

## 6.5 Semaphor (4)

### V-Operation

Unterbrechungen sperren
$*s = *s + 1$
alle Prozess aus der Warteschlange in den Zustand <i>bereit</i> versetzen
Unterbrechungen freigeben
Prozessumschalter ansteuern

- ◆ Prozesse probieren immer wieder, die P-Operation erfolgreich abzuschließen
- ◆ Schedulingstrategie entscheidet über Reihenfolge und Fairness
  - leichte Ineffizienz durch Aufwecken aller Prozesse
  - mit Einbezug der Schedulingstrategie effizientere Implementierungen möglich

## 6.5 Semaphor (6)

- Abstrakte Beschreibung von zählenden Semaphoren (PV System)
  - ◆ für jede Operation wird eine Bedingung angegeben
    - falls Bedingung nicht erfüllt, wird die Operation blockiert
  - ◆ für den Fall, dass die Bedingung erfüllt wird, wird eine Anweisung definiert, die ausgeführt wird
- Beispiel: zählende Semaphore

Operation	Bedingung	Anweisung
P( S )	$S > 0$	$S := S - 1$
V( S )	TRUE	$S := S + 1$

## 6.5 Semaphor (5)

- ★ Vorteile einer Semaphor-Implementierung im Betriebssystem
  - ◆ Einbeziehen des Schedulers in die Semaphor-Operationen
  - ◆ kein aktives Warten; Ausnutzen der Blockierzeit durch andere Prozesse
- Implementierung einer Synchronisierung
  - ◆ zwei Prozesse  $P_1$  und  $P_2$
  - ◆ Anweisung  $S_1$  in  $P_1$  soll vor Anweisung  $S_2$  in  $P_2$  stattfinden

```
int lock= 0;
```

```
...  
s1;  
V( &lock );  
...
```

Prozess 1

```
...  
P( &lock );  
s2;  
...
```

Prozess 2

- ★ Zählende Semaphore

## 7 Klassische Koordinierungsprobleme

- Reihe von bedeutenden Koordinierungsproblemen
  - ◆ Gegenseitiger Ausschluss (*Mutual exclusion*)
    - nur ein Prozess darf bestimmte Anweisungen ausführen
  - ◆ Puffer fester Größe (*Bounded buffers*)
    - Blockieren der lesenden und schreibenden Prozesse, falls Puffer leer oder voll
  - ◆ Leser-Schreiber-Problem (*Reader-writer problem*)
    - Leser können nebenläufig arbeiten; Schreiber darf nur alleine zugreifen
  - ◆ Philosophenproblem (*Dining-philosopher problem*)
    - im Kreis sitzende Philosophen benötigen das Besteck der Nachbarn zum Essen
  - ◆ Schlafende Friseure (*Sleeping-barber problem*)
    - Friseure schlafen solange keine Kunden da sind

## 7.1 Gegenseitiger Ausschluss

### ■ Semaphore

- ◆ eigentlich reicht ein Semaphore mit zwei Zuständen: binärer Semaphore

```
void P( int *s )
{
    while( *s == 0 );
    *s= 0;
}
```

atomare Funktion

```
void V( int *s )
{
    *s= 1;
}
```

atomare Funktion

- ◆ zum Teil effizienter implementierbar

## 7.1 Gegenseitiger Ausschluss (3)

### ▲ Problem der Klammerung kritischer Abschnitte

- ◆ Programmierer müssen Konvention der Klammerung einhalten
- ◆ Fehler bei Klammerung sind fatal

```
P( &lock );
... /* critical sec. */
P( &lock );
```

führt zu Verklemmung (Deadlock)

```
V( &lock );
... /* critical sec. */
V( &lock );
```

führt zu unerwünschter Nebenläufigkeit

## 7.1 Gegenseitiger Ausschluss (2)

### ■ Abstrakte Beschreibung: binäre Semaphore

Operation	Bedingung	Anweisung
P(S)	$S \neq 0$	$S := 0$
V(S)	TRUE	$S := 1$

## 7.1 Gegenseitiger Ausschluss (3)

### ■ Automatische Klammerung wünschenswert

- ◆ Beispiel: Java

```
synchronized( lock ) {
... /* critical sec. */
}
```

## 7.2 Bounded Buffers

- Puffer fester Größe
  - ◆ mehrere Prozesse lesen und beschreiben den Puffer
  - ◆ beispielsweise Erzeuger und Verbraucher (Erzeuger-Verbraucher-Problem)  
(z.B. Erzeuger liest einen Katalog; Verbraucher zählt Zeilen; Gesamtanwendung zählt Einträge in einem Katalog)
  - ◆ UNIX-Pipe ist solch ein Puffer
- Problem
  - ◆ Koordinierung von Leser und Schreiber
    - gegenseitiger Ausschluss beim Pufferzugriff
    - Blockierung des Lesers bei leerem Puffer
    - Blockierung des Schreibers bei vollem Puffer

## 7.2 Bounded Buffers (3)

```
char buffer[N];
int inslot= 0, outslot= 0;
semaphor mutex= 1, empty= 0, full= N;
```

```
void put( char c )
{
    P( &full );
    P( &mutex );
    buffer[inslot]= c;
    if( ++inslot >= N )
        inslot= 0;
    V( &mutex );
    V( &empty );
}
```

```
char get( void )
{
    char c;

    P( &empty );
    P( &mutex );
    c= buffer[outslot];
    if( ++outslot >= N )
        outslot= 0;
    V( &mutex );
    V( &full );
    return c;
}
```

## 7.2 Bounded Buffers (2)

- Implementierung mit zählenden Semaphoren
  - ◆ zwei Funktionen zum Zugriff auf den Puffer
    - `put` stellt Zeichen in den Puffer
    - `get` liest ein Zeichen vom Puffer
  - ◆ Puffer wird durch ein Feld implementiert, das als Ringpuffer wirkt
    - zwei Integer-Variablen enthalten Feldindizes auf den Anfang und das Ende des Ringpuffers
  - ◆ ein Semaphor für den gegenseitigen Ausschluss
  - ◆ je einen Semaphor für das Blockieren an den Bedingungen „Puffer voll“ und „Puffer leer“
    - Semaphor `full` zählt wieviele Zeichen noch in den Puffer passen
    - Semaphor `empty` zählt wieviele Zeichen im Puffer sind

## 7.3 Erstes Leser-Schreiber-Problem

- Lesende und schreibende Prozesse
  - ◆ Leser können nebenläufig zugreifen (Leser ändern keine Daten)
  - ◆ Schreiber können nur exklusiv zugreifen (Daten sonst inkonsistent)
- Erstes Leser-Schreiber-Problem (nach *Courtois* et al. 1971)
  - ◆ Kein Leser soll warten müssen, es sei denn ein Schreiber ist gerade aktiv
- Realisierung mit zählenden (binären) Semaphoren
  - ◆ Semaphor für gegenseitigen Ausschluss von Schreibern untereinander und von Schreiber gegen Leser: `write`
  - ◆ Zählen der nebenläufig tätigen Leser: Variable `readcount`
  - ◆ Semaphor für gegenseitigen Ausschluss beim Zugriff auf `readcount`: `mutex`

### 7.3 Erstes Leser-Schreiber-Problem (2)

```
semaphore mutex= 1, write= 1;
int readcount= 0;
```

```
...           Leser
P( &mutex );
if( ++readcount == 1 )
    P( &write );
V( &mutex );
... /* reading */
P( &mutex );
if( --readcount == 0 )
    V( &write );
V( &mutex );
...
```

```
...           Schreiber
P( &write );
... /* writing */
V( &write );
...
```

### 7.3 Erstes Leser-Schreiber-Problem (4)

- Implementierung mit PV-Chunk:
  - ◆ Annahme: es gibt maximal  $N$  Leser

```
PV_chunk_semaphore mutex= N;
```

```
...           Leser
Pc( &mutex, 1 );
... /* reading */
Vc( &mutex, 1 );
...
```

```
...           Schreiber
Pc( &mutex, N );
... /* writing */
Vc( &mutex, N );
...
```

### 7.3 Erstes Leser-Schreiber-Problem (3)

- Vereinfachung der Implementierung durch spezielle Semaphore?
  - ◆ PV-Chunk Semaphore:
    - führen quasi mehrere P- oder V-Operationen atomar aus
    - zweiter Parameter gibt Anzahl an
- Abstrakte Beschreibung für PV-Chunk Semaphore:

Operation	Bedingung	Anweisung
P( S, k )	$S \geq k$	$S := S - k$
V( S, k )	TRUE	$S := S + k$

### 7.4 Zweites Leser-Schreiber-Problem

- Wie das erste Problem aber: (nach Courtois et.al., 1971)
  - ◆ Schreiboperationen sollen so schnell wie möglich durchgeführt werden
- Implementierung mit zählenden Semaphoren
  - ◆ Zählen der nebenläufig tätigen Leser: Variable `readcount`
  - ◆ Zählen der anstehenden Schreiber: Variable `writecount`
  - ◆ Semaphor für gegenseitigen Ausschluss beim Zugriff auf `readcount`: `mutexR`
  - ◆ Semaphor für gegenseitigen Ausschluss beim Zugriff auf `writecount`: `mutexW`
  - ◆ Semaphor für gegenseitigen Ausschluss von Schreibern untereinander und von Schreibern gegen Leser: `write`
  - ◆ Semaphor für den Ausschluss von Lesern, falls Schreiber vorhanden: `read`
  - ◆ Semaphor zum Klammern des Leservorspanns: `mutex`

## 7.4 Zweites Leser-Schreiber-Problem (2)

```
semaphore mutexR= 1, mutexW= 1, mutex= 1;
semaphore write= 1, read= 1;
int readcount= 0, writecount= 0;
```

*Bitte nicht  
versuchen, dies  
zu verstehen!!*

```

...
Leser
P( &mutex ); P( &read );
P( &mutexR );
if( ++readcount == 1 )
    P( &write );
V( &mutexR );
V( &read ); V( &mutex );

... /* reading */

P( &mutexR );
if( --readcount == 0 )
    V( &write );
V( &mutexR );
...

```

```

...
Schreiber
P( &mutexW );
if( ++writecount == 1 )
    P( &read );
V( &mutexW );
P( &write );

... /* writing */

V( &write );
P( &mutexW );
if( --writecount == 0 )
    V( &read );
V( &mutexW );
...

```

## 7.4 Zweites Leser-Schreiber-Problem (4)

- Abstrakte Beschreibung für Up-down-Semaphore

Operation	Bedingung	Anweisung
up( S, { S <sub>i</sub> } )	$\sum_i S_i \geq 0$	S := S + 1
down( S, { S <sub>i</sub> } )	$\sum_i S_i \geq 0$	S := S - 1

## 7.4 Zweites Leser-Schreiber-Problem (3)

- Vereinfachung der Implementierung durch spezielle Semaphore?
  - ◆ Up-Down-Semaphore:
    - zwei Operationen *up* und *down*, die den Semaphor hoch- und runterzählen
    - Nichtblockierungsbedingung für beide Operationen, definiert auf einer Menge von Semaphoren

## 7.4 Zweites Leser-Schreiber-Problem (5)

- Implementierung mit Up-Down-Semaphoren:

```
up_down_semaphor mutexw= 0, reader= 0, writer= 0;
```

```

...
Leser
down( &reader, 1, &writer );
... /* reading */

up( &reader, 0 );
...

```

```

...
Schreiber
down( &writer, 0 );
down( &mutexw,
    2, &mutexw, &reader );

... /* writing */

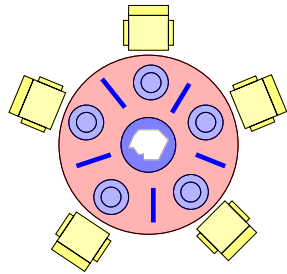
up( &mutexw, 0 );
up( &writer, 0 );
...

```

- ◆ Zähler für Leser: **reader** (zählt negativ)
- ◆ Zähler für anstehende Schreiber: **writer** (zählt negativ)
- ◆ Semaphor für gegenseitigen Ausschluss der Schreiber: **mutexw**

## 7.5 Philosophenproblem

### ■ Fünf Philosophen am runden Tisch



- ◆ Philosophen denken oder essen  
"The life of a philosopher consists of an alternation of thinking and eating."  
(Dijkstra, 1971)
- ◆ zum Essen benötigen sie zwei Gabeln, die jeweils zwischen zwei benachbarten Philosophen abgelegt sind

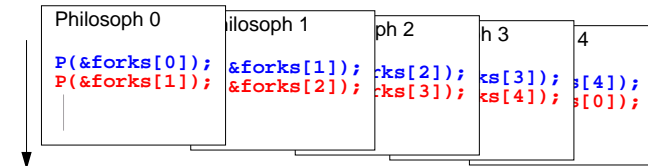
### ▲ Problem

- ◆ Gleichzeitiges Belegen mehrerer Betriebsmittel (hier Gabeln)
- ◆ Verklemmung und Aushungerung

## 7.5 Philosophenproblem (3)

### ■ Problem der Verklemmung

- ◆ alle Philosophen nehmen gleichzeitig die linke Gabel auf und versuchen dann die rechte Gabel aufzunehmen



### ◆ System ist verklemmt

- Philosophen warten alle auf ihre Nachbarn

## 7.5 Philosophenproblem (2)

### ■ Naive Implementierung

- ◆ eine Semaphor pro Gabel

```
semaphor forks[5]= { 1, 1, 1, 1, 1 };
```

Philosoph  $i$ ,  $i \in [0,4]$

```
while( 1 ) {
    ... /* think */

    P( &forks[i] );
    P( &forks[(i+1)%5] );

    ... /* eat */

    V( &forks[i] );
    V( &forks[(i+1)%5] );
}
```

## 7.5 Philosophenproblem (4)

### ■ Lösung 1: gleichzeitiges Aufnehmen der Gabeln

- ◆ Implementierung mit binären oder zählenden Semaphoren ist nicht trivial
- ◆ Zusatzvariablen erforderlich
- ◆ unübersichtliche Lösung

### ★ Einsatz von speziellen Semaphoren: PV-multiple-Semaphore

- ◆ gleichzeitiges und atomares Belegen mehrerer Semaphoren
- ◆ Abstrakte Beschreibung:

Operation	Bedingung	Anweisung
$P(\{S_i\})$	$\forall i, S_i > 0$	$\forall i, S_i = S_i - 1$
$V(\{S_i\})$	TRUE	$\forall i, S_i = S_i + 1$

## 7.5 Philosophenproblem (5)

- ◆ Implementierung mit PV-multiple-Semaphoren

```
PV_mult_semaphore forks[5]= { 1, 1, 1, 1, 1 };
```

Philosoph  $i$ ,  $i \in [0,4]$

```
while( 1 ) {
    ... /* think */

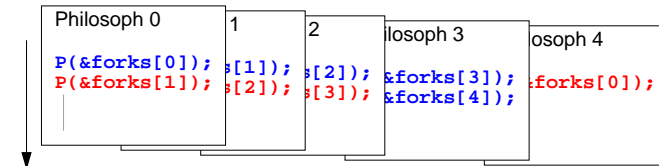
    Pm( 2, &forks[i], &forks[(i+1)%5] );

    ... /* eat */

    Vm( 2, &forks[i], &forks[(i+1)%5] );
}
```

## 7.5 Philosophenproblem (7)

- ◆ Ablauf der asymmetrischen Lösung im ungünstigsten Fall



- ◆ System verklemmt sich nicht

## 7.5 Philosophenproblem (6)

- Lösung 2: einer der Philosophen muss erst die andere Gabel aufnehmen

```
semaphor forks[5]= { 1, 1, 1, 1, 1 };
```

Philosoph  $i$ ,  $i \in [0,3]$

```
while( 1 ) {
    ... /* think */

    P( &forks[i] );
    P( &forks[(i+1)%5] );

    ... /* eat */

    V( &forks[i] );
    V( &forks[(i+1)%5] );
}
```

Philosoph 4

```
while( 1 ) {
    ... /* think */

    P( &forks[0] );
    P( &forks[4] );

    ... /* eat */

    V( &forks[0] );
    V( &forks[4] );
}
```

## 7.6 Schlafende Friseure

- Friseurladen mit  $N$  freien Wartestühlen
  - ◆ Friseure schlafen solange kein Kunde da ist
  - ◆ eintretende Kunden warten bis ein Friseur frei ist; gegebenenfalls wird einer der Friseure von einem Kunden aufgeweckt
  - ◆ sind keine Wartestühle mehr frei, verlassen die Kunden den Laden
- Problem:
  - ◆ Mehrere Bearbeitungsstationen sollen exklusive Bearbeitungen durchführen
- Implementierung mit zählenden Semaphoren
  - ◆ Semaphore zum Schutz der Variablen zum Zählen der Kunden: **mutex**
  - ◆ Semaphore zum Zählen der Friseure: **barbers**
  - ◆ Semaphore zum Zählen der Kunden: **customers**

## 7.6 Schlafende Friseure (2)

- Implementierung mit zählenden Semaphoren (PV System)

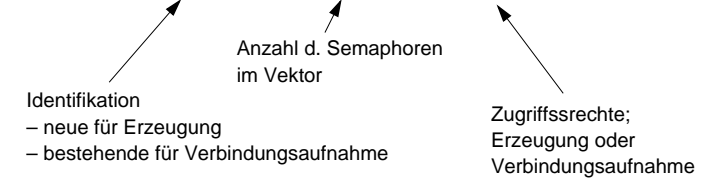
```
semaphor customers= 0, barbers= 0, mutex= 1;
int waiting= 0;
```

Barber	Customer
<pre>while( 1 ) {   P( &amp;customers );   P( &amp;mutex );   waiting--;   V( &amp;barbers );   V( &amp;mutex );    ... /* cut hair */ }</pre>	<pre>P( &amp;mutex ); if( waiting &lt; N ) {   waiting++   V( &amp;customers );   V( &amp;mutex );   P( &amp;barbers );    ... /* get hair cut */ } else {   V( &amp;mutex ); }</pre>

## 8.1 Erzeugen einer UNIX-Semaphore

- UNIX-Semaphore haben systemweit eindeutige Identifikation (Key)

```
◆ Erzeugen und Aufnehmen der Verbindung zu einer Semaphore
int semget( key_t key, int nsems, int semflg );
```



- ◆ Ergebnis ist eine Semaphore ID ähnlich wie ein Filedescriptor

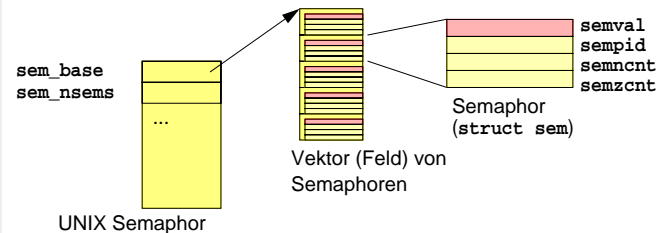
- Semaphore ID muss bei allen Operationen verwendet werden

- ◆ Zugriffsrechte: Lesen, Verändern

- einstellbar für Besitzer, Gruppe und alle anderen (ähnlich wie bei Dateien)

## 8 UNIX-Semaphor

- Ein UNIX-Semaphor entspricht einem Vektor von Einzelsemaphoren (erweitertes Vektoradditionssystem)



- ◆ Gleichzeitige und atomare Operationen auf mehreren Semaphore im Vektor möglich

## 8.1 Erzeugen einer UNIX-Semaphore (2)

- Verwendung des Keys

- ◆ Alle Prozesse, die auf die Semaphore zugreifen wollen, müssen den Key kennen

- ◆ Keys sind eindeutig innerhalb eines (Betriebs-)Systems

- ◆ Ist ein Key bereits vergeben, kann keine Semaphore mit gleichem Key erzeugt werden

- ◆ Ist ein Key bekannt, kann auf die Semaphore zugegriffen werden

- gesetzte Zugriffsberechtigungen werden allerdings beachtet

- ◆ Private Semaphore (ohne Key) können erzeugt werden

- Semaphore sind persistent

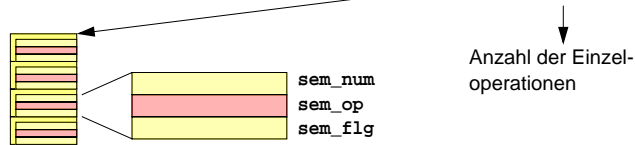
- ◆ Explizites Löschen notwendig

```
ipcrm -s <key>
```

## 8.2 Operationen auf UNIX-Semaphoren

- Operationen auf mehreren der Semaphoren im Vektor

```
int semop( int semid, struct sembuf *sops, size_t nsops );
```



- ◆ Operationen

- **sem\_num**: Nummer des Semaphors im Vektor
- **sem\_op** < 0: ähnlich P-Operation – Herunterzählen des Semaphors (blockierend oder mit Fehlerstatus, je nach **sem\_flg**)
- **sem\_op** > 0: ähnlich V-Operation – Hochzählen des Semaphors
- **sem\_op** == 0: Test auf 0 (blockierend oder mit Fehlerstatus, je nach **sem\_flg**)

## 8.3 Beispiel: Philosophenproblem

- Ein UNIX-Semaphor mit fünf Elementen (entsprechen Gabeln)

- ◆ Deklarationen

```
#include <sys/types.h>
#include <sys/ipc.h>
#include <sys/sem.h>

int i; /* number of philosopher */
int j;
int semid; /* semaphore ID */
struct sembuf pbuf[2], vbuf[2]; /* operation buffer */

union semun { /* UNION for semctl */
    int val;
    struct semid_ds *buf;
    ushort *array;
} arg;

...
```

## 8.2 Operationen auf UNIX-Semaphoren (2)

- Kontrolloperationen

```
int semctl( int semid, int semnum, int cmd,
            [ union semun arg ] );
```

- ◆ explizites Setzen von Werten (einen, alle)
- ◆ Abfragen von Werten (einen, alle)
- ◆ Abfragen von Zusatzinformationen
  - welcher Prozess hat letzte Operation erfolgreich durchgeführt
  - wann wurde letzte Operation durchgeführt
  - Zugriffsrechte
  - Anzahl der blockierten Prozesse
- ◆ Löschen des Semaphors

## 8.3 Beispiel: Philosophenproblem (2)

- ◆ Erzeuge Semaphor

```
...

semid= semget( IPC_PRIVATE, 5, IPC_CREAT|SEM_A|SEM_R );
if( semid < 0 ) { ... /* error */ }

for( j= 0; j < 5; j++ ) { /* set all values to 1 */
    arg.val= 1;
    if( semctl( semid, j, SETVAL, arg ) < 0 ) {
        ... /* error */
    }
}

...
```

### 8.3 Beispiel: Philosophenproblem (3)

#### ◆ Erzeugen der Prozesse

```
...
for( i=0; i<=3; i++ ) {      /* start children i= 0..3; */
    pid_t pid= fork();

    if( pid < (pid_t)0 ) { ... /* error */ }
    if( pid == (pid_t)0 ) {
        /* child */

        break;
    }
}                          /* parent: i= 4; */
...
```

### 8.3 Beispiel: Philosophenproblem (5)

#### ◆ Philosoph

```
...
while( 1 ) {
    ... /* thinking */

    if( semop( semid, pbuf, 2 ) < 0 ) { ... /* error */ }

    ... /* eating */

    if( semop( semid, vbuf, 2 ) < 0 ) { ... /* error */ }
}
```

### 8.3 Beispiel: Philosophenproblem (4)

#### ◆ Initialisierungen

```
... /* we are philosopher i */

/* initialize buffer for P operation */

pbuf[0].sem_num= i; pbuf[1].sem_num= (i+1)%5;
pbuf[0].sem_op= pbuf[1].sem_op= -1;
pbuf[0].sem_flg= pbuf[1].sem_flg= 0;

/* initialize buffer for V operation */

vbuf[0].sem_num= i; vbuf[1].sem_num= (i+1)%5;
vbuf[0].sem_op= vbuf[1].sem_op= 1;
vbuf[0].sem_flg= vbuf[1].sem_flg= 0;
...
```

## 9 Zusammenfassung

- Programmiermodell: Prozess
  - ◆ Zerlegung von Anwendungen in Prozesse oder Threads
  - ◆ Ausnutzen von Wartezeiten; Time sharing-Betrieb
  - ◆ Prozess hat verschiedene Zustände: laufend, bereit, blockiert etc.
- Auswahlstrategien für Prozesse
  - ◆ FCFS, SJF, PSJF, RR, MLFB
- Prozesskommunikation
  - ◆ Pipes, Queues, Signals, Sockets, Shared memory, RPC
- Koordinierung von Prozessen
  - ◆ Einschränkung der gleichzeitigen Abarbeitung von Befehlsfolgen in nebenläufigen Prozessen/Aktivitätsträgern

## 9 Zusammenfassung (2)

- Gegenseitiger Ausschluss mit Spinlocks
- Klassische Koordinierungsprobleme und deren Lösung mit Semaphoren
  - ◆ Gegenseitiger Ausschluss
  - ◆ Bounded buffers
  - ◆ Leser-Schreiber-Probleme
  - ◆ Philosophenproblem
  - ◆ Schlafende Friseur

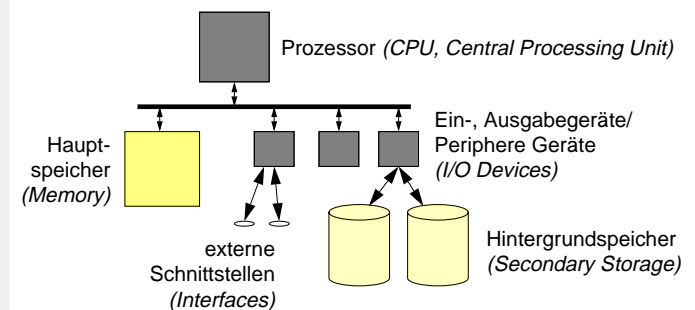
## E Speicherverwaltung

## 9 Zusammenfassung (3)

- UNIX Systemaufrufe
  - ◆ fork, exec, wait, nice
  - ◆ pipe, socket, bind, recvfrom, sendto, listen, accept
  - ◆ msgget, msgsnd, msgrcv
  - ◆ signal, kill, sigaction
  - ◆ semget, semop, semctl

## E Speicherverwaltung

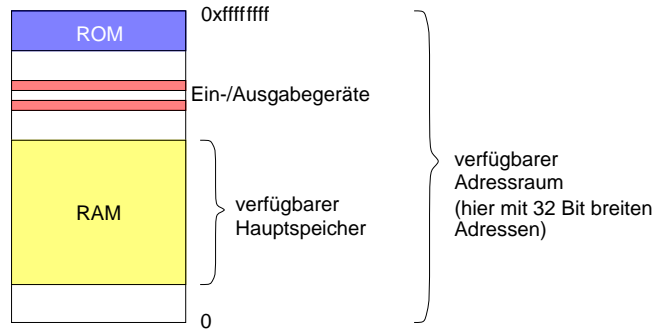
- Betriebsmittel



## 1 Speichervergabe

### 1.1 Problemstellung

#### ■ Verfügbarer Speicher



## 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

### 1.1 Problemstellung (2)

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

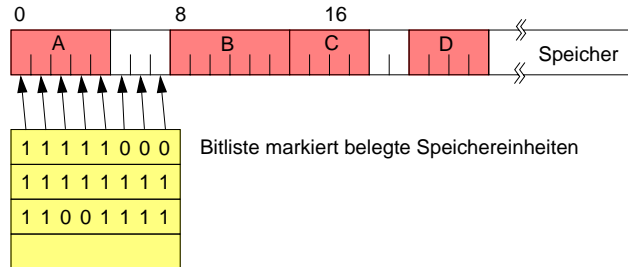
### 1.3 Dynamische Speicherzuteilung

- 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

## 1.4 Freispeicherverwaltung

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

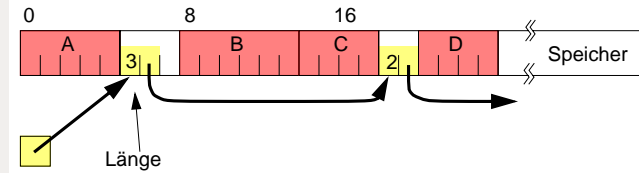
- Bitlisten



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

## 1.4 Freispeicherverwaltung (3)

- Verkettete Liste in dem freien Speicher

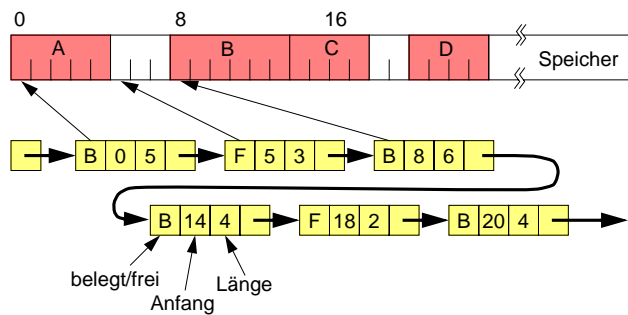


Mindestlückengröße muss garantiert werden

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

## 1.4 Freispeicherverwaltung (2)

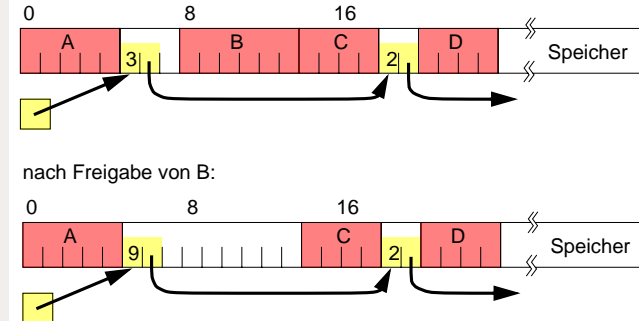
- Verkettete Liste



Repräsentation auch von freien Segmenten

## 1.5 Speicherfreigabe

- Verschmelzung von Lücken



nach Freigabe von B:

## 1.6 Vergabestrategien

- First Fit
  - ◆ erste passende Lücke wird verwendet
- Rotating First Fit / Next Fit
  - ◆ wie First Fit aber Start bei der zuletzt zugewiesenen Lücke
- Best Fit
  - ◆ kleinste passende Lücke wird gesucht
- Worst Fit
  - ◆ größte passende Lücke wird gesucht
- ▲ Probleme:
  - ◆ Speicherverschnitt
  - ◆ zu kleine Lücken

## 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*)

## 1.7 Buddy Systeme

- Einteilung in dynamische Bereiche der Größe  $2^n$

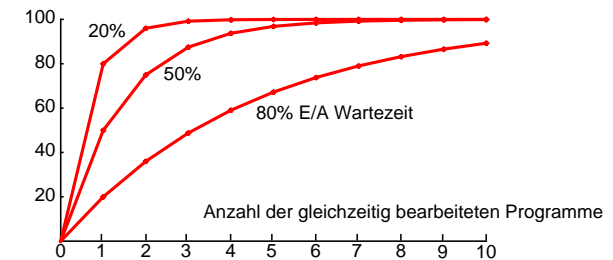
	0 128 256 384 512 640 768 896 1024									
	1024									
Anfrage 70	A	128		256		512				
Anfrage 35	A	B	64	256		512				
Anfrage 80	A	B	64	C	128	512				
Freigabe A	128	B	64	C	128	512				
Anfrage 60	128	B	D	C	128	512				
Freigabe B	128	64	D	C	128	512				
Freigabe D	256		C	128	512					
Freigabe C	1024									

Effiziente Repräsentation der Lücken und effiziente Algorithmen

## 2 Mehrprogrammbetrieb

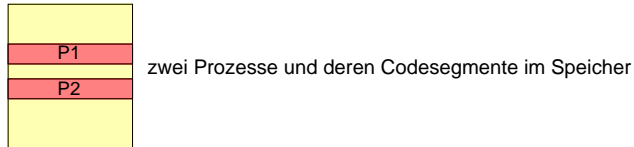
### 2.1 Problemstellung

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



## 2.1 Problemstellung (2)

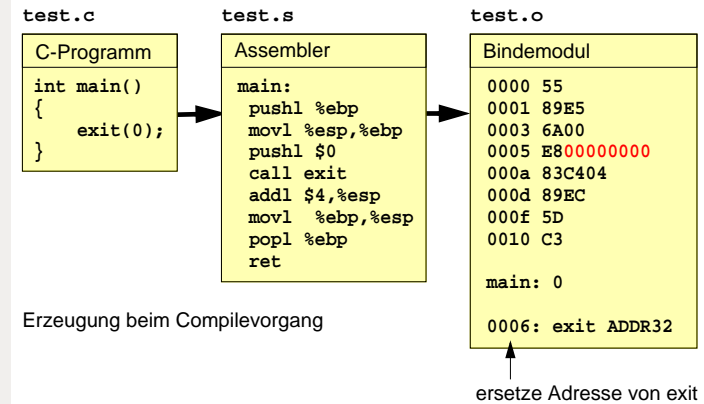
- ▲ Mehrere Prozesse benötigen Hauptspeicher
  - ◆ Prozesse liegen an verschiedenen Stellen im Hauptspeicher.
  - ◆ Speicher reicht eventuell nicht für alle Prozesse.
  - ◆ Schutzbedürfnis des Betriebssystems und der Prozesse untereinander



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

## 2.2 Relokation (2)

- Compilevorgang (Erzeugung der Relokationsinformation)

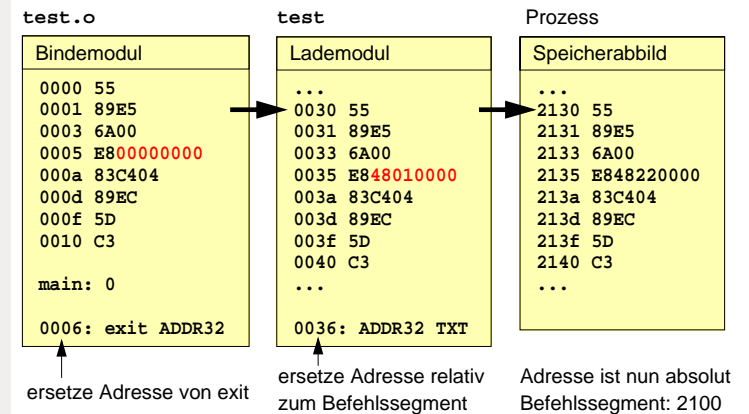


## 2.2 Relokation

- 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

## 2.2 Relokation (3)

- Binde- und Ladevorgang

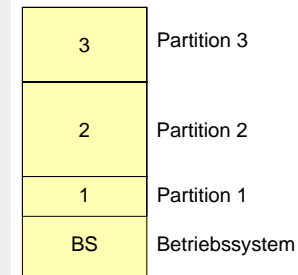


## 2.2 Relokation (4)

- 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

## 2.3 Ein-, Auslagerung (2)

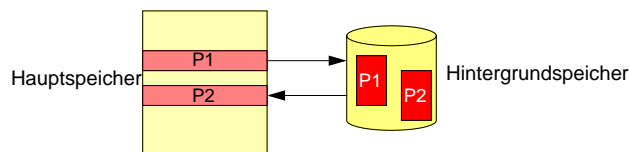
- ▲ Prozess ist statisch gebunden
  - ◆ kann nur an gleiche Stelle im Hauptspeicher wieder eingelagert werden
  - ◆ Kollisionen mit eventuell neu im Hauptspeicher befindlichen Segmenten
- Mögliche Lösung: Partitionierung des Hauptspeichers



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

## 2.3 Ein-, Auslagerung (Swapping)

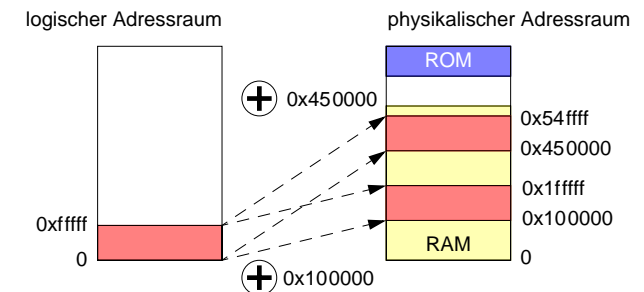
- Segmente eines Prozesses werden auf Hintergrundspeicher ausgelagert und im Hauptspeicher freigegeben
  - ◆ z.B. zur Überbrückung von Wartezeiten bei E/A oder Round-Robin Schedulingstrategie
- Einlagern der Segmente in den Hauptspeicher am Ende der Wartezeit



- ▲ Aus-, Einlagerzeit ist hoch
  - ◆ Latenzzeit der Festplatte
  - ◆ Übertragungszeit

## 2.4 Segmentierung

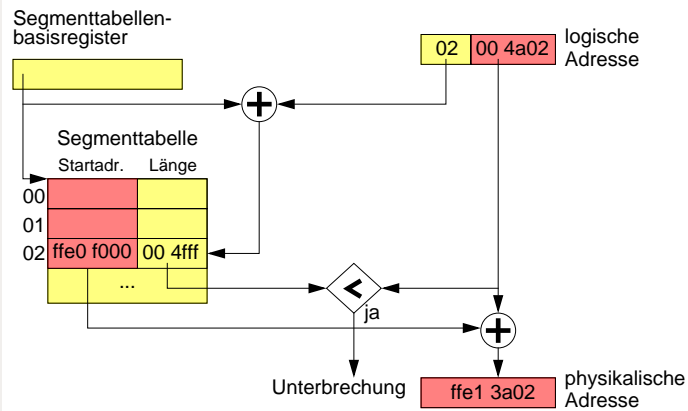
- Hardwareunterstützung: Umsetzung logischer in physikalische Adressen
  - ◆ Prozesse erhalten einen logischen Adressraum



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

## 2.4 Segmentierung (2)

### Realisierung mit Übersetzungstabelle



## 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

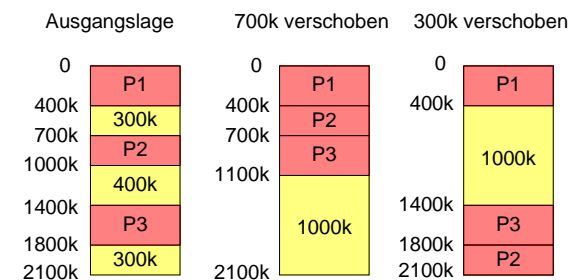
## 2.4 Segmentierung (3)

- Hardware wird MMU (*Memory Management Unit*) genannt
- Schutz vor Segmentübertretung
  - ◆ Unterbrechung zeigt Speicherletzung an
  - ◆ Programme und Betriebssystem voneinander 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*)

## 2.5 Kompaktifizieren

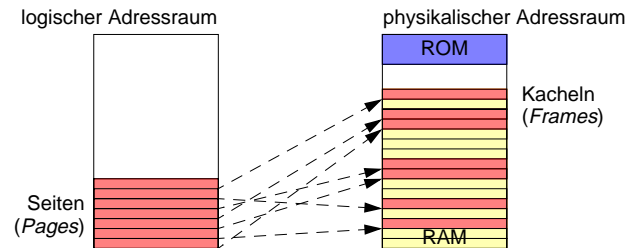
### Verschieben von Segmenten

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



### 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

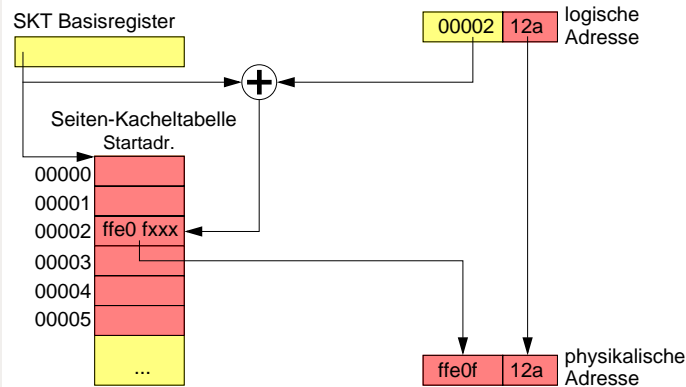


### 3.1 MMU mit Seiten-Kacheltabelle (2)

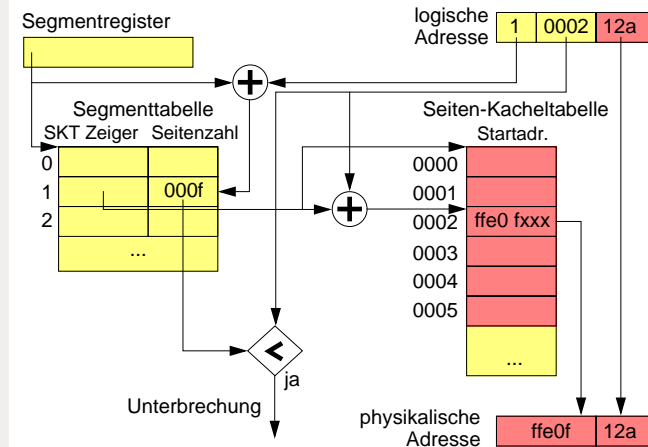
- ▲ Seitenadressierung erzeugt internen Verschchnitt
  - ◆ letzte Seite eventuell nicht vollständig genutzt
- Seitengröße
  - ◆ kleine Seiten verringern internen Verschchnitt, vergrößern aber die Seiten-Kacheltabelle (und umgekehrt)
  - ◆ übliche Größen: 512 Bytes — 8192 Bytes
- ▲ große Tabelle, die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

### 3.1 MMU mit Seiten-Kacheltabelle

- Tabelle setzt Seiten in Kacheln um



### 3.2 Segmentierung und Seitenadressierung

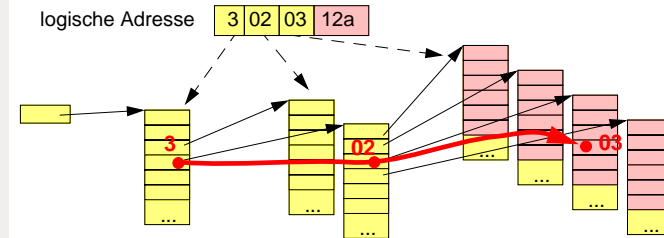


### 3.2 Segmentierung und Seitenadressierung (2)

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

### 3.4 Mehrstufige Seitenadressierung

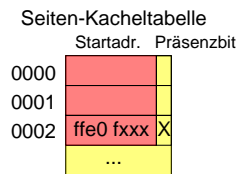
- Beispiel: zweifach indirekte Seitenadressierung



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

### 3.3 Ein- und Auslagerung von Seiten

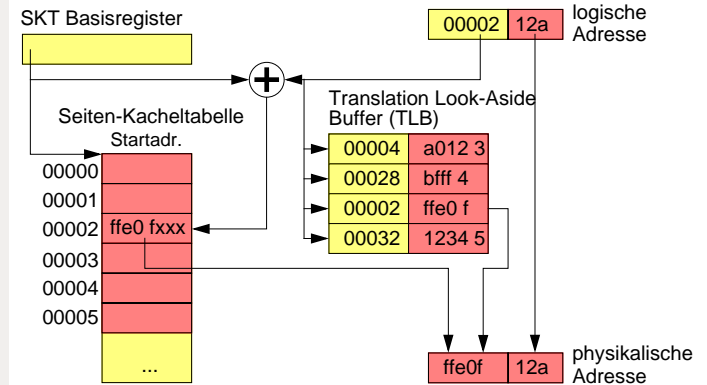
- Es ist nicht nötig ein gesamtes Segment aus- bzw. einzulagern
  - ◆ Seiten können einzeln ein- und ausgelagert werden
- Hardware-Unterstützung



- ◆ 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).

### 3.5 Translation Look-Aside Buffer

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



### 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

### 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

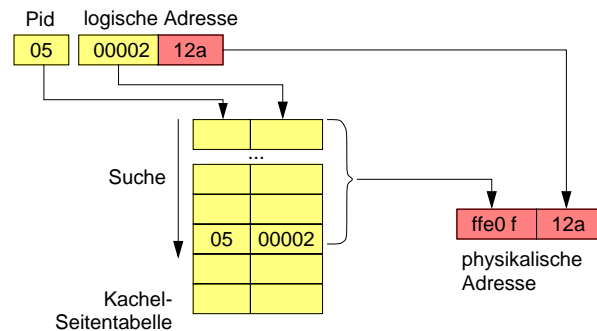
### 3.7 Systemaufruf

- Ermitteln der Seitengröße des Betriebssystems

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

### 3.6 Invertierte Seiten-Kacheltabelle

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

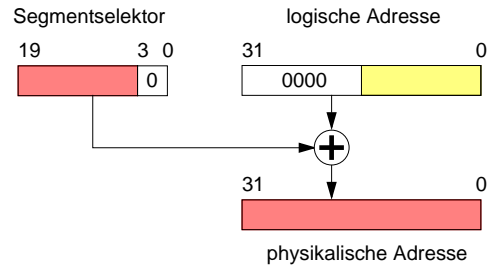


### 4 Fallstudie: Pentium

- 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

## 4.1 Real Mode Adressierung

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



## 4.2 Protected Mode Adressierung (2)

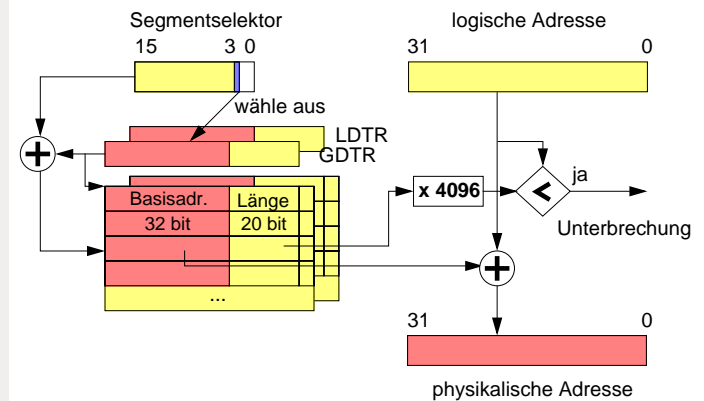
- Deskriptortabelle
  - ◆ enthält bis zu 8192 Segmentdeskriptoren
  - ◆ Inhalt des Segmentdeskriptors:
    - physikalische Basisadresse
    - Längenangabe
    - Granularität (Angaben für Bytes oder Seiten)
    - Präsenzbit
    - Privilegierungsstufe
  - ◆ globale Deskriptortabelle für alle Prozesse zugänglich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

## 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
- Segmentsелеktoren enthalten Privilegierungsstufe
  - ◆ Stufe des Codesegments entscheidet über Zugriffserlaubnis
- Segmentsелеktoren werden als Indizes interpretiert
  - ◆ Tabellen von Segmentdeskriptoren
    - Globale Deskriptor Tabelle
    - Lokale Deskriptor Tabelle

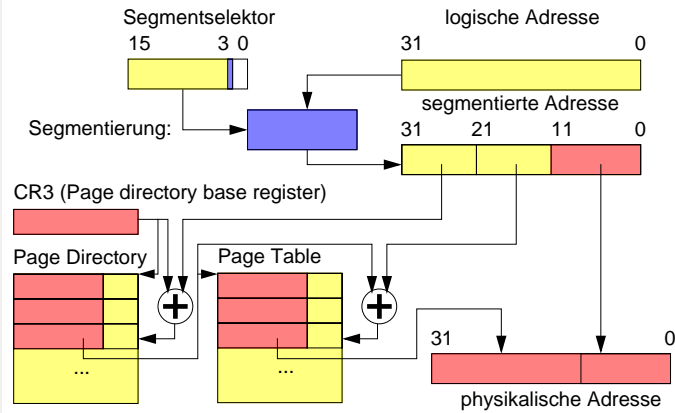
## 4.3 Adressberechnung bei Segmentierung

- Verwendung der Protected mode Adressierung



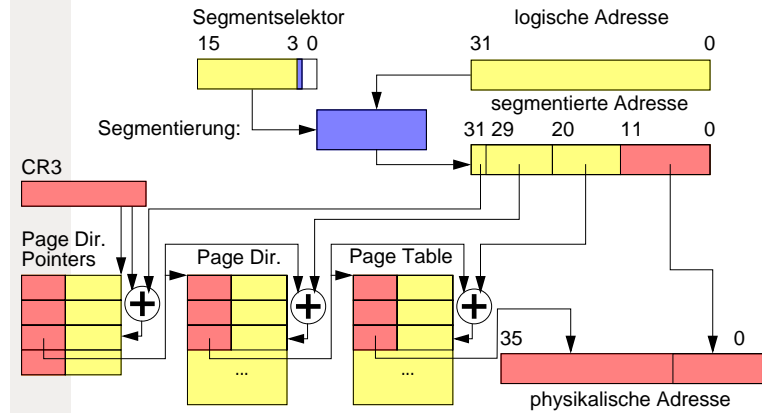
#### 4.4 Adressberechnung bei Paging

- Seitenadressierung wird der Segmentierung nachgeschaltet



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

- Nachgeschaltete dreistufige Seitenadressierung



#### 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

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

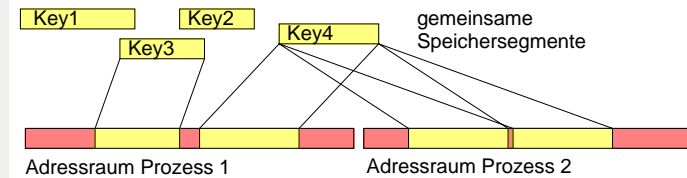
- Ab Pentium Pro
  - vierelementige Tabelle von Page-Directory-Pointers
  - 24 statt 20 Bit breite physikalische Adressumsetzung für den Seitenanfang
  - 64 Bit statt 32 Bit breite Tabelleneinträge
  - spezieller Chipsatz erforderlich
- Adressierbarer Hauptspeicher von 64 GByte

## 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

## 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, ...);
```

## 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 shmids *buf );
```

## 5 Gemeinsamer Speicher (4)

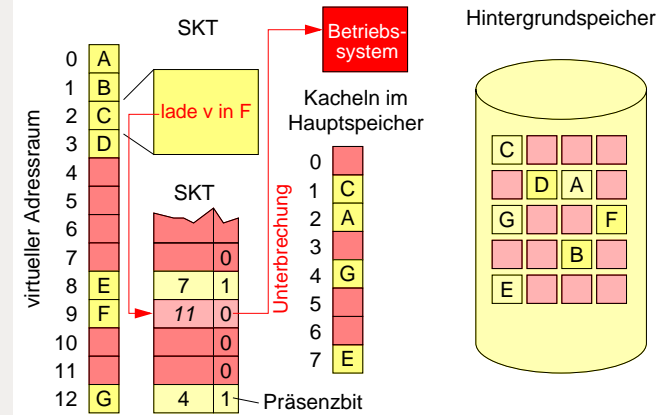
- Verwendung des Keys
  - ◆ Alle Prozesse, die auf ein Speichersegment zugreifen wollen, müssen den Key kennen
  - ◆ Keys sind eindeutig innerhalb eines (Betriebs-)Systems
  - ◆ Ist ein Key bereits vergeben, kann kein Segment mit gleichem Key erzeugt werden
  - ◆ Ist ein Key bekannt, kann auf das Segment 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

## 6 Virtueller Speicher

- Entkopplung 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 benötigter Speicherbereiche
  - ◆ Abfangen von Zugriffen auf nicht-eingeblendete Bereiche
  - ◆ Bereitstellen der benötigten Bereiche auf Anforderung
  - ◆ Auslagern nicht-benötigter Bereiche

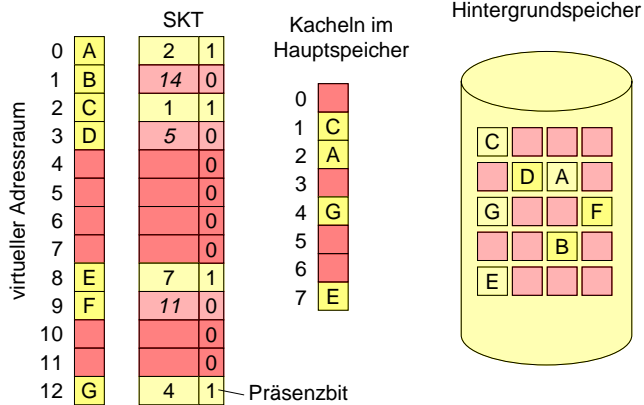
## 6.1 Demand Paging (2)

- Reaktion auf Seitenfehler



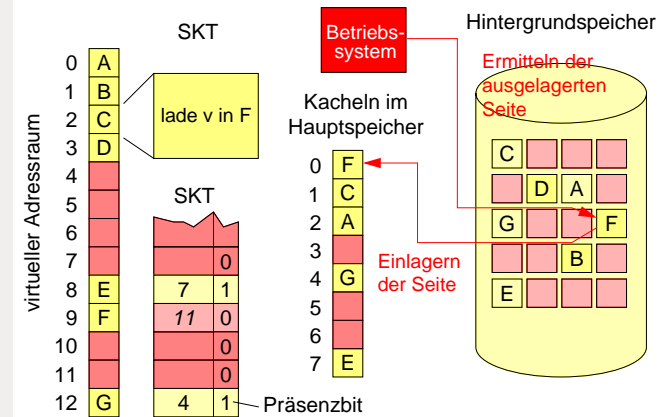
## 6.1 Demand Paging

- Bereitstellen von Seiten auf Anforderung



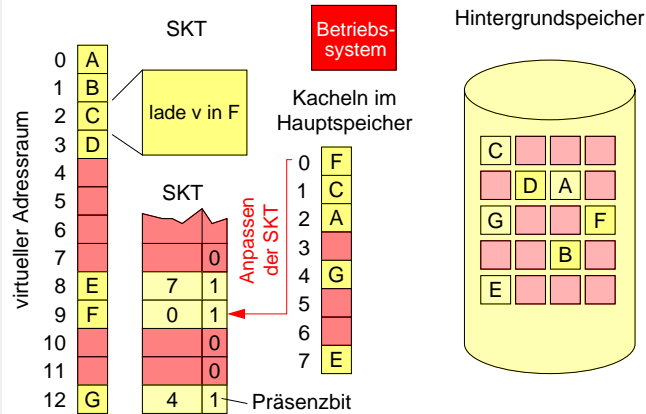
## 6.1 Demand Paging (3)

- Reaktion auf Seitenfehler



## 6.1 Demand Paging (4)

### Reaktion auf Seitenfehler



Systemprogrammierung I

© 1997-2001, Franz J. Hauck, Inf 4, Univ. Erlangen-Nürnberg [E-Memory.fm, 2001-11-08 10:09]  
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlagen, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

E - 55

## 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

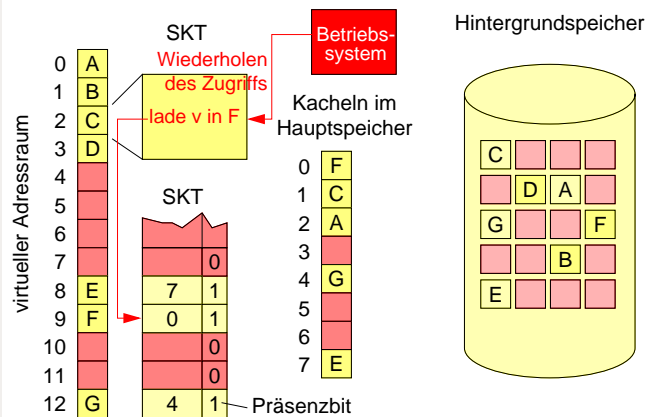
Systemprogrammierung I

© 1997-2001, Franz J. Hauck, Inf 4, Univ. Erlangen-Nürnberg [E-Memory.fm, 2001-11-08 10:09]  
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlagen, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

E - 57

## 6.1 Demand Paging (5)

### Reaktion auf Seitenfehler



Systemprogrammierung I

© 1997-2001, Franz J. Hauck, Inf 4, Univ. Erlangen-Nürnberg [E-Memory.fm, 2001-11-08 10:09]  
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlagen, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

E - 56

## 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?

Systemprogrammierung I

© 1997-2001, Franz J. Hauck, Inf 4, Univ. Erlangen-Nürnberg [E-Memory.fm, 2001-11-08 10:09]  
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlagen, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

E - 58

## 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

## 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)

## 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

## 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	>

## 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

## 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

## 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)

## 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

### 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

### 7.4 Second Chance (Clock)

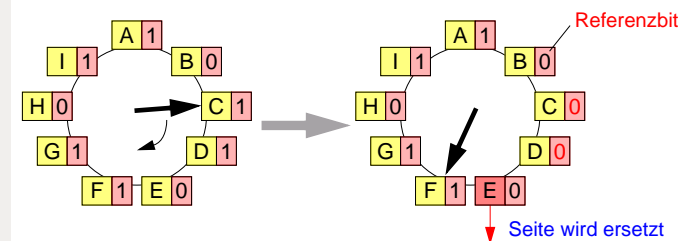
- Einsatz von Referenzbits
  - ◆ Referenzbit im Seitendeskriptor wird automatisch durch Hardware gesetzt, wenn die Seite zugegriffen wird
    - einfacher zu implementieren
    - weniger zusätzliche Speicherzugriffe
    - moderne Prozessoren bzw. MMUs unterstützen Referenzbits (z.B. Pentium: *Access bit*)
- 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

### 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

### 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

## 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

## 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)

## 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 (Referenzbits)	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

## 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 Freiseitenpuffer ausgetragen und wieder dem entsprechenden Prozess zugeordnet.



## 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

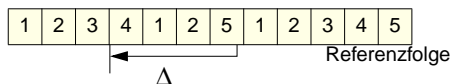
## 8.2 Arbeitsmengenmodell (2)

- Beispiel: Arbeitsmengen bei verschiedenen  $\Delta$

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
	Seite 4				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

## 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  $\Delta$  Seiten, die angesprochen wurden
  - ◆ geeignete Wahl von  $\Delta$ 
    - zu groß: Überlappung von lokalen Zugriffsmustern zu klein: Arbeitsmenge enthält nicht alle nötigen Seiten



- **Hinweis:**  $\Delta >$  Arbeitsmenge, da Seiten in der Regel mehrfach hintereinander angesprochen werden

## 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

### 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 >  $\Delta$  sind nicht mehr in der Arbeitsmenge des jeweiligen Prozesses

### 8.4 Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock

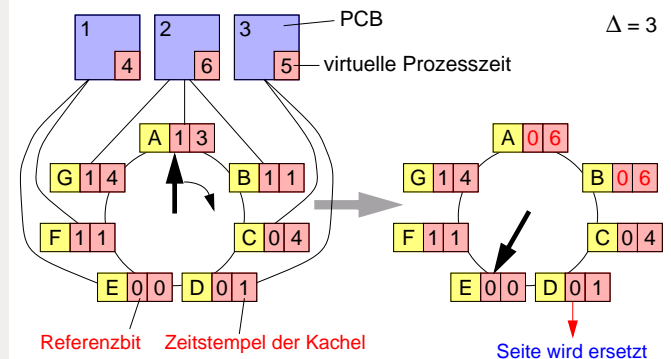
- Algorithmus WSClock (Working set clock)
  - ◆ arbeitet wie Clock
  - ◆ Seite wird nur dann ersetzt, wenn sie nicht zur Arbeitsmenge ihres Prozesses gehört oder der Prozess deaktiviert ist
  - ◆ Bei Zurücksetzen des Referenzbits wird die virtuelle Zeit des jeweiligen Prozesses eingetragen, die z.B.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

### 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

### 8.4 Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock (2)

#### ■ WSClock Algorithmus



## 8.5 Probleme mit Arbeitsmengen

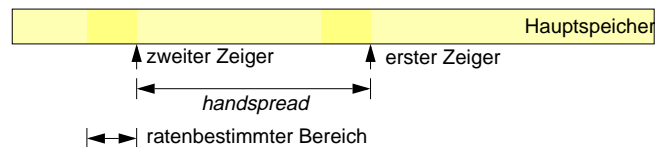
- ▲ Zuordnung zu einem Prozess nicht immer möglich
  - ◆ gemeinsam genutzte Seiten in modernen Betriebssystemen eher die Regel als die Ausnahme
    - Seiten des Codesegments
    - Shared libraries
    - Gemeinsame Seiten im Datensegment (*Shared memory*)
- ★ moderne System bestimmen meist eine globale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

## 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*)

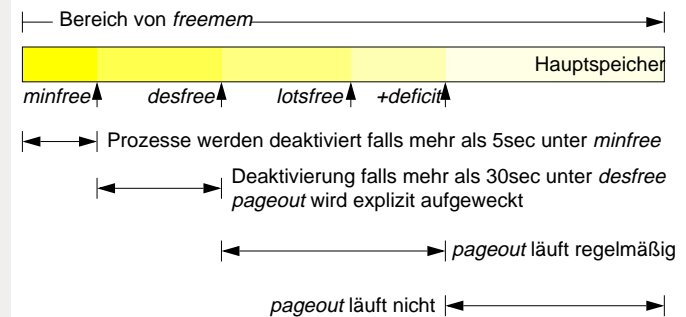
## 8.6 Ersetzungsstrategie bei Solaris

- 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*)



## 8.6 Ersetzungsstrategie bei Solaris (3)

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

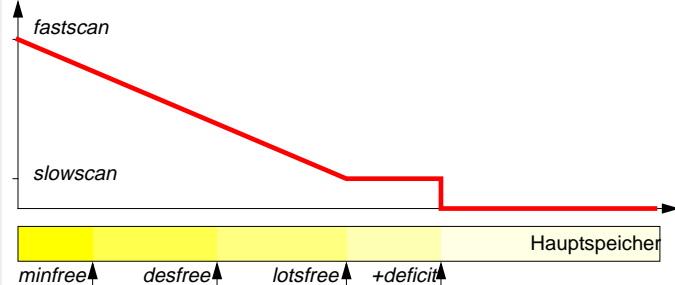


- ◆ *deficit* wird dynamisch ermittelt (0 bis *lotsfree*) und auf *lotsfree* addiert
  - entspricht Vorschau auf künftige große Speicheranforderungen

## 8.6 Ersetzungsstrategie bei Solaris (4)

### ■ Seitenuntersuchungsrate des *pageout* Prozesses

Seiten pro Sekunde



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

## 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*:  $\min(1/4 \text{ Hauptspeicher}, 64 \text{ MByte})$  pro Sekunde (Solaris 2.4)
- ◆ *slowscan*: 800 kBytes pro Sekunde (Solaris 2.4)
- ◆ *handspread*: wie *fastscan* (Solaris 2.4)

## 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

## 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 Monoprocessorvariante) unter Berücksichtigung von Prozessklassen
- ◆ prozessspezifische Konfiguration der Arbeitsmenge durch Anwender