gemeinsame Seiten im Datensegment *(Shared memory)*
- ★ moderne System bestimmen meist eine globale Arbeitsmenge von Seiten

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.6 Ersetzungsstrategie bei Solaris

- ■ Prozess *pageout* arbeitet Clock-Strategie ab
  - ◆ Prozess läuft mehrmals die Sekunde (4x)
  - ◆ adaptierbare Rate: untersuchte Seiten pro Sekunde
  - ◆ statt ein Zeiger: zwei Zeiger
    - am ersten Zeiger werden Referenzbits zurückgesetzt
    - am zweiten Zeiger werden Seiten mit gelöschtem Ref.-Bit ausgewählt
    - nötig, weil sonst Zeitspanne zwischen Löschen und Auswählen zu lang wird (großer Hauptspeicher; 64 MByte entsprechen 8.192 Seiten)
    - Zeigerabstand einstellbar *(handspread)*



© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

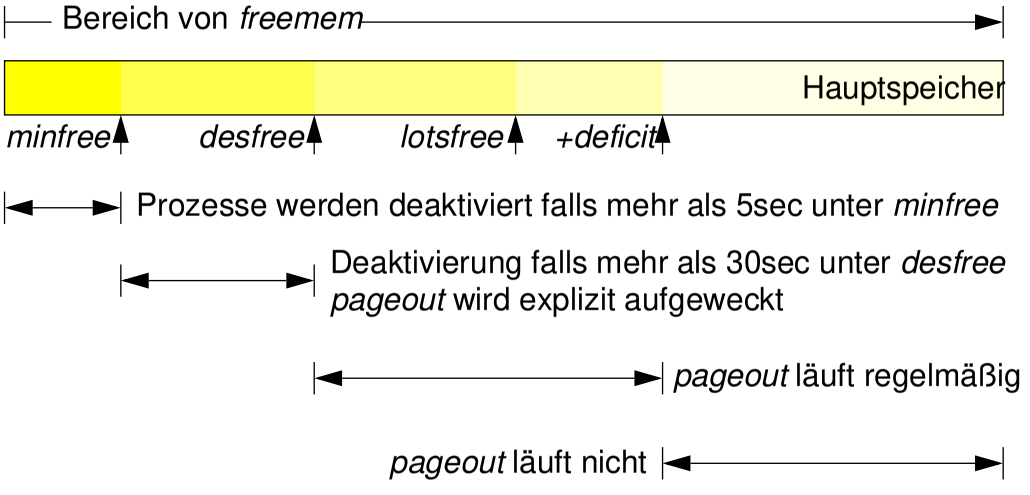
8.6 Ersetzungsstrategie bei Solaris (2)

- ermittelte Seiten werden ausgelagert (falls nötig) und
- in eine Freiliste eingehängt
- aus der Freiliste werden Kacheln für Einlagerungen angefordert
- Seitenfehler können unbenutzte Seiten aus der Freiliste wieder zurückfordern *(Minor page faults)*

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.6 Ersetzungsstrategie bei Solaris (3)

- Verhalten von *pageout* orientiert sich an Größe der Freiliste (Menge des freien Speichers)

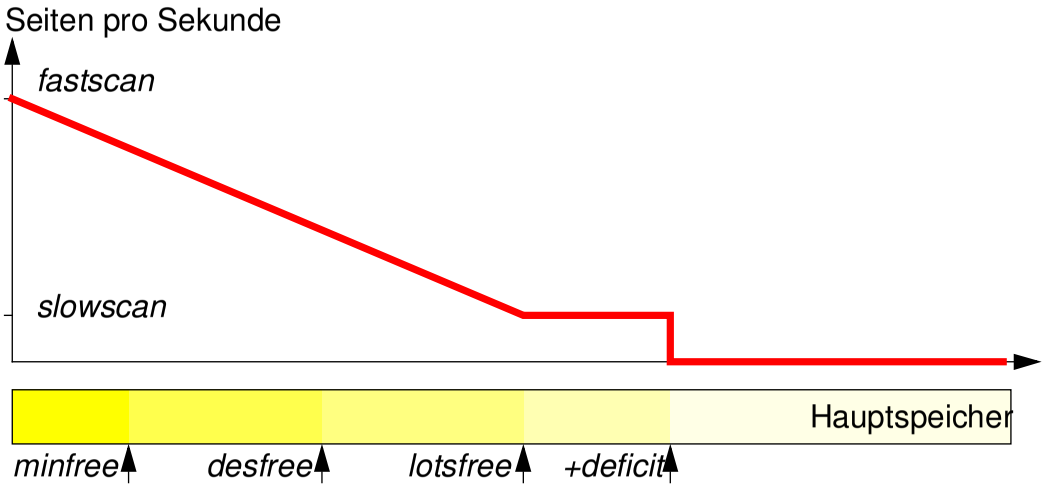


- *deficit* wird dynamisch ermittelt (0 bis *lotsfree*) und auf *lotsfree* addiert
  - entspricht Vorschau auf künftige große Speicheranforderungen

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.6 Ersetzungsstrategie bei Solaris (4)

- Seitenuntersuchungsrate des *pageout* Prozesses



  - je weniger freier Speicher verfügbar ist, desto höher wird die Untersuchungsrate
  - *slowscan* und *fastscan* sind einstellbar

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.6 Ersetzungsstrategie bei Solaris (5)

- Weitere Parameter
  - *maxpgio:* maximale Transferrate bei Auslagerungen (vermeidet Plattensaturierung)
  - *autoup:* Zeitdauer des regelmäßigen Auslagerns alter Seiten durch den Prozess *flushd* (Default: alle 30 sec)
- Aktivieren und Deaktivieren *(Swap in, Swap out)*
  - Auswahl wird dem Scheduler überlassen
  - Deaktivierung wird lediglich von Speicherverwaltung angestoßen

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.6 Ersetzungsstrategie bei Solaris (6)

- Typische Werte
  - *minfree:* 1/64 des Hauptspeichers (Solaris 2.2), 25 Seiten (Solaris 2.4)
  - *desfree:* 1/32 des Hauptspeichers (Solaris 2.2), 50 Seiten (Solaris 2.4)
  - *lotsfree:* 1/16 des Hauptspeichers (Solaris 2.2), 128 Seiten (Solaris 2.4)
  - *deficit:* 0 bis *lotsfree*
  - *fastscan:* min(1/4 Hauptspeicher, 64 MByte) pro Sekunde (Solaris 2.4)
  - *slowscan:* 800 kBytes pro Sekunde (Solaris 2.4)
  - *handspread:* wie *fastscan* (Solaris 2.4)

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

8.7 Ersetzungsstrategie bei Windows 2000

- Freiliste von freien Kacheln
- Arbeitsmenge pro Prozess
  - zunächst vorbestimmt
  - Anpassung der Arbeitsmenge durch Working-Set-Manager
  - Arbeitszyklus des Working-Set-Managers wird durch Speicherknappheit beschleunigt
  - Auslagerungsstrategie nach WSClock (nur Monoprozessorvariante) unter Berücksichtigung von Prozessklassen
  - prozessspezifische Konfiguration der Arbeitsmenge durch Anwender

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

9 Zusammenfassung

- Freispeicherverwaltung
  - Speicherrepräsentation, Zuteilungsverfahren
- Mehrprogrammbetrieb
  - Relokation, Ein- und Auslagerung
  - Segmentierung
  - Seitenadressierung, Seitenadressierung und Segmentierung, TLB
  - gemeinsamer Speicher
- Virtueller Speicher
  - Demand paging
  - Seitenersetzungsstrategien: FIFO, B_0, LRU, 2nd chance (Clock)
- Seitenflattern
  - Super-Zustände, Arbeitsmengenmodell

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

© 1997-2003, F. J. Hauck, W. Schröder-Preikschat, Inf 4, FAU Erlangen-Nürnberg[E-Memory.fm, 2003-12-12 18.33]
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.