

# Systemprogrammierung

## Speicherverwaltung: Adressraumkonzepte

Wolfgang Schröder-Preikschat

Lehrstuhl Informatik 4

28. Juni 2011

### Gliederung

#### 1 Grundlagen

- Fragmente
- Zuteilungseinheiten
- Strategien

#### 2 Adressräume

- Überblick
- Physikalischer Adressraum
- Logischer Adressraum
- Virtueller Adressraum

#### 3 Zusammenfassung

## Herangehensweisen zur Verwaltung des Arbeitsspeichers

Fest abgesteckte oder ausdehn-/zusammenziehbare Gebiete für jedes Programm

- |           |  |
|-----------|--|
| statisch  | <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Arbeitsspeichergebiete</b> maximaler, fester Größe<ul style="list-style-type: none"><li>• je eins pro Prozessaddressraum inkl. dem Betriebssystem</li><li>• innerhalb der Gebiete ist Speicher dynamisch zuteilbar</li></ul></li><li>• Gefahr von Leistungsbegrenzung/-verluste, z.B.:<ul style="list-style-type: none"><li>• Brache eines Gebiets in anderen Gebieten nicht nutzbar</li><li>• kleine E/A-Bandbreite mangels Puffer im Gebiet des BS</li><li>• erhöhte Wartezeit von Prozessen wegen zu kl. Puffern</li></ul></li></ul> |
| dynamisch | <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Arbeitsspeicherfragmente</b> variabler Größe<ul style="list-style-type: none"><li>• ggf. mehrere pro Prozessaddressraum inkl. Betriebssystem</li><li>• das Betriebssystem ermittelt freie Bereiche und teilt sie zu</li></ul></li><li>• Zusammenspiel Laufzeit- und Betriebssystem<ul style="list-style-type: none"><li>• d.h., von malloc(3) und z.B. brk(2)</li></ul></li></ul>   |

### Fragment: „Bruchstück“ eines (log./virt.) Prozessaddressraums

- ein im Arbeitsspeicher abzulegendes Teil von Programmtext/-daten
- die Zuteilungseinheiten können in beiden Weisen gleich ausgelegt sein

## Hardwarevorgaben und Verschnitt

Zuteilungseinheiten als Vielfaches von Bytes oder Seitenrahmen

Aufbau und Struktur der zuteilungsfähigen Fragmente im Arbeitsspeicher unterscheidet sich je nach zu Grunde liegender **Adressraumausprägung**

### Seitennummerierung

- Fragment  $\mapsto$  **Vielfaches von Seitenrahmen**
- ggf. wird mehr Speicher als benötigt zugewiesen
- **interne Fragmentierung** des Seitenrahmens

### Segmentierung

- Fragment  $\mapsto$  **Vielfaches von Bytes**  $\sim$  Segment
- ggf. ist ein passendes Stück nicht verfügbar
- **externe Fragmentierung** des Arbeitsspeichers

**Verschnitt** (als Folge in/externer Fragmentierung) zu **optimieren**, ist eine der zentralen Aufgaben der Speicherverwaltung

**anfallender Rest** bei der Speicherzuteilung allgemein

- „Abfall“ im Falle interner Fragmentierung
- „Hohlräume“ im Falle externer Fragmentierung

## Politiken bei der Speicherverwaltung

Speicherzuteilungsverfahren ..... obligatorisch

### Platzierungsstrategie (engl. *placement policy*)

- **wohin** im Arbeitsspeicher ist ein Fragment abzulegen?
  - dorthin, wo der Verschnitt am kleinsten/größten ist?
  - oder ist es egal, weil Verschnitt zweitrangig ist?

Spechervirtualisierung ..... optional

### Ladestrategie (engl. *fetch policy*)

- **wann** ist ein Fragment in den Arbeitsspeicher zu laden?
  - im Moment der Anforderung durch einen Prozess?
  - oder im Voraus, auf Grund von Vorabwissen oder Schätzungen?

### Ersetzungsstrategie (engl. *replacement policy*)

- **welches** Fragment ist ggf. aus den Arbeitsspeicher zu verdrängen?
  - das älteste, am seltensten genutzte oder am längsten ungenutzte?

## Grundlagen der Rechnerarchitektur, 2. Semester

Ergänzung, Verfeinerung bzw. Vertiefung von GRA



- Kap. 5 Schnittstelle zum Betriebssystem [1], speziell...
  - ✓ Speicherverwaltung
  - ✓ Paging
  - ✓ Segmentierung

... beleuchtet im Kontext der Maschinenprogrammebene, genauer:

- Artefakte der Hardware
- Abstraktion durch ein Betriebssystem

## Gliederung

### 1 Grundlagen

- Fragmente
- Zuteilungseinheiten
- Strategien

### 2 Adressräume

- Überblick
- Physikalischer Adressraum
- Logischer Adressraum
- Virtueller Adressraum

### 3 Zusammenfassung

## Betriebssystemsicht von Adressraumarten

### physikalischer Adressraum

- **nicht linear** adressierbarer E/A- und Speicherbereich, dessen Größe der Adressbreite der CPU entspricht
  - $2^N$  Bytes, bei einer Adressbreite von  $N$  Bits
  - von Lücken durchzogen  $\leadsto$  ungültige Adressen

### logischer Adressraum

- **linear** adressierbarer Speicherbereich von  $2^M$  Bytes bei einer Adressbreite von  $M$  Bits
  - $M = N$  z.B. im Fall einer *Harvard-Architektur*<sup>1</sup>
  - $M < N$  sonst

### virtueller Adressraum

- logischer Adressraum, der  $2^K$  Bytes umfasst
  - $K > N$  bei Speicherbankumschaltung, Überlagerungstechnik
  - $K \leq N$  sonst

<sup>1</sup>Getrennter Programm-, Daten- und E/A-Adressraum.

## Beispiel einer Adressraumorganisation

Adressenbelegung (engl. *address assignment*)

Adressbereich	Größe (KB)	Verwendung
00000000–0009ffff	640	RAM (System)
000a0000–000bffff	128	Video RAM
000c0000–000c7fff	32	BIOS Video RAM
000c8000–000dffff	96	keine
000e0000–000effff	64	BIOS Video RAM ( <i>shadow</i> )
000f0000–000fffff	64	BIOS RAM ( <i>shadow</i> )
00100000–090fffff	147456	RAM (Erweiterung)
09100000–ffffdfffff	4045696	keine
ffffe0000–fffffeffff	64	SM-RAM ( <i>system management</i> )
fffff0000–ffffffffff	64	BIOS ROM

Toshiba Tecra 730CDT, 1996

## Reservierte Adressen

Zugriff ~ Schutzfehler (engl. *protection fault*)

Adressbereich	Größe (KB)	Verwendung
00000000–0009ffff	640	RAM (System)
000a0000–000bffff	128	Video RAM
000c0000–000c7fff	32	BIOS Video RAM
000c8000–000dffff	96	keine
000e0000–000effff	64	BIOS Video RAM ( <i>shadow</i> )
000f0000–000fffff	64	BIOS RAM ( <i>shadow</i> )
00100000–090fffff	147456	RAM (Erweiterung)
09100000–ffffdfffff	4045696	keine
ffffe0000–fffffeffff	64	SM-RAM ( <i>system management</i> )
fffff0000–ffffffffff	64	BIOS ROM

Toshiba Tecra 730CDT, 1996

## Ungültige Adressen

Zugriff ~ Busfehler (engl. *bus error*)

Adressbereich	Größe (KB)	Verwendung
00000000–0009ffff	640	RAM (System)
000a0000–000bffff	128	Video RAM
000c0000–000c7fff	32	BIOS Video RAM
000c8000–000dffff	96	keine
000e0000–000effff	64	BIOS Video RAM ( <i>shadow</i> )
000f0000–000fffff	64	BIOS RAM ( <i>shadow</i> )
00100000–090fffff	147456	RAM (Erweiterung)
09100000–ffffdfffff	4045696	keine
ffffe0000–fffffeffff	64	SM-RAM ( <i>system management</i> )
fffff0000–ffffffffff	64	BIOS ROM

Toshiba Tecra 730CDT, 1996

## Freie Adressen

Hauptspeicher (engl. *main memory*)

Adressbereich	Größe (KB)	Verwendung
00000000–0009ffff	640	RAM (System)
000a0000–000bffff	128	Video RAM
000c0000–000c7fff	32	BIOS Video RAM
000c8000–000dffff	96	keine
000e0000–000effff	64	BIOS Video RAM ( <i>shadow</i> )
000f0000–000fffff	64	BIOS RAM ( <i>shadow</i> )
00100000–090fffff	147456	RAM (Erweiterung)
09100000–ffffdfffff	4045696	keine
ffffe0000–fffffeffff	64	SM-RAM ( <i>system management</i> )
fffff0000–ffffffffff	64	BIOS ROM

Toshiba Tecra 730CDT, 1996

## Segmentierung durch die Maschinenprogrammebene

Logische Unterteilung von Prozessadressräumen

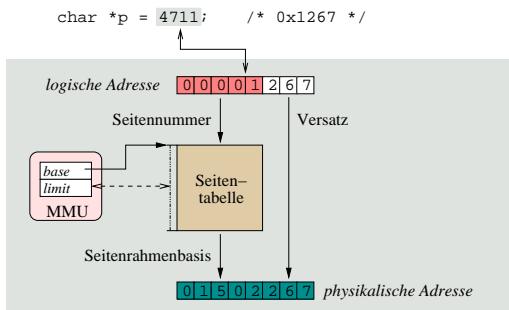
- Ebene 4-Programme sind in (mind.) zwei Segmente logisch aufgeteilt:
  - Text** • Maschinenanweisungen, Programmkonstanten
  - Daten** • initialisierte Daten, globale Variablen, Halde
- Ebene 3-Programme kennen (mind.) ein weiteres Segment:
  - Stapel** • lokale Variablen, Hilfsvariablen, aktuelle Parameter

Betriebssysteme verwalten diese Segmente im phys. Adressraum

- ggf. mit Hilfe einer MMU (engl. *memory management unit*)
  - Hardware, die nur logische in physikalische Adressen umsetzt
  - für die Verwaltung des Speichers ist das Betriebssystem verantwortlich
- die MMU legt eine **Organisationsstruktur** auf den phys. Adressraum
  - sie unterteilt ihn in Seiten fester oder Segmente variabler Länge

## Adressumsetzung: seitenorientiert

Seitennummerierter Adressraum (engl. *paged address space*)



- Seitennummer** ist Index in **Seitentabelle**
  - pro Prozess
  - dimensioniert durch die MMU
- ungültiger Index** führt zum **Trap**

- die indizierte Adressierung (der MMU) liefert einen **Seitendeskriptor**
  - enthält die **Seitenrahmennummer**, die die Seitennummer ersetzt
  - entspricht der **Basisadresse des Seitenrahmens** im phys. Adressraum
- setzen der Basis-/Längenregister der MMU ~ Adressraumwechsel

## Ausprägungen von Prozessdressräumen

Seitennummerierter oder segmentierter Adressraum

**eindimensional** in **Seiten** aufgeteilt (engl. *paged*)

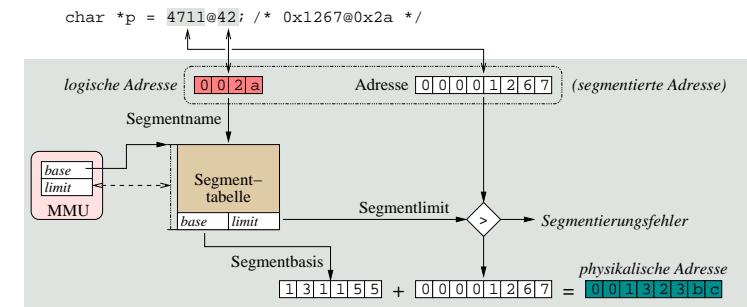
- eine Programmadresse  $A_P$  bildet ein Tupel  $(p, o)$ :
  - $p = A_P \text{ div } 2^N \sim$  Seitennummer (engl. *page number*)
  - $o = A_P \text{ mod } 2^N \sim$  Versatz (engl. *byte offset*)
  - mit  $2^N$  gleich der Seitengröße (engl. *page size*) in Bytes
- Seite  $\mapsto$  **Seitenrahmen** (auch: Kachel) des phys. Adressraums

**zweidimensional** in **Segmente** aufgeteilt (engl. *segmented*)

- eine Programmadresse  $A_S$  bildet ein Paar  $(S, A)$ 
  - mit der Adresse  $A$  relativ zu Segment(name/nummer)  $S$
  - bei Seitennummerierten Segmenten wird  $A$  als  $A_P$  interpretiert
- Segment  $\mapsto$  Folge von Bytes/Seitenrahmen des phys. Adressraums

## Adressumsetzung: explizit segmentorientiert

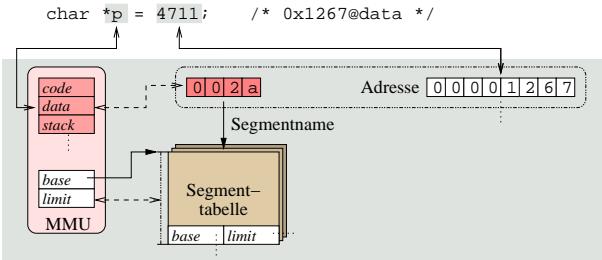
Segmentierter Adressraum (engl. *segmented address space*)



- Segmentname** ist Index in die **Segmenttabelle** eines Prozesses
  - dimensioniert durch die MMU, **ungültiger Index** führt zum **Trap**
- indizierte Adressierung (der MMU) ergibt den **Segmentdeskriptor**
  - enthält **Basisadresse** und **Länge** des Segments (engl. *base/limit*)
  - $address_{phys} = address > limit ? (Trap, 0) : base + address$

## Adressumsetzung: implizit segmentorientiert

Segmentregister bzw. Segmentselektor (engl. *segment selector*)



Befehlsabruf (engl. *instruction fetch*)  $\mapsto$  code



Operandenabruf (engl. *operand fetch*) aus Text-, Daten-, Stapelsegment

- Direktwerte  $\mapsto$  code
- globale/lokale Daten  $\mapsto$  data  $\equiv$  stack



- Programme können weiterhin 1-dimensionale log. Adressen verwenden

## Seiten- bzw. Segmentdeskriptor

Abbildung steuernder Verbund

Adressumsetzung basiert auf **Deskriptoren** der MMU, die für jede Seite/Segment eines Prozesses Relocations- und Zugriffsdaten verwalten

- die **Basisadresse** des Seitenrahmens/Segments im phys. Adressraum
- die **Zugriffsrechte** des Prozesses
  - lesen (*read*), schreiben (*write*), ggf. ausführen (*execute*)

Segmente sind (im Geg. zu Seiten) von variabler, dynamischer Größe und benötigen daher zusätzliche Verwaltungsdaten  $\sim$  **Segmentdeskriptor**

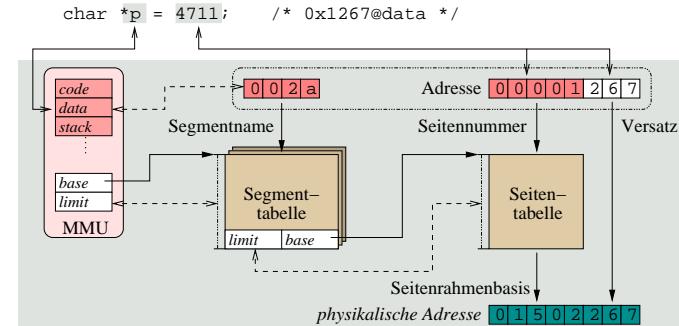
- die **Segmentlänge**, um Segmentverletzungen abfangen zu können
  - Basis-/Längenregister  $\subset$  Segmentdeskriptor
- die **Expansionsrichtung**: Halde „bottom-up“, Stapel „top-down“

## Deskriptorprogrammierung erfolgt zur Programmlade- und -laufzeit

- bei Erzeugung/Zerstörung schwer- und leichtgewichtiger Prozesse
- bei Anforderung/Freigabe von Arbeitsspeicher

## Adressumsetzung: implizit segment- und seitenorientiert

Segmentierter seitennummerierter Adressraum (engl. *page-segmented address space*)



x86

- **Reihenschaltung** von zwei Adressumsetzungseinheiten der MMU:
  - **Segmenteinheit** löst eine segmentierte Adresse auf
    - adressiert und begrenzt die Seitentabelle
  - **Seiteneinheit** generiert die physikalische Adresse
- jeder Prozess hat (mind.) eine Segment- und eine Seitentabelle

## Seiten- bzw. Segmenttabelle

Adressraum beschreibende Datenstruktur

Deskriptoren des Adressraums eines Prozesses sind in einer **Tabelle im Arbeitsspeicher** zusammengefasst

- die **Arbeitsmenge** (engl. *working set*) von Deskriptoren eines Prozesses wird im Zwischenspeicher (engl. *cache*) gehalten
  - TLB (engl. *translation lookaside buffer*) der MMU
- Adressraumwechsel als Folge eines Prozesswechsels bedeutet:
  - zerstören der Arbeitsmenge (TLB „flush“; teuer, schwergewichtig)
  - Tabellenwechsel (Zeiger umsetzen; billig, federgewichtig)

## Basis-/Längenregister (engl. *base/limit register*)

- beschreibt eine Tabelle und damit exakt einen Prozessadressraum
- bei der Adressumsetzung wird eine **Indexprüfung** durchgeführt:
  - *descriptor = index  $\leq$  limit ? & base[index] : (Trap, 0)*
  - wobei *index* die Seitennummer/den Segmentnamen repräsentiert

## Adressraumabbildung einhergehend mit Ein-/Ausgabe

Integration von Vorder- und Hintergrundspeicher

**Abstraktion** von Größe und Örtlichkeit des verfügbaren Hauptspeichers

- vom Prozess nicht benötigte Programmteile können ausgelagert sein
  - sie liegen im **Hintergrundspeicher**, z.B. auf der Festplatte
- der Prozessadressraum könnte über ein Rechnernetz verteilt sein
  - Programmteile sind über die Hauptspeicher anderer Rechner verstreut

Zugriffe auf ausgelagerte Programmteile fängt der Prozessor ab: *Trap*

- sie werden stattdessen **partiell interpretiert** vom Betriebssystem
- der unterbrochene Prozess wird in einen E/A-Stoß gezwungen
  - er erwartet die erfolgreiche Einlagerung eines Programmteils
  - ggf. sind andere Programmteile aus dem Hauptspeicher zu verdrängen
- Wiederaufnahme des CPU-Stoßes → Wiederholung des Zugriffs

## Zugriffsfehler

Seitenfehler (engl. *page fault*) bzw. Segmentfehler (engl. *segment fault*)

*present bit = 0*    • je nach Befehlssatz und Adressierungsarten der CPU kann der **Behandlungsaufwand** im Betriebssystem und somit der **Leistungsverlust** beträchtlich sein

```
void hello () {
    printf("Hi!\n");
}

void (*moin)() = &hello;

main () {
    (*moin)();
}
```

```
main:
    pushl %ebp
    movl %esp,%ebp
    pushl %eax
    pushl %eax
    andl $-16,%esp
    call *moin
    leave
    ret
```

FF15080494E8

## Seiten- bzw. Segmentdeskriptor (Forts.)

Zusätzliche Attribute

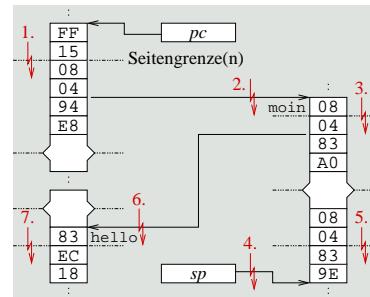
Adressumsetzung unterliegt einer **Steuerung**, die „transparent“ für den zugreifenden Prozess die Einlagerung auslöst

- die „Gegenwart“ eines Segments/einer Seite wird erfasst: *present bit*
  - 0 → ausgelagert; *Trap*, partielle Interpretation, Einlagerung
    - die Basisadresse ist eine Adresse im Hintergrundspeicher
    - wird nach der Einlagerung vom Betriebssystem auf 1 gesetzt
  - 1 → eingelagert; Befehl abrufen, Operanden lesen/schreiben
    - die Basisadresse ist eine Adresse im Vordergrundspeicher
    - wird nach der Auslagerung vom Betriebssystem auf 0 gesetzt
- das „Gegenwartsbit“ dient verschiedentlich noch anderen Zwecken:
  - um z.B. Zugriffe zu zählen oder ihnen einen Zeitstempel zu geben
  - Betriebssystemmaßnahmen zur Optimierung der Ein-/Auslagerung

## Zugriffsfehler: Schlimm(st)er Fall eines Seitenfehlers

`call *moin` (x86) Aufruf einer indirekt adressierten Prozedur

- der Operationskode (FF 15) wurde bereits gelesen



- Operandenadresse holen (08 04 94 E8)
- Funktionszeiger lesen (08)
- Funktionszeiger weiterlesen (04 83 A0)
- Rücksprungadresse stapeln (08 04)
- Rücksprungadresse weiterstapeln (83 9E)
- Operationskode holen (83)
- Operanden holen (EC 18)

- Seitenfehler 6. und 7. sind eigentlich bereits der Ausführung des ersten Maschinenbefehls der aufgerufenen Prozedur zuzurechnen

## Seitenfehler: Aufwandsabschätzung von Einzelzugriffen

Nichtfunktionale Programmeigenschaften

**effektive Zugriffszeit** (*effective access time, eat*) auf den Hauptspeicher

- hängt stark ab von der **Seitenfehlerwahrscheinlichkeit** ( $p$ ) und verhält sich direkt proportional zur **Seitenfehlerrate**:

$$eat = (1 - p) \cdot pat + p \cdot pft, 0 \leq p \leq 1$$

- angenommen, folgende Systemparameter sind gegeben:

- 50 ns Zugriffszeit auf den RAM (*physical access time, pat*)
- 10 ms mittlere Zugriffszeit auf eine Festplatte (*page fault time, pft*)
- 1% Wahrscheinlichkeit eines Seitenfehlers ( $p = 0,01$ )

- dann ergibt sich:

$$eat = 0,99 \cdot 50 \text{ ns} + 0,01 \cdot 10 \text{ ms} = 49,5 \text{ ns} + 10^5 \text{ ns} \approx 0,1 \text{ ms}$$

- Einzelzugriffe sind im Ausnahmefall um den Faktor 2000 langsamer

## Seitenüberlagerung „Considered Harmful“

Pro und Contra

**Virtuelle Adressräume** sind ...

**vorteilhaft** wenn übergroße bzw. gleichzeitig mehrere Programme in Anbetracht zu knappen Hauptspeichers auszuführen sind

**ernüchternd** wenn der eben durch die Virtualisierung bedingte Mehraufwand zu berücksichtigen ist und sich für ein gegebenes Anwendungsszenario als problematisch bis unakzeptabel erweisen sollte

**Seitenfehler** sind ...

- nicht wirklich transparent, wenn zeitliche Aspekte relevant sind
  - z.B. im Fall von Echtzeitverarbeitung oder Hochleistungsrechnen
- erst zur Laufzeit ggf. entstehende nichtfunktionale Eigenschaften

## Seitenfehler: Aufwandsabschätzung bei Folgezugriffen

Seitenfehler sind nicht wirklich transparent

**mittlere Zugriffszeit** (*mean access time, mat*) auf den Hauptspeicher

- hängt stark ab von der effektiven **Seitenzugriffszeit** und der **Seitengröße** (in Bytes pro Seite bzw. Seitenrahmen):

$$mat = (eat + (\text{sizeof}(page) - 1) \cdot pat) / pat$$

- angenommen, folgende Systemparameter sind gegeben:

- Seitengröße von 4 096 Bytes (4 KB)
- 50 ns Zugriffszeit (*pat*) auf ein Byte im RAM
- effektive Zugriffszeit (*eat*) wie eben berechnet bzw. abgeschätzt

- dann ergibt sich:

$$mat = (eat + 4\,095 \cdot 50 \text{ ns}) / 50 \text{ ns} = 6\,095,99 \text{ ns} \approx 6 \mu\text{s}$$

- Folgezugriffe sind im Ausnahmefall um den Faktor 122 langsamer

## Gliederung

### 1 Grundlagen

- Fragmente
- Zuteilungseinheiten
- Strategien

### 2 Adressräume

- Überblick
- Physikalischer Adressraum
- Logischer Adressraum
- Virtueller Adressraum

### 3 Zusammenfassung

## Adressräume

Ebenen der Abstraktion

- der **physikalische Adressraum** enthält gültige & ungültige Adressen
  - ungültige Adressen     • Zugriff führt zum Busfehler
  - gültige Adressen       • Zugriff gelingt, ist jedoch zu bedenken...
    - reservierte Adressbereiche ~ Schutz
- der **logische Adressraum** enthält gültige Adressen
  - Zugriffsrechte der Prozesse stecken **Gültigkeitsbereiche** ab
    - Zugriff auf reservierte Adressen führt ggf. zum Schutzfehler
  - Prozesse sind in ihrem Programmaddressraum abgeschottet, isoliert
    - Zugriff auf „fremde“ freie Adressen führt zum Schutzfehler
- der **virtuelle Adressraum** enthält „flüchtige Adressen“
  - die **Bindung** der Adressen zu den Speicherzellen ist nicht fest
  - sie variiert phasenweise zwischen Vorder- und Hintergrundspeicher

## Resümee

- **Arbeitsspeicherverwaltung** ist (a) statisch oder (b) dynamisch
    - (a) Arbeitsspeichergebiete maximaler, fester Größe
    - (b) Arbeitsspeicherfragmente variabler Größe
  - dabei sind **Fragmente** Teile eines (log./virt.) Prozessaddressraums
    - die im Arbeitsspeicher zu platzierenden Teile von Programmtext/-daten
    - für die freier Platz, sog. **Löcher**, im Arbeitsspeicher zu finden ist
  - **Prozessadressräume** sind (a) physikalisch, (b) logisch, (c) virtuell
    - (a) lückenhafter, wirklicher Hauptspeicher
    - (b) lückenloser, wirklicher Hauptspeicher
    - (c) lückenloser, scheinbarer Hauptspeicher
- Arbeitsspeicher liegt im Vordergrund (a, b) bzw. Hintergrund (c)

## Politiken der Speicherverwaltung

**Platzierungsstrategie**     • **wohin** ist ein Fragment abzulegen?

**Ladestrategie**        • **wann** ist ein Fragment zu laden?

**Ersetzungsstrategie**    • **welches** Fragment ist ggf. zu verdrängen?

## Adressraumdeskriptoren

Seitennumerierte und segmentierte Adressräume

Abbildung steuernde **Verbunde** zur Erfassung einzelner Adressraumteile

- speichern Attribute von **Seiten** oder **Segmente**
  - d.h., Relokations- und Zugriffsdaten, Zugriffsrechte
- bilden Seiten fester Größe auf gleichgroße Seitenrahmen ab
  - seitennummerierter Adressraum
- bilden Segmente variabler Größe auf Byte- oder Seitenfolgen ab
  - segmentierter und ggf. seitennummerierter Adressraum

**Abbildungstabellen** fassen Deskriptoren (eines Adressraums) zusammen

- die Tabellen liegen im Arbeitsspeicher des Betriebssystems
  - der dafür erforderliche Speicherbedarf kann beträchtlich sein
- im TLB sind **Arbeitsmengen** von Deskriptoren zwischengespeichert
  - ein Cache der MMU, ohne dem **Adressumsetzung** ineffizient ist

**Zugriffsfehler** sind intransparente, nicht-funktionale Eigenschaften

## Literaturverzeichnis

[1] FEY, D. :

*Grundlagen der Rechnerarchitektur und -organisation.*  
<http://www3.informatik.uni-erlangen.de/Lehre/GRA/>, jährlich. –  
 Vorlesungsfolien