

## Verdrängung eingelagerter Fragmente

Platz schaffen zur Einlagerung anderer Fragmente (d.h., Seiten oder Segmente)

Konsequenz zur **Durchsetzung der Ladestregie** bei Arbeitsspeichermangel

- ▶ wenn eine Überbelegung des Arbeitsspeichers vorliegt
  - ▶ der Speicherbedarf aller Prozesse ist größer als der verfügbare RAM
- ▶ aber auch im Falle (extensiver) externer Fragmentierung

**OPT** (optimales Verfahren) Verdrängung der Seite, die am längsten nicht mehr verwendet werden wird — **unrealistisch**

- ▶ erfordert Wissen über die im weiteren Verlauf der Ausführung von Prozessen generierten Speicheradressen, was bedeutet:
  - ▶ das Laufzeitverhalten von Prozessen ist im Voraus bekannt
  - ▶ Eingabewerte sind vorherbestimmt
  - ▶ asynchrone Programmunterbrechungen sind vorhersagbar
- ▶ bestenfalls ist eine gute **Approximation** möglich/umsetzbar

☞ Seitenfehlerwahrscheinlichkeit senken und Seitenfehlerrate verringern

## Ersetzungsverfahren

Praxistaugliche Herangehensweisen

**Approximation des optimalen Verfahren** greift auf Wissen aus der Vergangenheit/Gegenwart zurück, d.h., ersetzt wird ...

**FIFO** (*first-in, first-out*) das zuerst eingelagerte Fragment

- ▶ Fragmente entsprechend des Einlagerungszeitpunkts verketteten

**LFU** (*least frequently used*) das am seltenste genutzte Fragment

- ▶ jeden Zugriff auf eingelagerte Fragmente zählen
- ▶ Alternative: **MFU** (*most frequently used*)

**LRU** (*least recently used*) das kürzlich am wenigsten genutzte Fragment

- ▶ Zeitstempel, Stapeltechniken oder Referenzlisten einsetzen
- ▶ bzw. weniger aufwändig durch Referenzbits approximieren

☞ die zu ersetzenden/verdrängenden Fragmente sind vorzugsweise **Seiten**

## Zählverfahren

Auswahlkriterium ist die Häufigkeit von Seitenreferenzen

Zähler basierte Ansätze führen Buch darüber, wie häufig eine Seite innerhalb einer bestimmten Zeitspanne referenziert worden ist:

- ▶ im Seitendeskriptor ist dazu ein **Referenzzähler** enthalten
- ▶ der Zähler wird mit jeder Referenz zu der Seite inkrementiert
- ▶ aufwändige Implementierung, bei mäßiger Approximation von OPT

**LFU** ersetzt die Seite mit dem kleinsten Zählerwert

- ▶ Annahme: **aktive Seiten** haben große Zählerwerte und weniger aktive bzw. **inaktive Seiten** haben kleine Zählerwerte
- ▶ große Zählerwerte können dann aber auch jene Seiten haben, die z.B. nur in der Initialisierungsphase aktiv gewesen sind

**MFU** ersetzt die Seite mit dem größten Zählerwert

- ▶ Annahme: **kürzlich aktive Seiten** haben eher kleine Zählerwerte

## Zeitverfahren

Auswahlkriterium ist die Zeitspanne zurückliegenden Seitenreferenzen

**LRU<sub>time</sub>** verwendet einen Zähler („logische Uhr“) in der CPU, der bei jedem Speicherzugriff erhöht und in den zugehörigen Seitendeskriptor geschrieben wird

- ▶ verdrängt die Seite mit dem kleinsten **Zeitstempelwert**

**LRU<sub>stack</sub>** nutzt einen Stapel eingelagerter Seiten, aus dem bei jedem Seitenzugriff die betreffende Seite herausgezogen und wieder oben drauf gelegt wird

- ▶ verdrängt die Seite am **Stapelboden**

**LRU<sub>ref</sub>** führt Buch über alle zurückliegenden Seitenreferenzen

- ▶ verdrängt die Seite mit dem größten **Rückwärtsabstand**

- ▶ entspricht OPT, wenn allerdings die Vergangenheit betrachtet wird
  - ▶ gute Approximation von OPT, bei sehr aufwändiger Implementierung

# Approximation von LRU

Alterung von Seiten (engl. *page aging*) verfolgen

**Referenzbit** (engl. *reference bit*) im Seitendeskriptor zeigt an, ob auf die zugehörige Seite zugegriffen wurde:

0  $\mapsto$  kein Zugriff

1  $\mapsto$  Zugriff bzw. Einlagerung

- ▶ das Alter eingelagerter Seiten wird periodisch (Zeitgeber) bestimmt:
  - ▶ für jede eingelagerte Seite wird ein  $N$ -Bit Zähler (*age counter*) geführt
  - ▶ der Zähler ist als **Schieberegister** (engl. *shift register*) implementiert
  - ▶ nach Aufnahme eines Referenzbits in den Zähler, wird es gelöscht
- ▶ „kürzlich am wenigsten genutzte“ Seiten haben den Zählerwert 0
  - ▶ d.h., sie wurden seit  $N$  Perioden nicht mehr referenziert ( $\rightarrow$  NT)

# Approximation von LRU (Forts.)

Schieberegistertechnik zur Bestimmung des Lebensalters einer Seite

**page aging** (Forts.) mit Ablauf eines Zeitquantums (Tick), werden die Referenzbits eingelagerter Seiten des laufenden Prozesses in die Schieberegister seiner Seitendeskriptoren übernommen

- ▶ z.B. ein 8-Bit „*age counter*“:  $age = (age \gg 1) | (ref \ll 7)$

Referenzbit	Alter ( <i>age</i> , initial 0)
1	10000000
1	11000000
0	01100000
1	10110000
⋮	⋮

Den Inhalt des 8-Bit Schieberegisters (*age*) als ganze Zahl interpretiert liefert ein Maß für die Aktivität einer Seite:  
**mit abnehmendem Betrag (sinkender Aktivität) steigt die Ersetzungspriorität.**

☞ Aufwand steigt mit der Adressraumgröße des unterbrochenen Prozesses

# Approximation von LRU (Forts.)

Referenzierte Seiten sind vermeintlich aktive Seiten

*second chance* (auch: *clock policy*)

- ▶ arbeitet im Grunde nach FIFO, berücksichtigt jedoch zusätzlich noch die Referenzbits der jeweils in Betracht zu ziehenden Seiten
- ▶ periodisch (Zeitgeber, Tick) werden die Seitendeskriptoren des (unterbrochenen) laufenden Prozesses untersucht

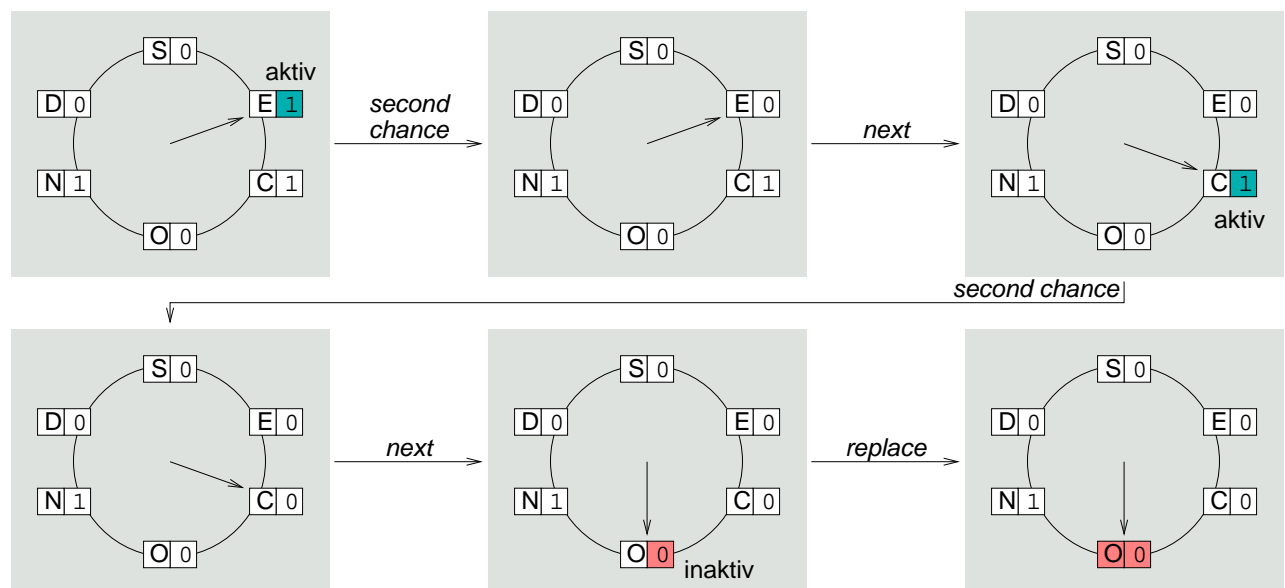
Referenzbit	Aktion	Bedeutung
1	Referenzbit auf 0 setzen	Seite erhält zweite Chance
0	—	Seite ist Ersetzungskandidat

- ▶ im schlimmsten Fall erfolgt ein Rundumschlag über alle Seiten, falls die Referenzbits aller betrachteten Seiten (auf 1) gesetzt waren
  - ▶ die Strategie „entartet“ dann zu FIFO

☞ unterscheidet nicht zwischen lesende und schreibende Seitenzugriffe

# Approximation von LRU (Forts.)

*Clock Policy*



## Approximation von LRU (Forts.)

Schreibzugriffe stärker gewichtet als Lesezugriffe

*enhanced second chance* prüft zusätzlich, ob eine Seite schreibend oder nur lesend referenziert wurde

- ▶ Grundlage dafür ist ein **Modifikationsbit** (*modify/dirty bit*)
  - ▶ ist als weiteres Attribut in jedem Seitendeskriptor enthalten
  - ▶ wird bei Schreibzugriffen auf 1 gesetzt, bleibt sonst unverändert
- ▶ zusammen mit dem Referenzbit ergeben sich vier Paarungen ( $R, D$ ):

	Bedeutung	Entscheidung
(0, 0)	ungenutzt	beste Wahl
(0, 1)	beschrieben	keine schlechte Wahl
(1, 0)	kürzlich gelesen	keine gute Wahl
(1, 1)	kürzlich beschrieben	schlechteste Wahl

- ▶ kann für jeden Prozess(adressraum) zwei Umläufe erwirken
  - ▶ gibt referenzierten Seiten damit eine dritte Chance (→ MacOS)

## Freiseitenpuffer

Reserve freier (d.h. ungebundener) Seitenrahmen garantieren

Alternative zur Seitenersetzung, die den **Vorabruf** von Seiten nutzt

- ▶ Steuerung der Seitenüberlagerung über **Schwellwerte** („*water mark*“):
  - low* Seitenrahmen als frei markieren, Seiten ggf. auslagern
  - high* Seiten ggf. einlagern, **Vorausladen**
- ▶ die Auswahl greift z.B. auf Referenz-/Modifikationsbits zurück

**Freiseiten** gelangen in einen **Zwischenspeicher** (engl. *cache*)

- ▶ die Zuordnung von Seiten zu Seitenrahmen bleibt jedoch erhalten
- ▶ vor ihrer Ersetzung doch noch benutzte Seiten werden „zurückgeholt“
- ▶ sog. „*reclaiming*“ von Seiten durch Prozesse (→ Solaris, Linux)

☞ vergleichsweise effizient: die Ersetzungszeit entspricht der Ladezeit

## Seitenanforderung

### Verteilung von Seitenrahmen auf Prozessadressräume

Prozessen ist mindestens die **kritische Masse von Seitenrahmen** zur Verfügung zu stellen, um in ihrer Ausführung voranschreiten zu können

- ▶ Rechnerausstattung/-architektur geben „harte“ Begrenzungen vor:
  - Obergrenze** die Größe des Arbeitsspeichers
  - Untergrenze** definiert durch den komplexesten Maschinenbefehl
    - ▶ schlimmster Fall möglicher Seitenfehler (S. IX-19)
- ▶ innerhalb dieser Grenzen, ist die Zuordnung ...
  - gleichverteilt** in Abhängigkeit von der Prozessanzahl und/oder
  - größenabhängig** bedingt durch den (statischen) Programmumfang
- ▶ „weiche“ Begrenzungen ergeben sich z.B. durch die gegenwärtige Systemlast und den gewünschten Grad an Mehrprogrammbetrieb

## Einzugsbereiche

### Wirkungskreis der Seitenüberlagerung

- lokal** nur Seitenrahmen des von der Seitenersetzung betroffenen Prozessadressraums nutzen (→ NT)
  - ▶ die Seitenfehlerrate ist von einem Prozess selbst kontrollierbar
    - ▶ Prozesse verdrängen niemals Seiten anderer Adressräume
    - ▶ fördert ein deterministisches Laufzeitverhalten von Prozessen
  - ▶ **statische Zuordnung** von Seitenrahmen zum Prozessadressraum
- global** alle verfügbaren Seitenrahmen heranziehen; **dynamische Zuordnung**
  - ▶ Verdrängung/Ersetzung von Seitenrahmen ist unvorhersehbar und auch nicht bzw. nur schwer reproduzierbar
    - ▶ Seitenfehler erhalten *Interrupt*-Eigenschaften
  - ▶ der zeitliche Ablauf einer Programmausführung ist abhängig von den in anderen Adressräumen vorgehenden Aktivitäten
- ▶ Kombination beider Ansätze ist möglich: Prozess-/Adressraumklassen
  - ▶ z.B. nur Echtzeitprozesse der lokalen Seitenersetzung unterziehen

# Seitenflattern

(engl. *thrashing*)

„Dresche beziehen“ — wenn durch Seitenüberlagerung verursachte E/A die gesamten Systemaktivitäten bestimmt

- ▶ eben erst ausgelagerte Seiten werden sofort wieder eingelagert
  - ▶ Prozesse verbringen mehr Zeit beim „*paging*“ als beim Rechnen
  - ▶ das Problem ist immer in Relation zu der Zeit zu setzen, die Prozesse mit sinnvoller Arbeit verbringen
- ▶ ein mögliches Phänomen der globalen Seitenersetzung
  - ▶ Prozesse bewegen sich zu nahe am Seiten(rahmen)minimum
  - ▶ zu hoher Grad an Mehrprogrammbetrieb
  - ▶ ungünstige Ersetzungsstrategie
- ▶ verschwindet ggf. so plötzlich von allein, wie es aufgetreten ist ...

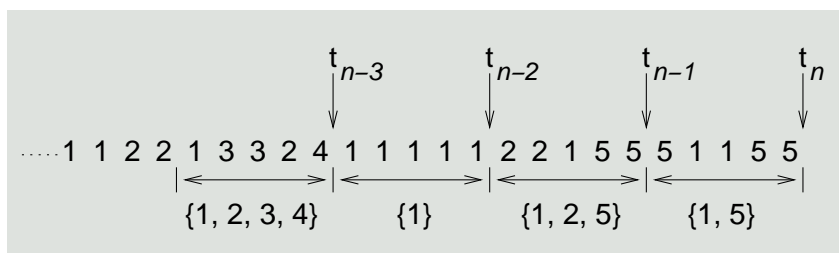
☞ Umlagerung (*Swapping*) von Adressräumen bzw. **Arbeitsmengen**

# Seitenflattern vermeiden

Heuristik über zukünftig erwartete Seitenzugriffe erstellen

**Arbeitsmenge** (engl. *working set*) die Menge der Seiten, die ein Prozess lokal/das System global in naher Zukunft aktiv in Benutzung haben wird

- ▶ Berechnung der Arbeitsmenge ist nur näherungsweise möglich:
  - ▶ Ausgangspunkt ist die **Seitenreferenzfolge** der jüngeren Vergangenheit
  - ▶ regelmäßig wird ein Fenster (*working set window*) darauf geöffnet



- ▶ zu kleine Fenster haben wenig aktive Seiten
- ▶ zu große Fenster zeigen Überlappungen

- ▶ die **Fensterbreite** gibt eine „feste Anzahl von Maschinenbefehlen“
  - ▶ sie wird approximiert durch periodische Unterbrechungen
  - ▶ die Befehlsanzahl ergibt sich in etwa aus der **Periodenlänge**

## Seitenflattern vermeiden (Forts.)

### Approximation der Arbeitsmenge

Grundlage sind Referenzbit, Seitenalter und periodische Unterbrechungen

- ▶ bei jedem Tick werden die Referenzbits eingelagerter Seiten geprüft:
  - 1  $\leadsto$  Referenzbit und Alter auf 0 setzen
  - 0  $\leadsto$  Alter der Seite um 1 erhöhen
    - ▶ Alterswerte von Arbeitsmengenseiten sind kleiner als die Fensterbreite
- ▶ nur Seiten des laufenden Prozesses altern  $\models$  **lokale Arbeitsmenge**
  - ▶ Problem: gemeinsam genutzte Seiten (z.B. *shared libraries*)
- ▶ Seiten aller „aktiven Adressräume“ altern  $\models$  **globale Arbeitsmenge**
  - ▶ Problem: vergleichsweise (sehr) hoher Systemaufwand

Umlagerung bzw. **Vorausladen** kompletter Arbeitsmengen praktizieren:

- ▶ **Mindestmenge von Seitenrahmen** lauffertiger Prozesse vorhalten
- ▶ Prozesse mit unvollständigen Arbeitsmengen stoppen/suspendieren

## Speicherverwaltung

### Buchführung über freie/belegte Arbeitsspeicherfragmente

- ▶ Programme erhalten Arbeitsspeicher statisch/dynamisch zugeteilt
  - ▶ Zuteilungseinheiten sind Segmente oder Seitenrahmen
- ▶ Zuteilung von Arbeitsspeicher ist Aufgabe der **Platzierungsstrategie**
  - ▶ die Erfassung freier Fragmente hängt u.a. ab vom Adressraummodell
    - ▶ Seitenrahmen  $\leadsto$  Bitkarte, Segmente  $\leadsto$  Löcherliste
  - ▶ Zuteilungsverfahren: *best/worst-fit*, *buddy*, *first/next-fit*
  - ▶ Verschmelzung/Kompaktifizierung wirkt ext. Fragmentierung entgegen
- ▶ die **Ladestrategie** sorgt für die Einlagerung von Seiten (Segmenten)
  - ▶ auf Anforderung oder im Voraus
- ▶ eingelagerte Seiten unterliegen der **Ersetzungsstrategie**
  - ▶ Ersetzungsverfahren: OPT, FIFO, LFU, MFU, LRU (*clock*)
    - ▶ alternativer Ansatz ist der Freiseitenpuffer
  - ▶ Verdrängung arbeitet adressraumlokal oder systemglobal
  - ▶ Arbeitsmengen auseinanderreißen kann zum Seitenflattern führen