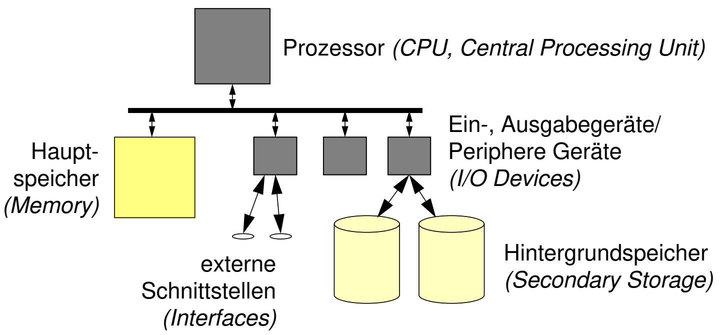
E Speicherverwaltung

E Speicherverwaltung

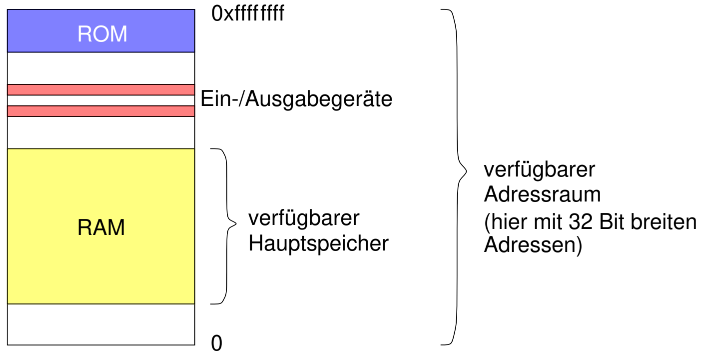
- Betriebsmittel



1 Speichervergabe

1.1 Problemstellung

- Verfügbarer Speicher



1.1 Problemstellung (2)

- Belegung des verfügbaren Hauptspeichers durch
  - ◆ Benutzerprogramme
    - – Programmbefehle (Code, Binary)
    - – Programmdaten
  - ◆ Betriebssystem
    - – Betriebssystemcode
    - – Puffer
    - – Systemvariablen

★ Zuteilung des Speichers nötig

1.2 Statische Speicherzuteilung

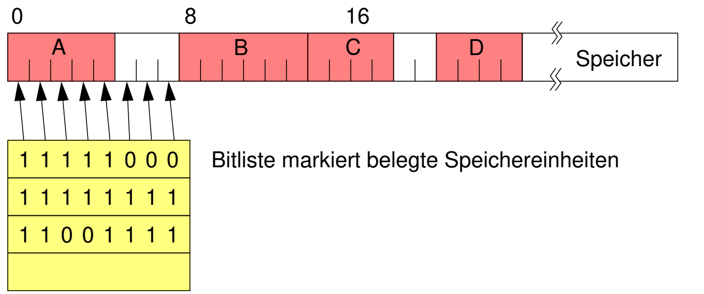
- Feste Bereiche für Betriebssystem und Benutzerprogramm
- Probleme:
  - Begrenzung anderer Ressourcen (z.B. Bandbreite bei Ein-/Ausgabe wg. zu kleiner Systempuffer)
  - Ungenutzter Speicher des Betriebssystems kann von Anwendungsprogramm nicht genutzt werden und umgekehrt
- ★ Dynamische Speicherzuteilung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

1.3 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

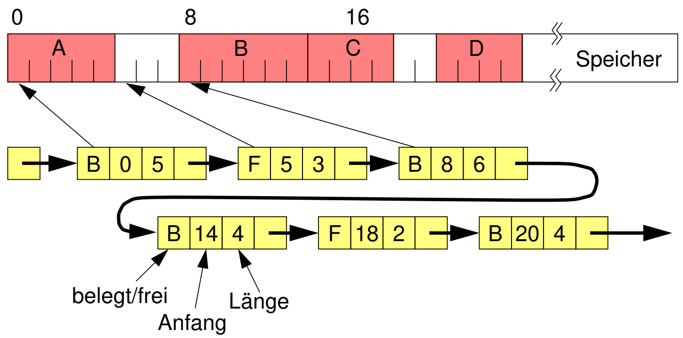
- Freie (evtl. auch belegte) Segmente des Speichers müssen repräsentiert werden
- Bitlisten



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

1.4 Freispeicherverwaltung (2)

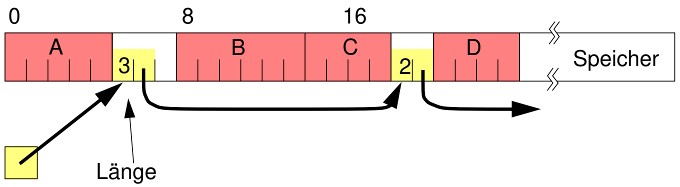
- Verkettete Liste



Repräsentation auch von freien Segmenten

1.4 Freispeicherverwaltung (3)

- Verkettete Liste in dem freien Speicher

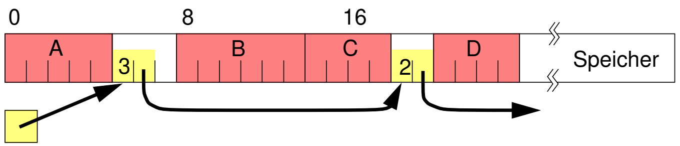


Mindestlückengröße muss garantiert werden

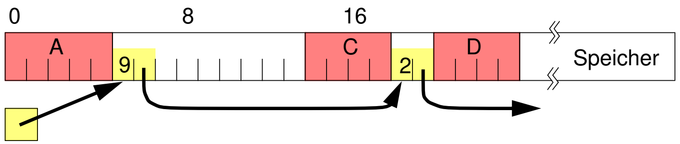
- Zur Effizienzsteigerung eventuell Rückwärtsverkettung nötig
- Repräsentation letztlich auch von der Vergabestrategie abhängig

1.5 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

1.7 Buddy Systeme

- Einteilung in dynamische Bereiche der Größe 2^n

<table>
<tr><td></td><td colspan="2">0</td><td colspan="2">128</td><td colspan="2">256</td><td colspan="2">384</td><td colspan="2">512</td><td colspan="2">640</td><td colspan="2">768</td><td colspan="2">896 1024</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="16">1024</td></tr>
<tr><td>Anfrage 70</td><td colspan="2">A</td><td colspan="2">128</td><td colspan="4">256</td><td colspan="8">512</td></tr>
<tr><td>Anfrage 35</td><td colspan="2">A</td><td>B</td><td>64</td><td colspan="4">256</td><td colspan="8">512</td></tr>
<tr><td>Anfrage 80</td><td colspan="2">A</td><td>B</td><td>64</td><td colspan="2">C</td><td colspan="2">128</td><td colspan="8">512</td></tr>
<tr><td>Freigabe A</td><td colspan="2">128</td><td>B</td><td>64</td><td colspan="2">C</td><td colspan="2">128</td><td colspan="8">512</td></tr>
<tr><td>Anfrage 60</td><td colspan="2">128</td><td>B</td><td>D</td><td colspan="2">C</td><td colspan="2">128</td><td colspan="8">512</td></tr>
<tr><td>Freigabe B</td><td colspan="2">128</td><td>64</td><td>D</td><td colspan="2">C</td><td colspan="2">128</td><td colspan="8">512</td></tr>
<tr><td>Freigabe D</td><td colspan="4">256</td><td colspan="2">C</td><td colspan="2">128</td><td colspan="8">512</td></tr>
<tr><td>Freigabe C</td><td colspan="16">1024</td></tr>
</table>

Effiziente Repräsentation der Lücken und effiziente Algorithmen

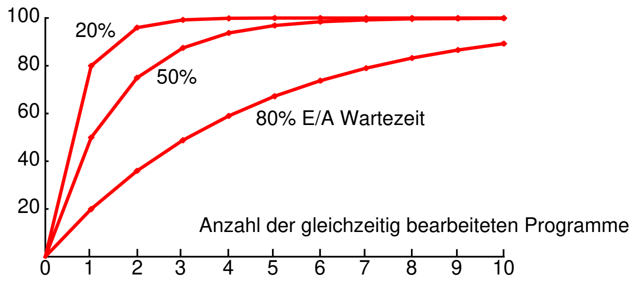
1.8 Einsatz der Verfahren

- 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)*

2 Mehrprogrammbetrieb

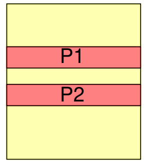
2.1 Problemstellung

- 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



zwei Prozesse und deren Codesegmente im Speicher

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

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 (2)

- Compilevorgang (Erzeugung der Relokationsinformation)

test.c – C-Programm

```
int main()
{
    exit(0);
}
```

test.s – Assembler

```
main:
 pushl %ebp
 movl %esp,%ebp
 pushl $0
 call exit
 addl $4,%esp
 movl  %ebp,%esp
 popl %ebp
 ret
```

test.o – Bindemodul

```
0000 55
0001 89E5
0003 6A00
0005 E800000000
000a 83C404
000d 89EC
000f 5D
0010 C3

main: 0

0006: exit ADDR32
```

Erzeugung beim Compilevorgang

ersetze Adresse von exit

2.2 Relokation (3)

- Binde- und Ladevorgang

test.o – Bindemodul

```
0000 55
0001 89E5
0003 6A00
0005 E800000000
000a 83C404
000d 89EC
000f 5D
0010 C3

main: 0

0006: exit ADDR32
```

ersetze Adresse von exit

test – Lademodul

```
...
0030 55
0031 89E5
0033 6A00
0035 E848010000
003a 83C404
003d 89EC
003f 5D
0040 C3
...

0036: ADDR32 TXT
```

ersetze Adresse relativ zum Befehlssegment

Prozess – Speicherabbild

```
...
2130 55
2131 89E5
2133 6A00
2135 E848220000
213a 83C404
213d 89EC
213f 5D
2140 C3
...
```

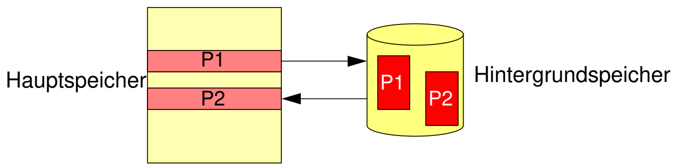
Adresse ist nun absolut
Befehlssegment: 2100

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 (*Swapping*)

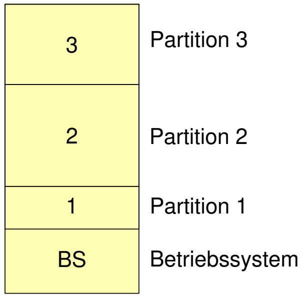
- Segmente eines Prozesses werden auf Hintergrundspeicher ausgelagert und im Hauptspeicher freigegeben
  - ◆ z.B. zur Überbrückung von Wartezeiten bei E/A oder Round-Robin Schedulingstrategie
- Einlagern der Segmente in den Hauptspeicher am Ende der Wartezeit



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

2.3 Ein-, Auslagerung (2)

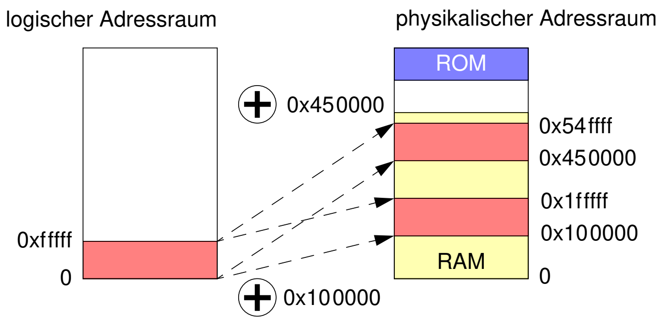
- Prozess ist statisch gebunden
  - kann nur an gleiche Stelle im Hauptspeicher wieder eingelagert werden
  - Kollisionen mit eventuell neu im Hauptspeicher befindlichen Segmenten
- Mögliche Lösung: Partitionierung des Hauptspeichers



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

2.4 Segmentierung

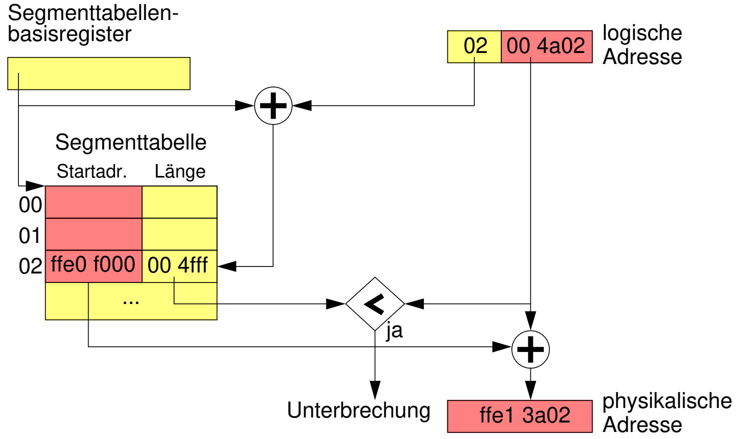
- Hardwareunterstützung: Umsetzung logischer in physikalische Adressen
  - Prozesse erhalten einen logischen Adressraum



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

2.4 Segmentierung (2)

- Realisierung mit Übersetzungstabelle



2.4 Segmentierung (3)

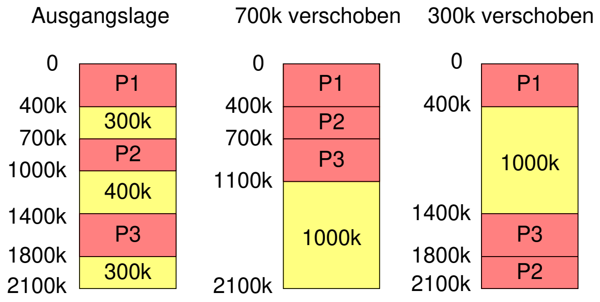
- Hardware wird MMU *(Memory Management Unit)* genannt
- Schutz vor Segmentübertretung
  - Unterbrechung zeigt Speicherverletzung an
  - Programme und Betriebssystem voreinander geschützt
- Prozessumschaltung durch Austausch der Segmentbasis
  - jeder Prozess hat eigene Übersetzungstabelle
- Ein- und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

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

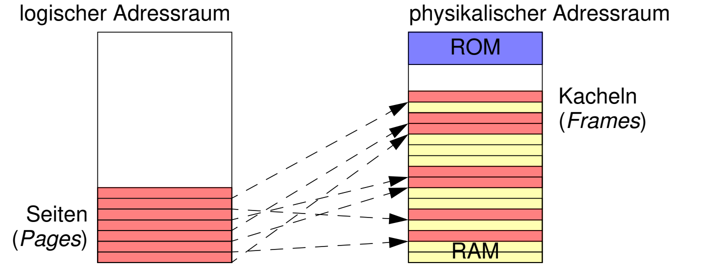
2.5 Kompaktifizieren

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



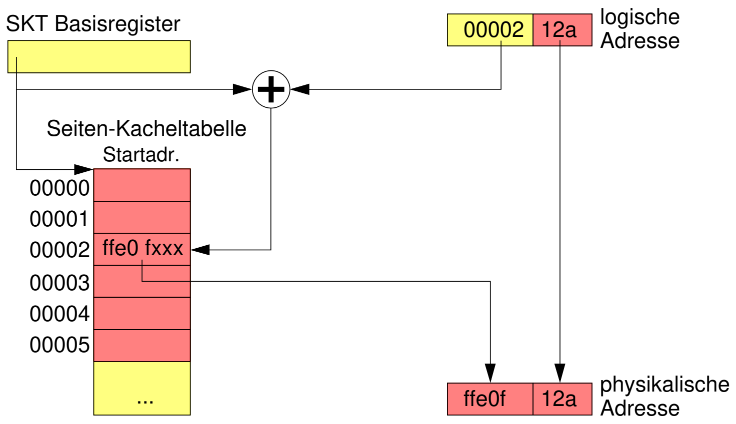
3 Seitenadressierung (*Paging*)

- 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

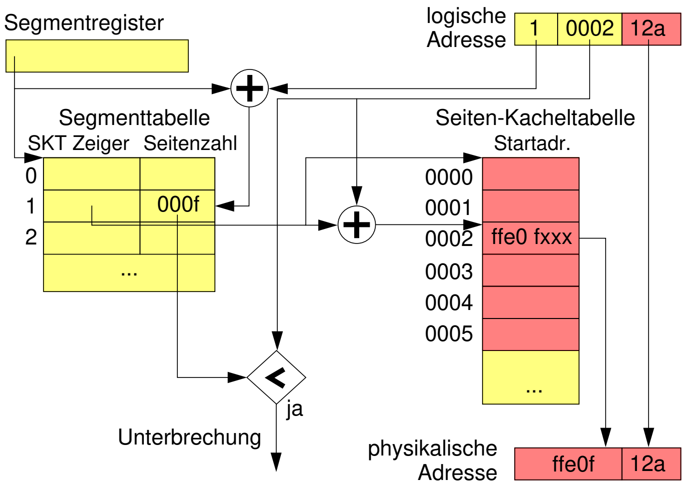
- Tabelle setzt Seiten in Kacheln um



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

3.2 Segmentierung und Seitenadressierung

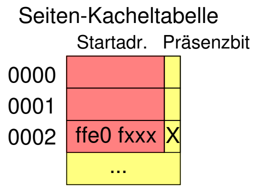


3.2 Segmentierung und Seitenadressierung (2)

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

3.3 Ein- und Auslagerung von Seiten

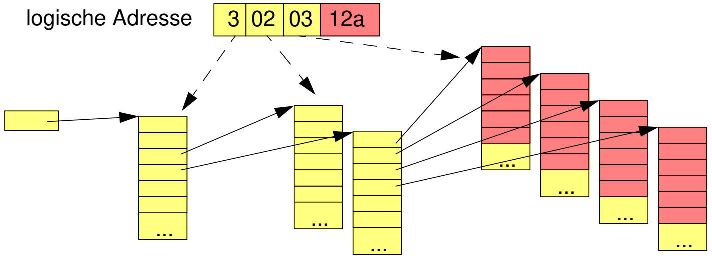
- Es ist nicht nötig ein gesamtes Segment aus- bzw. einzulagern
  - Seiten können einzeln ein- und ausgelagert werden
- Hardware-Unterstützung



- 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).

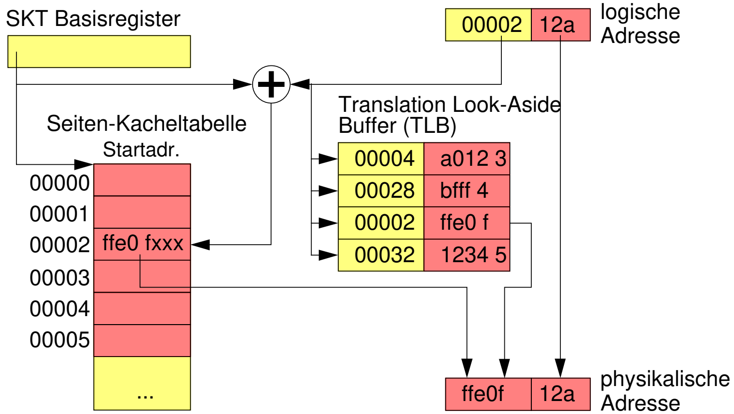
3.4 Mehrstufige Seitenadressierung

- Beispiel: zweifach indirekte Seitenadressierung



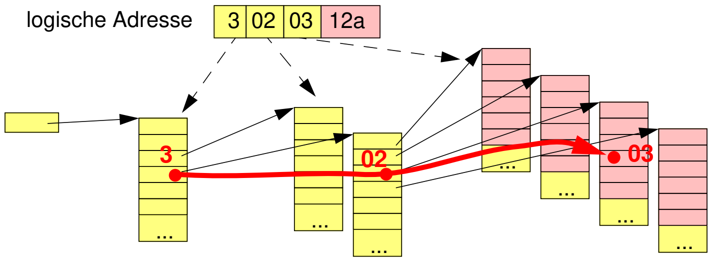
3.5 Translation Look-Aside Buffer

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



3.4 Mehrstufige Seitenadressierung

- Beispiel: zweifach indirekte Seitenadressierung



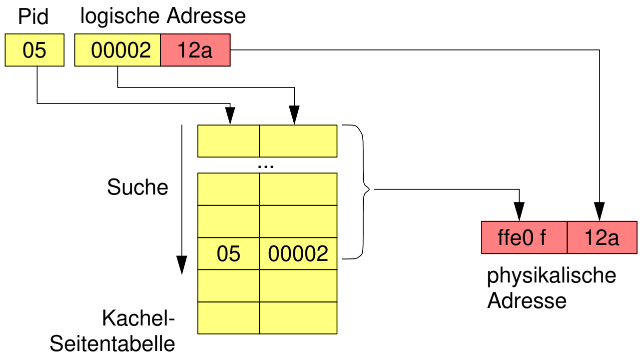
- Präsenzbit auch für jeden Eintrag in den höheren Stufen
  - Tabellen werden aus- und einlagerbar
- ▲ Noch mehr implizite Speicherzugriffe

3.5 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

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



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

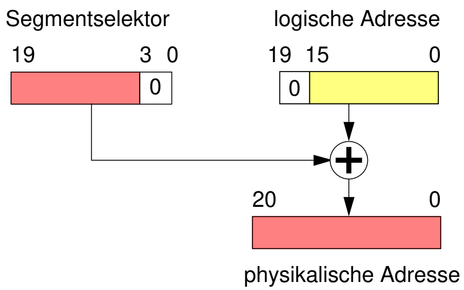
```
int getpagesize(void);
```


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 Segmentselektor wird als 20 bit breite Adresse interpretiert und auf die logische Adresse addiert



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

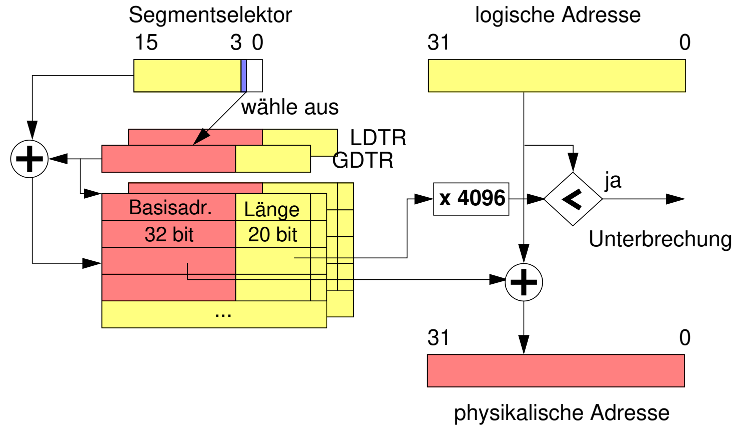
  - ◆ Speicherverwaltung kann nur in Stufe 0 konfiguriert werden
- Segmentselektoren enthalten Privlegierungsstufe
  - ◆ Stufe des Codesegments entscheidet über Zugriffserlaubnis
- Segmentselektoren werden als Indizes interpretiert
  - ◆ Tabellen von Segmentdeskriptoren
    - Globale Deskriptor Tabelle
    - Lokale Deskriptor Tabelle

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)

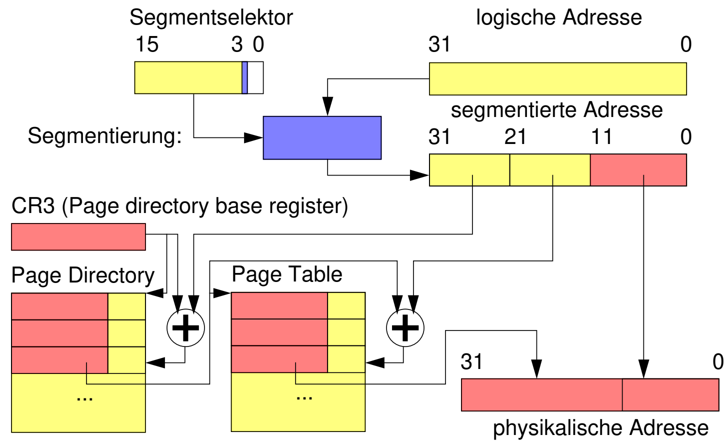
4.3 Adressberechnung bei Segmentierung

- Verwendung der Protected mode Adressierung



4.4 Adressberechnung bei Paging

- Seitenadressierung wird der Segmentierung nachgeschaltet

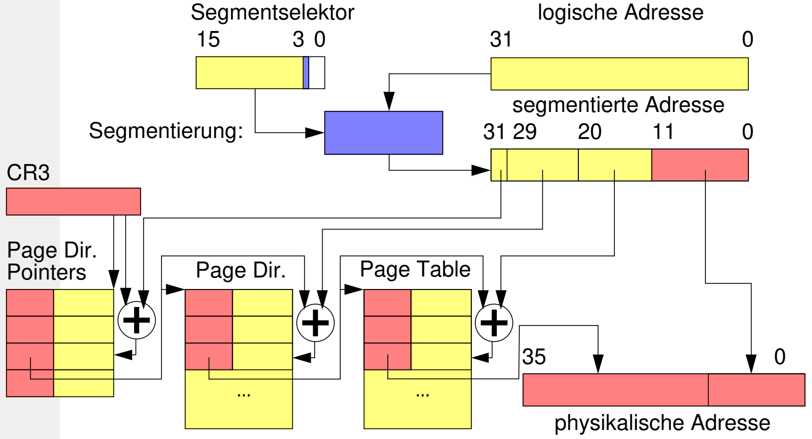


4.4 Adressberechnung bei Paging (2)

- 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 Datensegment
  - 64 Einträge für Datenseiten; 32 Einträge für Codeseiten

4.5 Physical-Address-Extension (PAE)

- Nachgeschaltete dreistufige Seitenadressierung



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 (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

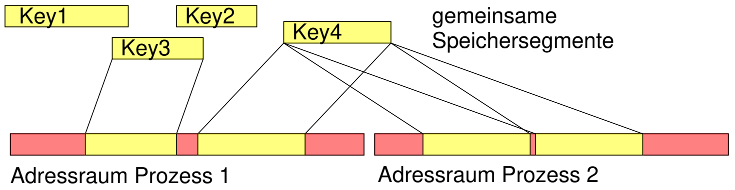
```
void *shmat( int shmid, void *shmaddr, int shmflg );
int shmdt( void *shmaddr );
```

  - Kontrolloperation

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


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 (4)

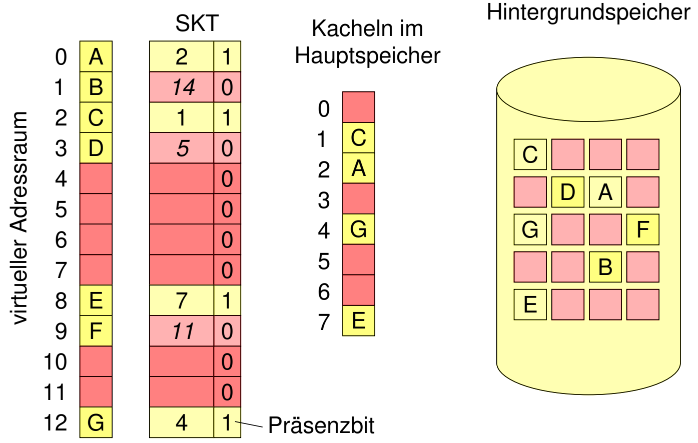
- Verwendung des Keys
  - Alle Prozesse, die auf ein Speichersegment zugreifen wollen, müssen den Key kennen
  - Keys sind eindeutig innerhalb eines (Betriebs-)Systems
  - Ist ein Key bereits vergeben, kann kein Segment mit gleichem Key erzeugt werden
  - Ist ein Key bekannt, kann auf das Segment zugegriffen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

- 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

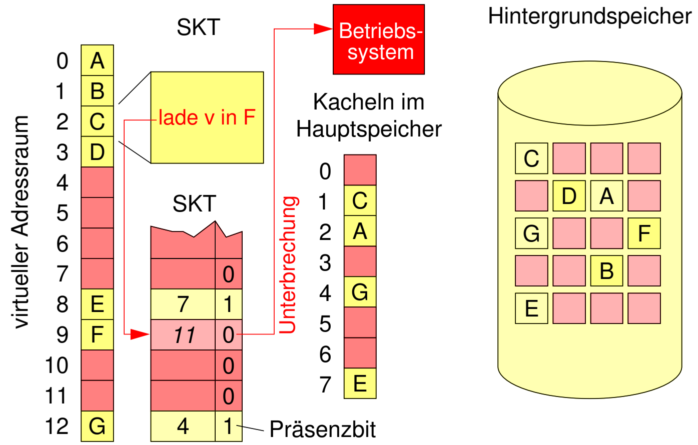
6.1 Demand Paging

- Bereitstellen von Seiten auf Anforderung



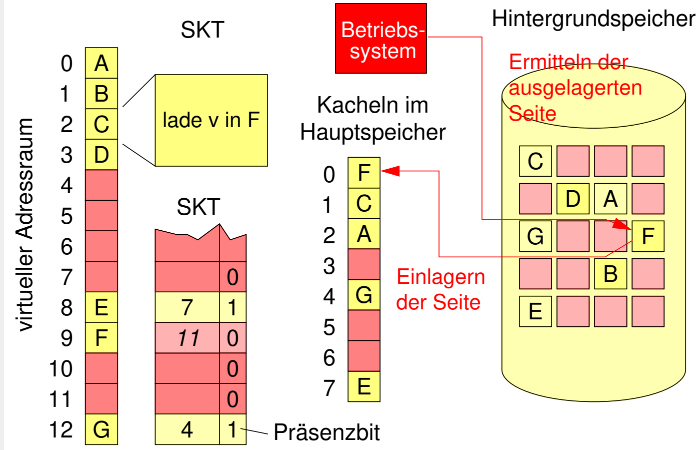
6.1 Demand Paging (2)

- Reaktion auf Seitenfehler



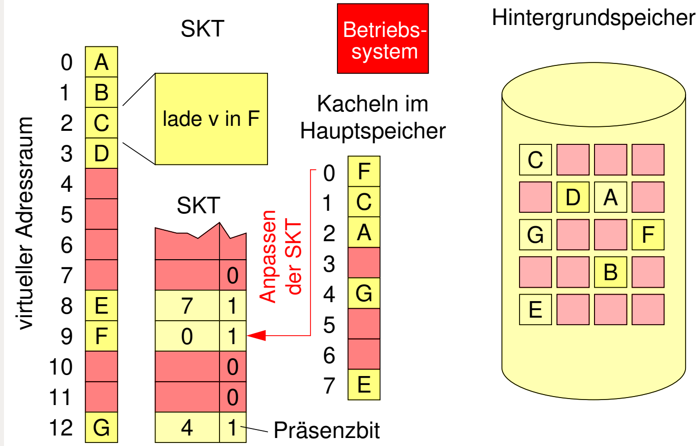
6.1 Demand Paging (3)

- Reaktion auf Seitenfehler



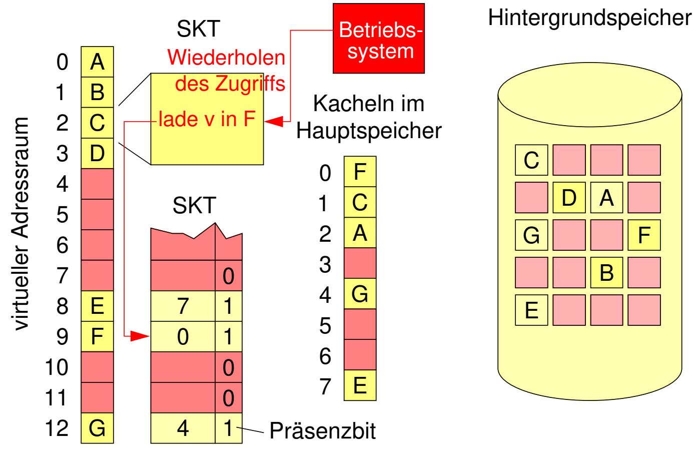
6.1 Demand Paging (4)

- Reaktion auf Seitenfehler



6.1 Demand Paging (5)

- Reaktion auf Seitenfehler



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

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?

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