

---

# Betriebssysteme (BS)

## 08. Speicherverwaltung

<https://sys.cs.tu-dortmund.de/de/lehre/ss24/bs>

---

10.06.2024

**Peter Ulbrich**

`peter.ulbrich@tu-dortmund.de`  
`bs-problems@ls12.cs.tu-dortmund.de`

In Teilen basierend auf *Betriebssysteme* von Olaf Spinczyk, Universität Osnabrück

# Wiederholung: Betriebsmittel

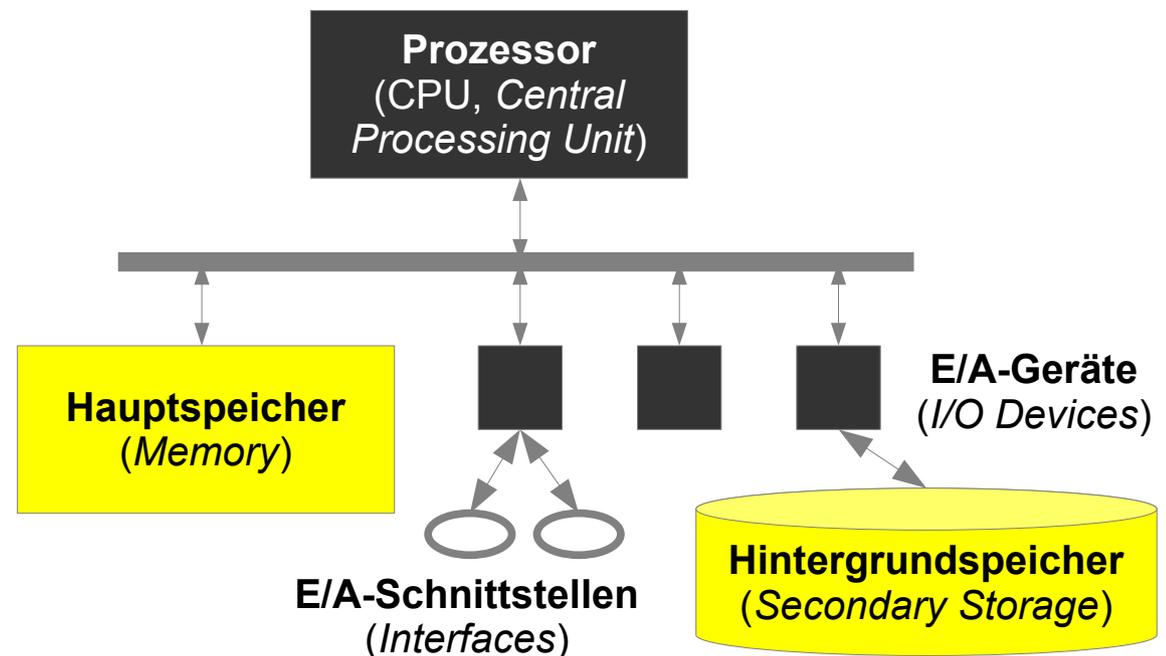
- Das Betriebssystem hat folgende Aufgaben:
  - Verwaltung der Betriebsmittel des Rechners
  - Schaffung von Abstraktionen, die Anwendungen einen einfachen und effizienten Umgang mit Betriebsmitteln erlauben

- **Bisher: Prozesse**

- Konzept zur Abstraktion von der realen CPU

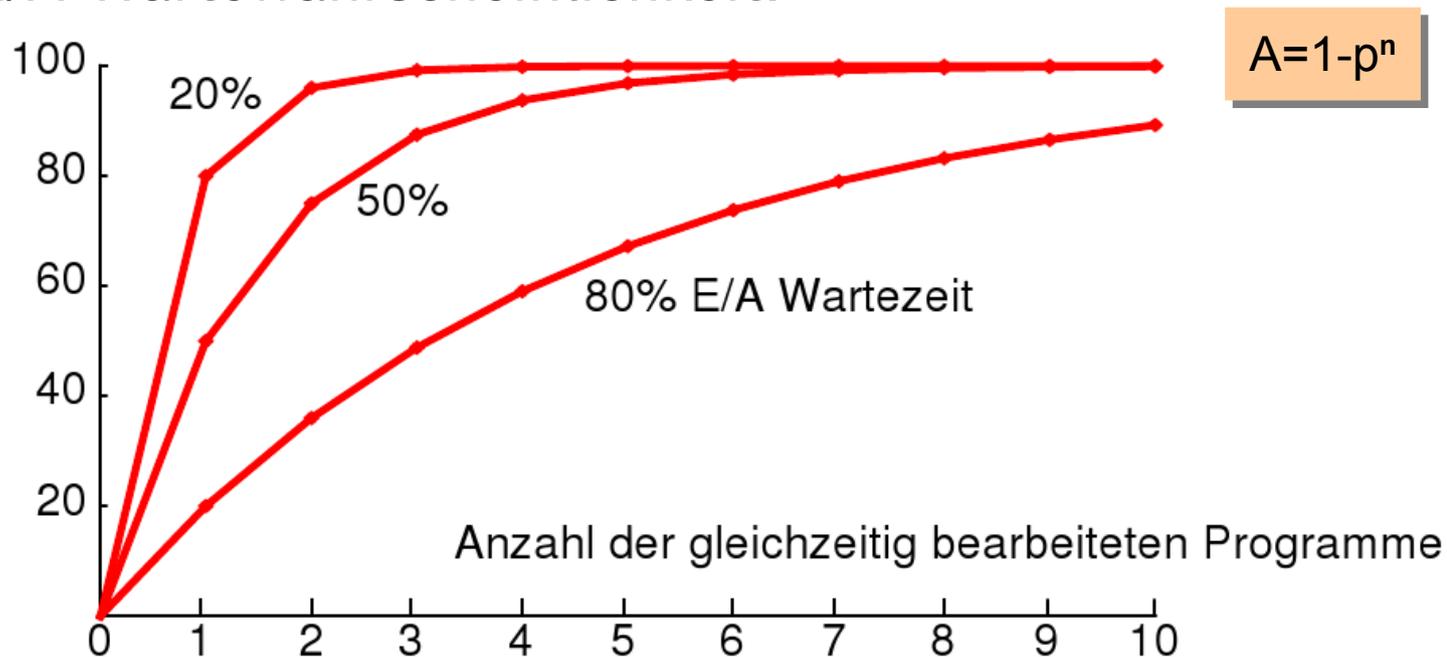
- **Nun: Speicher**

- Verwaltung von Haupt- und Hintergrundspeicher



## Wiederholung: Mehrprogrammbetrieb

- CPU-Auslastung unter Annahme einer bestimmten E/A-Wartewahrscheinlichkeit:



Quelle: Tanenbaum, Moderne Betriebssysteme

- ➔ **Mehrprogrammbetrieb ist essentiell für eine hohe Auslastung**
- Beim Starten und Beenden der Prozesse muss dynamisch Speicher zugewiesen bzw. zurückgenommen werden!

# Inhalt

## ■ Grundlegende Aufgaben der Speicherverwaltung

- Anforderungen
- Strategien

## ■ Speichervergabe

- Platzierungsstrategien

*Tanenbaum*

3: Speicherverwaltung

*Silberschatz*

8: Memory-Management Strategies

## ■ Speicherverwaltung bei Mehrprogrammbetrieb

- Ein-/Auslagerung
- Relokation

## ■ Segmentbasierte Adressabbildung

## ■ Seitenbasierte Adressabbildung

## ■ Zusammenfassung

# Anforderungen

## ■ Mehrere Prozesse benötigen Hauptspeicher

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



Das Betriebssystem und zwei Anwendungsprozesse im Hauptspeicher

→ **Freie Speicherbereiche** kennen, verwalten und vergeben

→ **Ein- und Auslagern** von Prozessen

→ **Relokation** von Programmbefehlen

→ **Hardwareunterstützung** ausnutzen

# Grundlegende Politiken/Strategien

... auf jeder Ebene der Speicherhierarchie:

## ■ Platzierungsstrategie (placement policy)

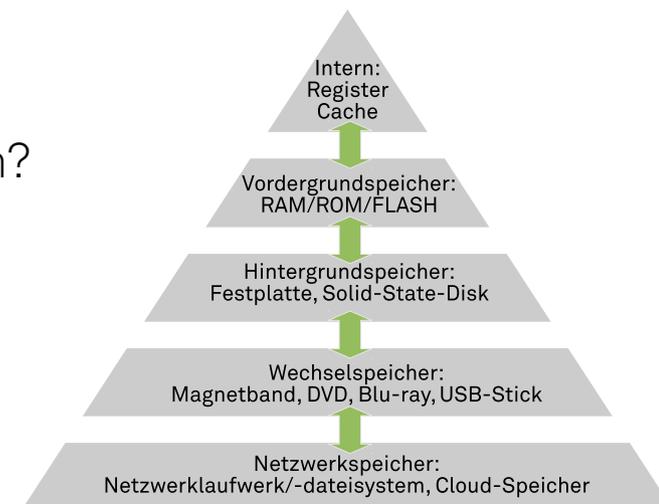
- **Woher** soll benötigter Speicher genommen werden?
  - wo der Verschnitt am kleinsten/größten ist
  - egal, weil Verschnitt zweitrangig ist

## ■ Ladestrategie (fetch policy)

- **Wann** sind Speicherinhalte einzulagern?
  - auf Anforderung oder im Voraus

## ■ Ersetzungsstrategie (replacement policy)

- **Welche** Speicherinhalte sind ggf. zu verdrängen, falls der Speicher knapp wird?
  - das älteste, am seltensten genutzte
  - das am längsten ungenutzte

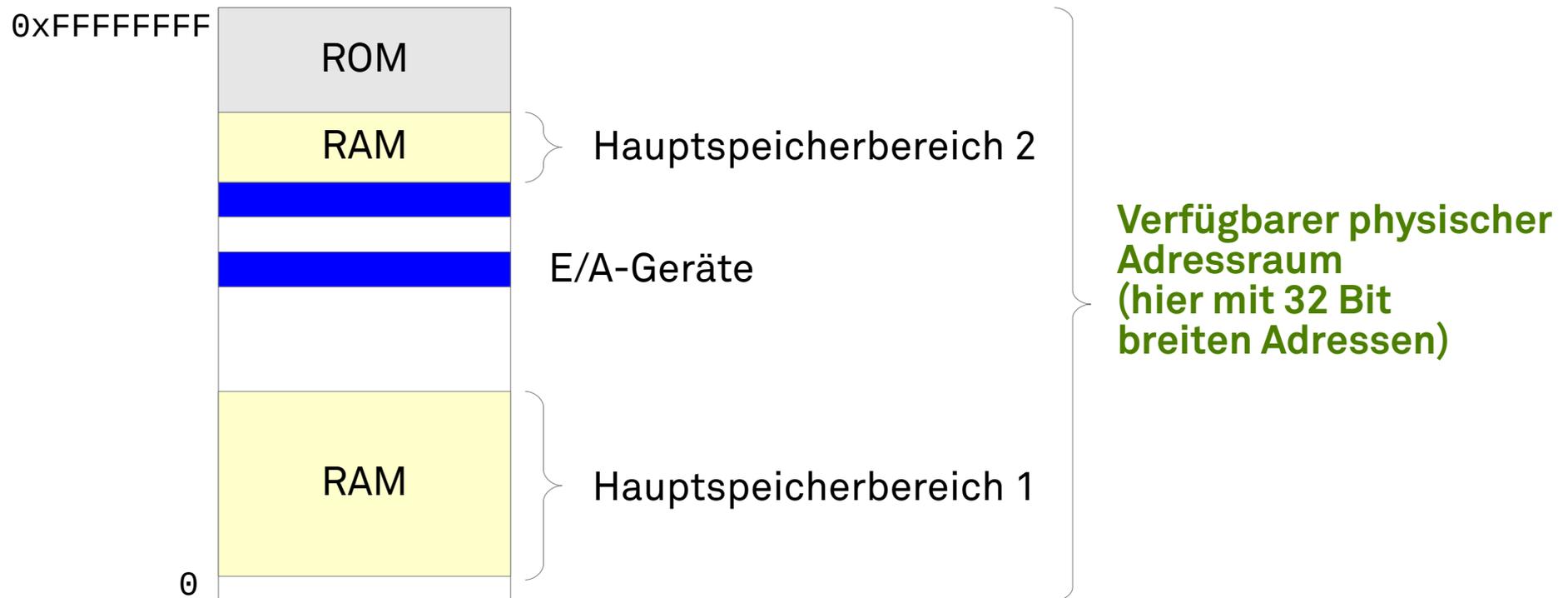


# Inhalt

- Grundlegende Aufgaben der Speicherverwaltung
  - Anforderungen
  - Strategien
- **Speichervergabe**
  - Platzierungsstrategien
- Speicherverwaltung bei Mehrprogrammbetrieb
  - Ein-/Auslagerung
  - Relokation
- Segmentbasierte Adressabbildung
- Seitenbasierte Adressabbildung
- Zusammenfassung

# Speichervergabe: Problemstellung

- Verfügbarer (physischer) Speicher



Speicherlandkarte (*Memory Map*) eines fiktiven 32-Bit-Systems

# Speichervergabe: Problemstellung

Belegung des verfügbaren Hauptspeichers durch ...

## ■ Benutzerprogramme

- Programmbefehle (*Text*)
- Programmdateien (*Data*)
- Dynamische Speicheranforderungen (*Stack, Heap*)

## ■ Betriebssystem

- Betriebssystemcode und -daten
- Prozesskontrollblöcke
- Datenpuffer für Ein-/Ausgabe
- ...

➔ Zuteilung des Speichers nötig

# Statische Speicherzuteilung

- Feste Bereiche für Betriebssystem und Benutzerprogramme
- **Probleme:**
  - Grad des Mehrprogrammbetriebs begrenzt
  - Begrenzung anderer Ressourcen (z.B. Bandbreite bei Ein-/Ausgabe wegen zu kleiner Puffer)
  - Ungenutzter Speicher des Betriebssystems kann von Anwendungsprogrammen nicht genutzt werden und umgekehrt.

→ **Dynamische Speicherzuteilung einsetzen**

# Dynamische Speicherzuteilung

## ■ Segmente

- zusammenhängender Speicherbereich  
(Bereich mit aufeinanderfolgenden Adressen)

## ■ Allokation (Belegung) und Freigabe von Segmenten

## ■ Ein Anwendungsprogramm besitzt üblicherweise folgende Segmente:

- Textsegment
- Datensegment
- Stapelsegment (lokale Variablen, Parameter, Rücksprungadressen, ...)

## ■ Suche nach geeigneten Speicherbereichen zur Zuteilung

- insbesondere beim Programmstart

## → Platzierungsstrategien nötig

- Besonders wichtig dabei: **Freispeicherverwaltung**

# Freispeicherverwaltung

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



Bitliste markiert belegte Speicherbereiche

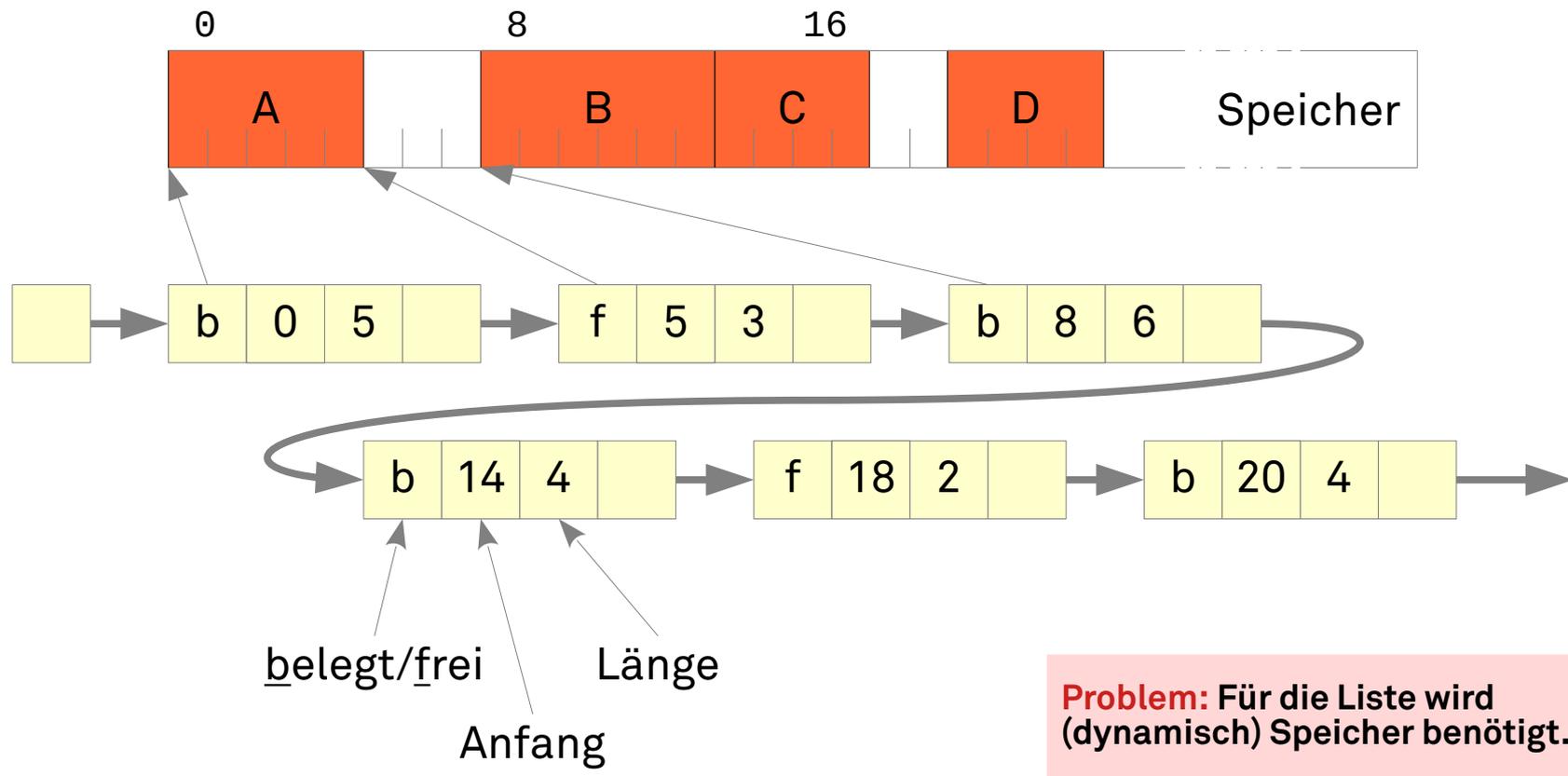
Speichereinheiten gleicher Größe  
(z.B. 1 Byte, 64 Byte, 1024 Byte)

**Probleme:**

- Bitliste kostet u. U. viel Speicher.
- Bei der Freigabe muss man die Größe des freizugebenden Speichers kennen bzw. mit angeben.

# Freispeicherverwaltung (2)

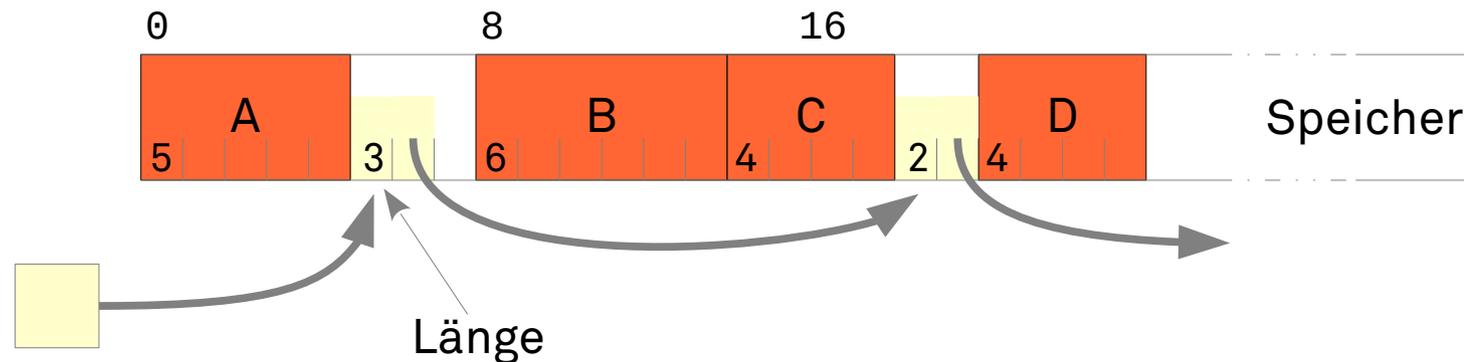
## ■ Verkettete Liste



Repräsentation von belegten und freien Segmenten

## Freispeicherverwaltung (3)

### ■ Verkettete Liste im freien Speicher

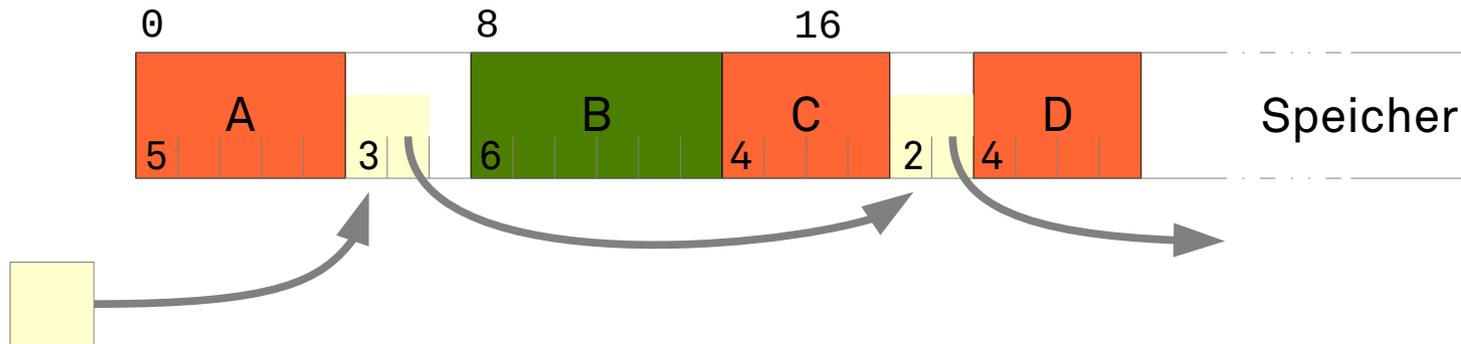


**Mindestlückengröße muss garantiert werden**

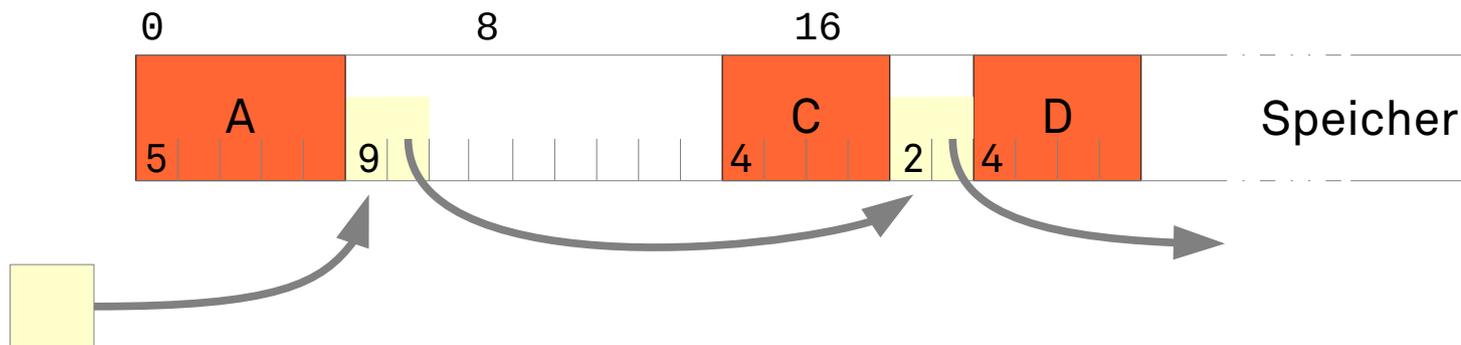
- zur Effizienzsteigerung eventuell Rückwärtsverkettung nötig
- Repräsentation letztlich auch von der Vergabestrategie abhängig

# Speicherfreigabe

- Verschmelzung von Lücken



Nach Freigabe von B:



# Platzierungsstrategien

... auf der Basis von unterschiedlich sortierten Löcherlisten:

- **First Fit** (Sortierung nach Speicheradresse)
  - erste passende Lücke wird verwendet
- **Rotating First Fit / Next Fit** (Sortierung nach Speicheradresse)
  - wie First Fit, aber Start bei der zuletzt zugewiesenen Lücke
  - vermeidet viele kleine Lücken am Anfang der Liste (wie bei First Fit)
- **Best Fit** (Sortierung nach Lückengröße – kleinste zuerst)
  - kleinste passende Lücke wird gesucht
- **Worst Fit** (Sortierung nach Lückengröße – größte zuerst)
  - größte passende Lücke wird gesucht
- **Probleme:**
  - zu kleine Lücken, Speicherverschnitt

## Platzierungsstrategien (2)

- Das **Buddy-Verfahren**
- 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								

## Diskussion: Verschnitt

### ■ Externer Verschnitt

- **Außerhalb** der zugeteilten Speicherbereiche entstehen Speicherfragmente, die nicht mehr genutzt werden können.
- Passiert bei den listenbasierten Strategien wie **First Fit, Best Fit, ...**

### ■ Interner Verschnitt

- **Innerhalb** der zugeteilten Speicherbereiche gibt es ungenutzten Speicher.
- Passiert z.B. bei **Buddy**, da die Anforderungen auf die nächstgrößere Zweierpotenz aufgerundet werden.

## Zwischenfazit: Einsatz der Verfahren

### ■ Einsatz im **Betriebssystem**

- Verwaltung des Systemspeichers
- Zuteilung von Speicher an Prozesse und Betriebssystem

z.B. *Buddy*-Allokator  
in Linux

### ■ Einsatz innerhalb eines **Prozesses**

- Verwaltung des Haldenspeichers (*Heap*)
- erlaubt dynamische Allokation von Speicherbereichen durch den Prozess (*malloc* und *free*)

typisch:  
listenbasiert

### ■ Einsatz für Bereiche des **Sekundärspeichers**

- Verwaltung bestimmter Abschnitte des Sekundärspeichers, z.B. Speicherbereich für Prozessauslagerungen (*swap space*)

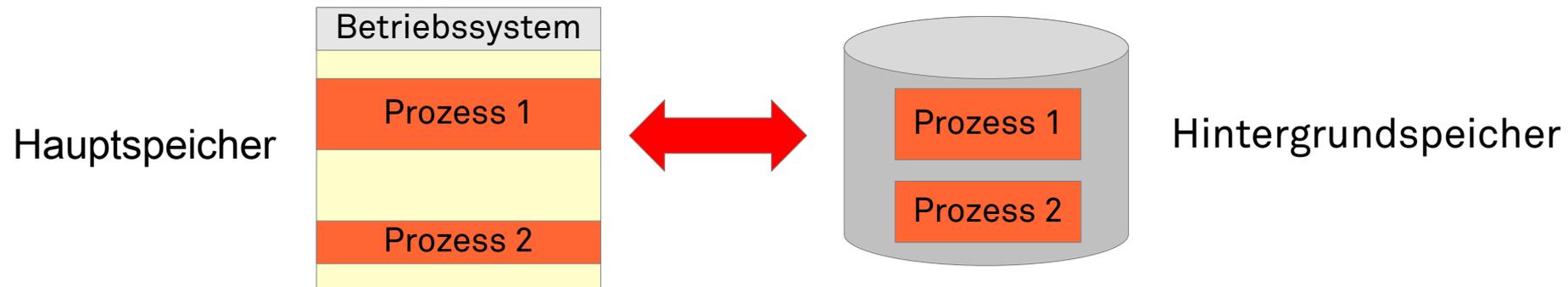
oft: Bitmaps

# Inhalt

- Grundlegende Aufgaben der Speicherverwaltung
  - Anforderungen
  - Strategien
- Speichervergabe
  - Platzierungsstrategien
- **Speicherverwaltung bei Mehrprogrammbetrieb**
  - Ein-/Auslagerung
  - Relokation
- Segmentbasierte Adressabbildung
- Seitenbasierte Adressabbildung
- Zusammenfassung

## Ein-/Auslagerung (swapping)

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



- **Ein-/Auslagerzeit ist hoch**
  - Latenz der Festplatte (z.B. Positionierung des Schreib-/Lesekopfes)
  - Übertragungszeit

## Ein-/Auslagerung (2)

- Adressen im Prozess sind normalerweise statisch gebunden
  - kann nur an dieselbe 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 dieselbe Partition.
- Großer Nachteil: Speicher kann nicht optimal genutzt werden.

Betriebssystem
Partition 1
Partition 2
Partition 3
Partition 4

- Besser: Dynamische Belegung und **Programmrelokation**

# Adressbindung und Relokation

## ■ **Problem: Maschinenbefehle benutzen Adressen**

- z.B. ein Sprungbefehl in ein Unterprogramm oder ein Ladebefehl für eine Variable aus dem Datensegment
- Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Adressbindung zwischen dem Befehl und seinem Operanden herzustellen ...

## ■ **Absolutes Binden** (*Compile/Link Time*)

- Adressen stehen fest
- Programm kann nur an bestimmter Speicherstelle korrekt ablaufen

## ■ **Statisches Binden** (*Load Time*)

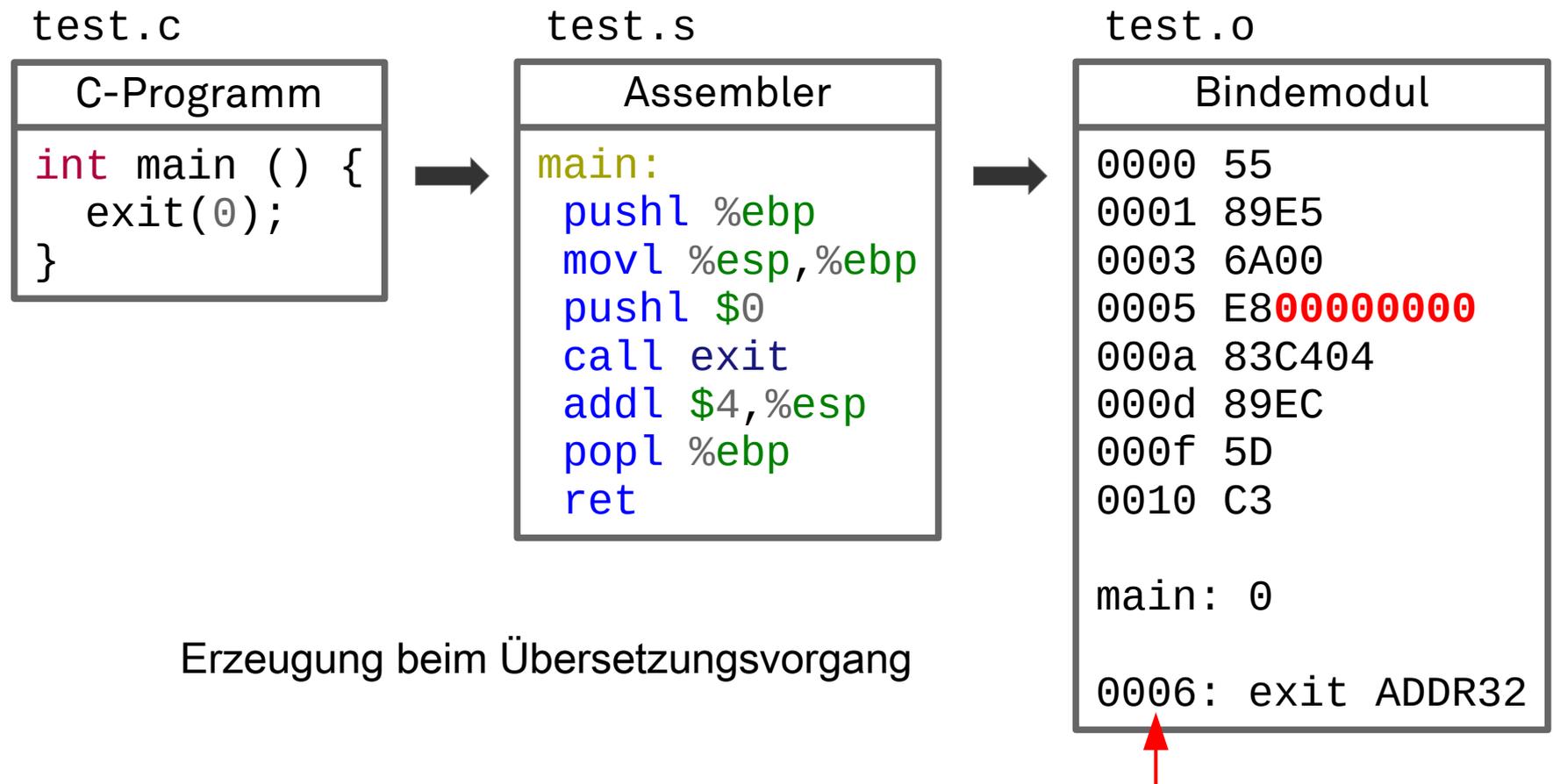
- Beim Laden des Programms werden die absoluten Adressen angepasst (reloziert)
- ➔ Compiler/Assembler muss Relokationsinformation liefern

## ■ **Dynamisches Binden** (*Execution Time*)

- Der Code greift grundsätzlich nur indirekt auf Operanden zu.
- Das Programm kann jederzeit im Speicher verschoben werden.
- ➔ Programme werden etwas größer und langsamer

# Adressbindung und Relokation (2)

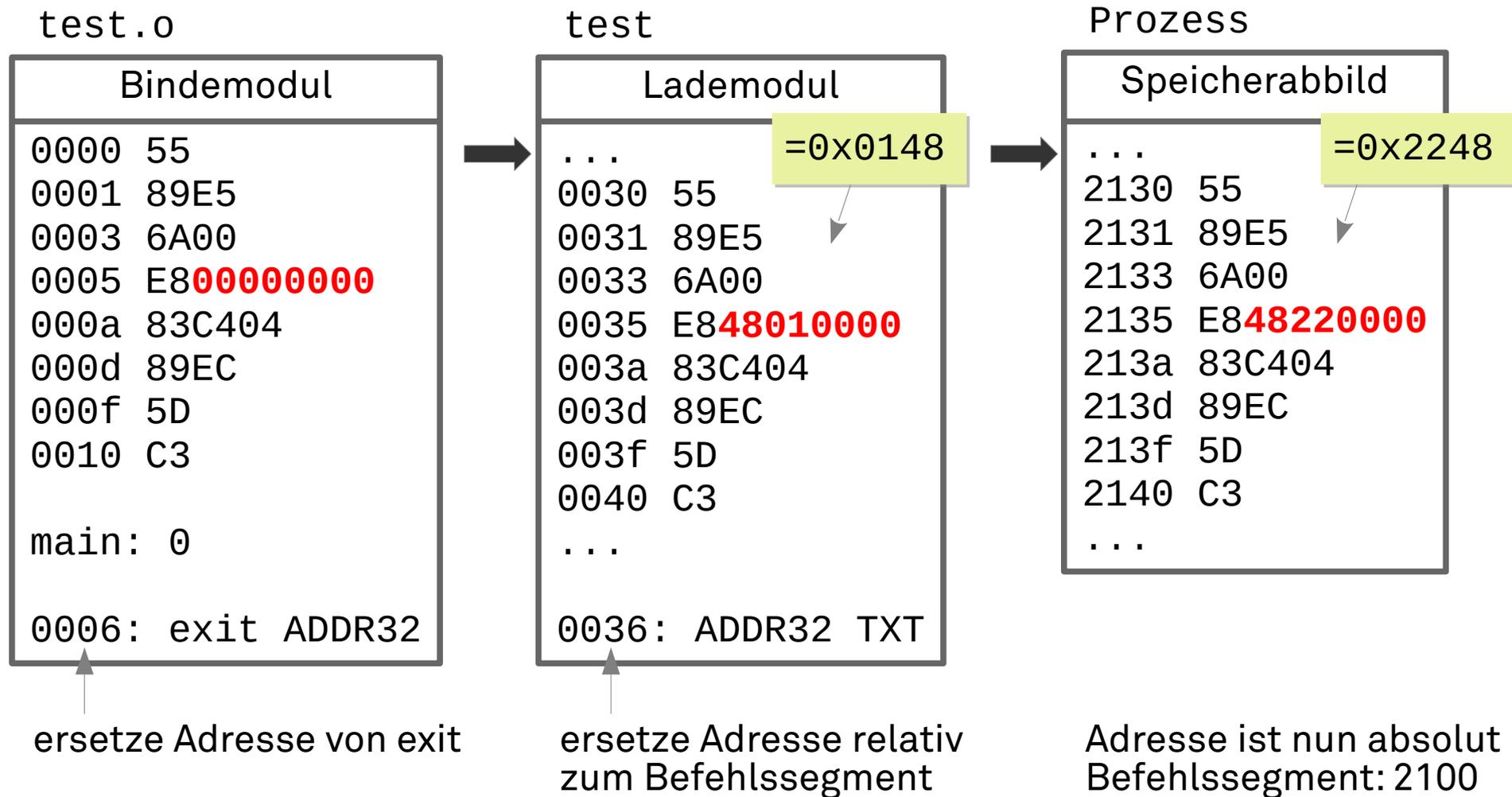
- **Übersetzungsvorgang**  
(Erzeugung der Relokationsinformationen)



Relokationsinformation: „ersetze Adresse von exit“

# Adressbindung und Relokation (3)

## ■ Binde- und Ladevorgang



## Adressbindung und Relokation (4)

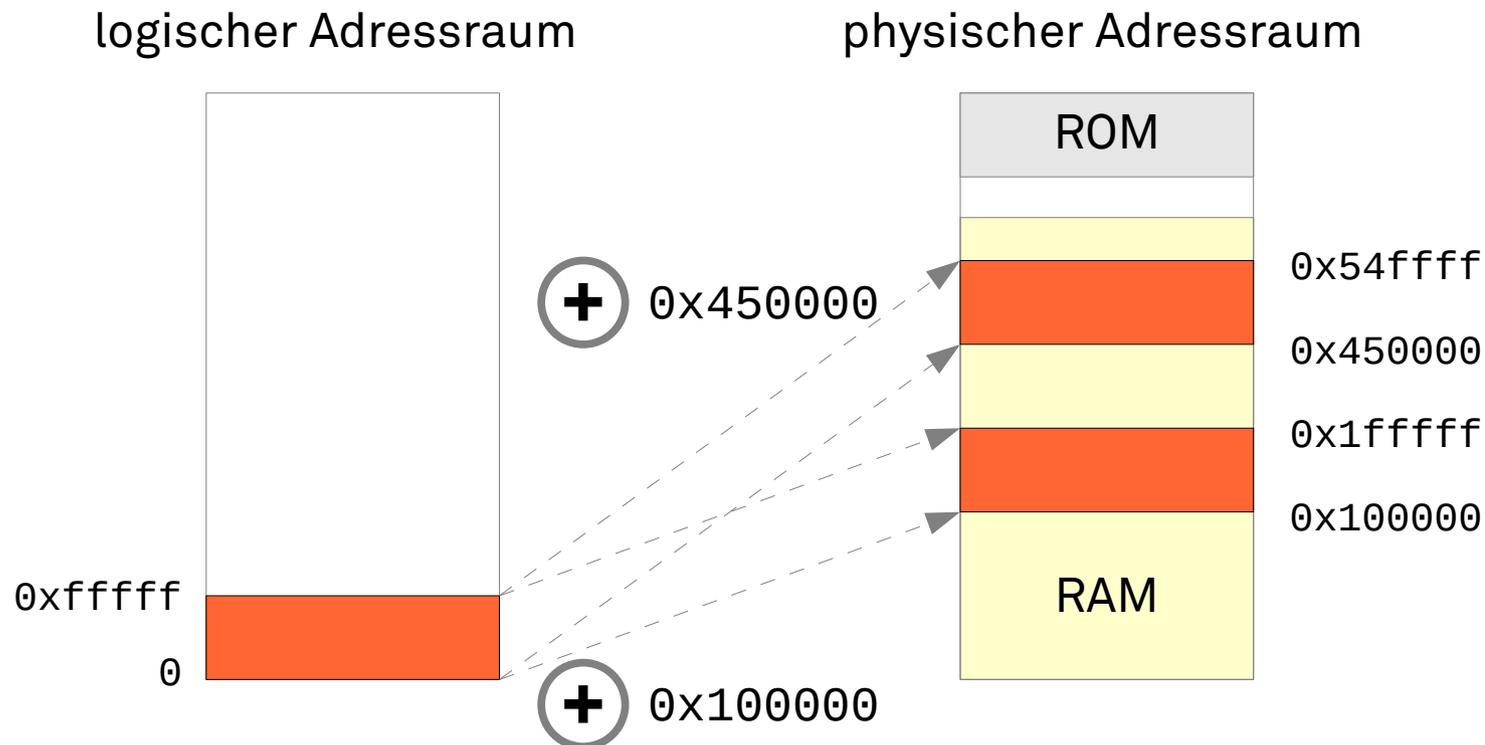
- **Relokationsinformation im Bindemodul**
  - erlaubt das Binden von Modulen in beliebige Programme
- **Relokationsinformation im Lademodul**
  - erlaubt das Laden des Programms an beliebige Speicherstellen
  - absolute Adressen werden erst beim Laden generiert
- **Dynamisches Binden mit Compiler-Unterstützung**
  - Programm benutzt keine absoluten Adressen und kann daher immer an beliebige Speicherstellen geladen werden
    - „**Position Independent Code**“
- **Dynamisches Binden mit MMU-Unterstützung:**
  - Abbildungsschritt von „logischen“ auf „physische“ Adressen
    - Relokation beim Binden reicht (außer für „**Shared Libraries**“)

# Inhalt

- Grundlegende Aufgaben der Speicherverwaltung
  - Anforderungen
  - Strategien
- Speichervergabe
  - Platzierungsstrategien
- Speicherverwaltung bei Mehrprogrammbetrieb
  - Ein-/Auslagerung
  - Relokation
- **Segmentbasierte Adressabbildung**
- Seitenbasierte Adressabbildung
- Zusammenfassung

# Segmentierung

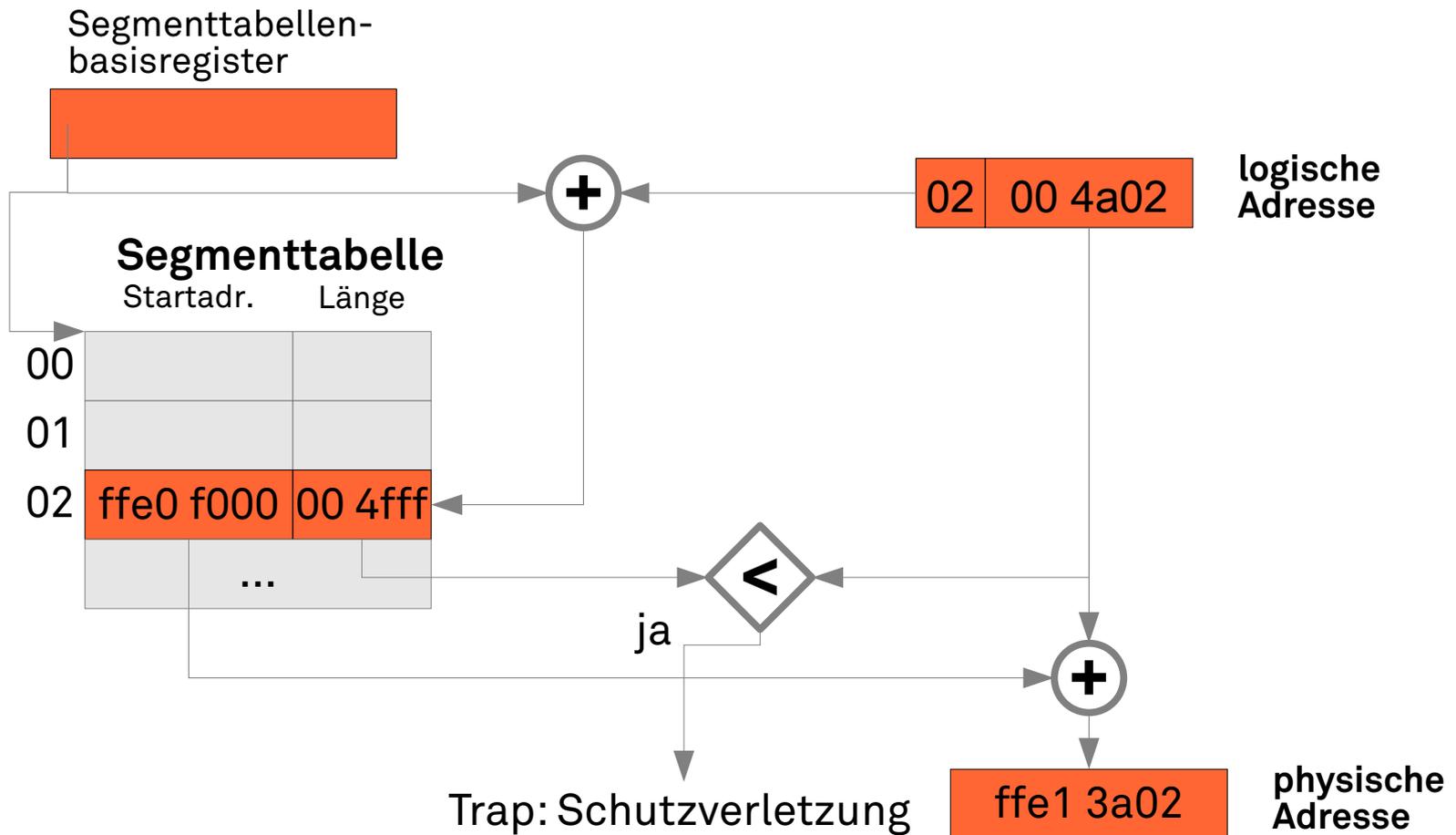
- Hardwareunterstützung:  
**Abbildung logischer auf physische Adressen**



**Das Segment des logischen Adressraums kann an jeder beliebigen Stelle im physischen Adressraum liegen. Das Betriebssystem bestimmt, wo ein Segment im physischen Adressraum tatsächlich liegen soll.**

# Segmentierung (2)

- Realisierung mit **Übersetzungstabelle** (pro Prozess)



## Segmentierung (3)

- Hardwareunterstützung: **MMU** (*Memory Management Unit*)
- Schutz vor Segmentübertretung
  - MMU prüft Rechte zum Lesen, Schreiben und Ausführen von Befehlen
  - **Trap** zeigt Speicherverletzung 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*)

## Segmentierung (4)

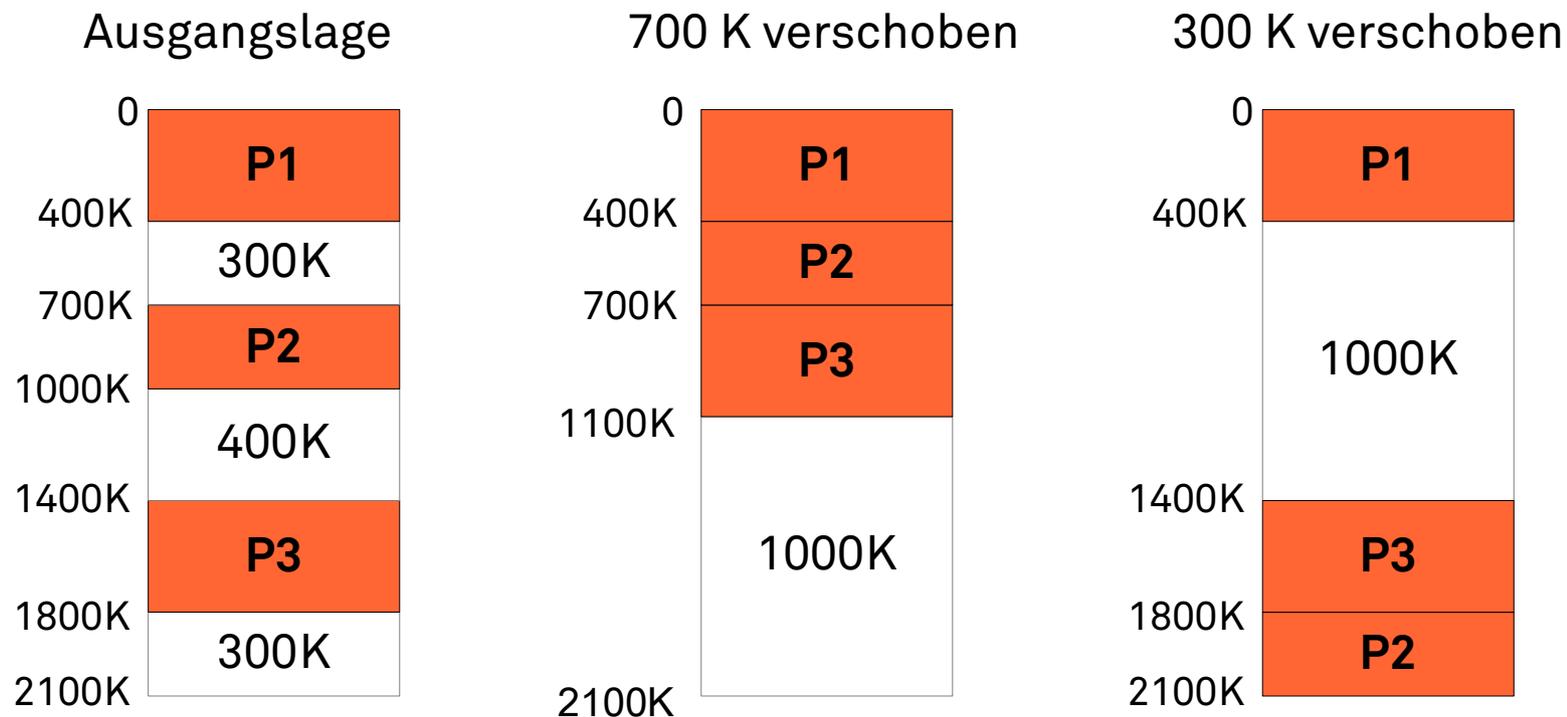
### Probleme ...

- **Fragmentierung** des Speichers durch häufiges Ein- und Auslagern
  - Es entstehen kleine, nicht nutzbare Lücken: externer Verschnitt
- **Kompaktifizieren** hilft
  - Segmente werden verschoben, um Lücken zu schließen
  - Segmenttabelle wird jeweils angepasst
  - kostet aber Zeit
- **Lange E/A-Zeiten für Ein- und Auslagerung**
  - Nicht alle Teile eines Segments werden gleich häufig genutzt.

# Kompaktifizieren

## ■ Verschieben von Segmenten

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

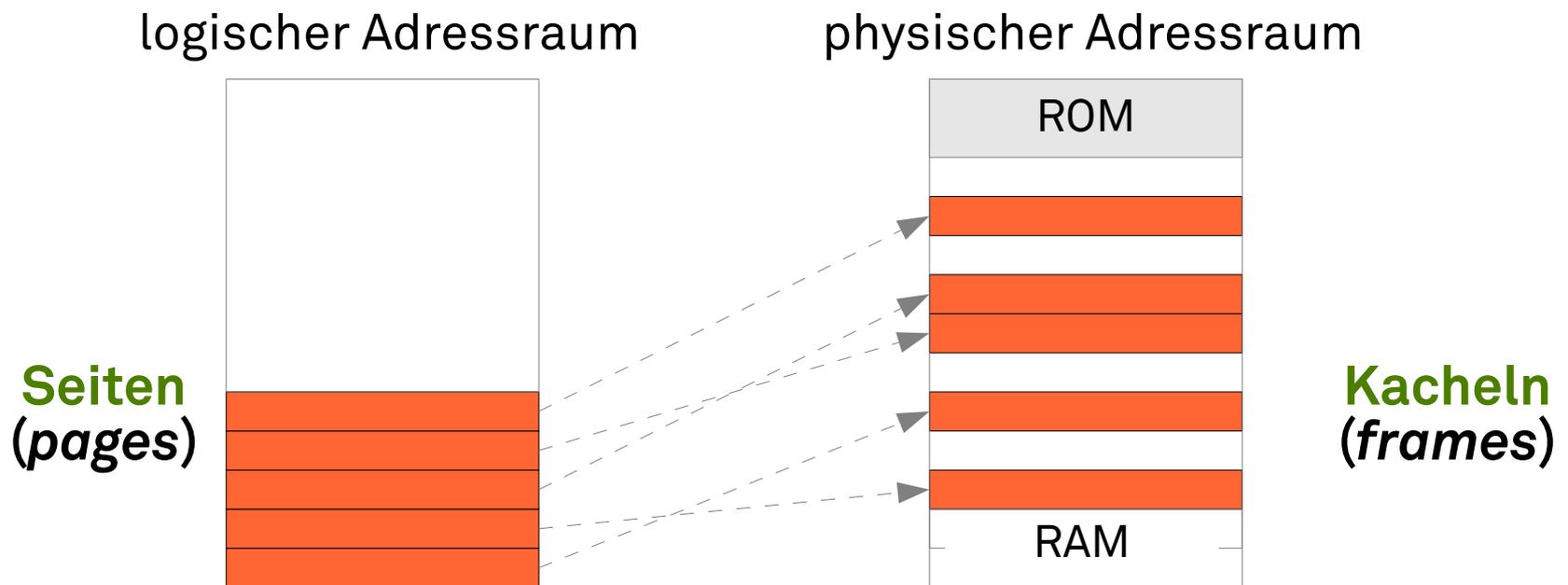


# Inhalt

- Grundlegende Aufgaben der Speicherverwaltung
  - Anforderungen
  - Strategien
- Speichervergabe
  - Platzierungsstrategien
- Speicherverwaltung bei Mehrprogrammbetrieb
  - Ein-/Auslagerung
  - Relokation
- Segmentbasierte Adressabbildung
- **Seitenbasierte Adressabbildung**
- Zusammenfassung

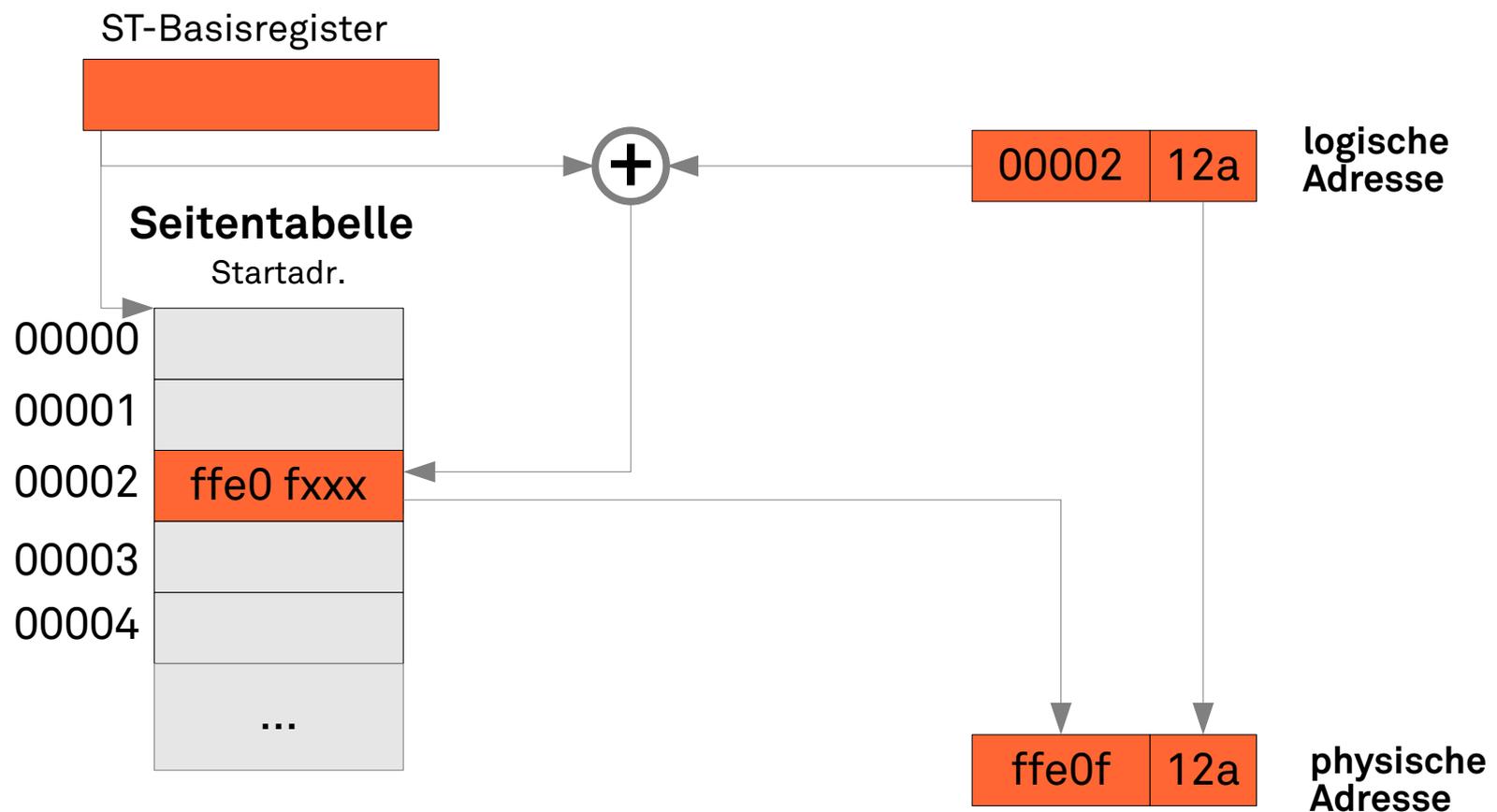
## Seitenadressierung (*paging*)

- Einteilung des logischen Adressraums in gleichgroße **Seiten**, die an beliebigen Stellen im physischen Adressraum liegen können
  - Lösung des Fragmentierungsproblems
  - keine Kompaktifizierung mehr nötig
  - vereinfacht Speicherbelegung und Ein-/Auslagerungen



# MMU mit Seitentabelle

- Tabelle setzt Seiten in Seitenrahmen (Kacheln) um

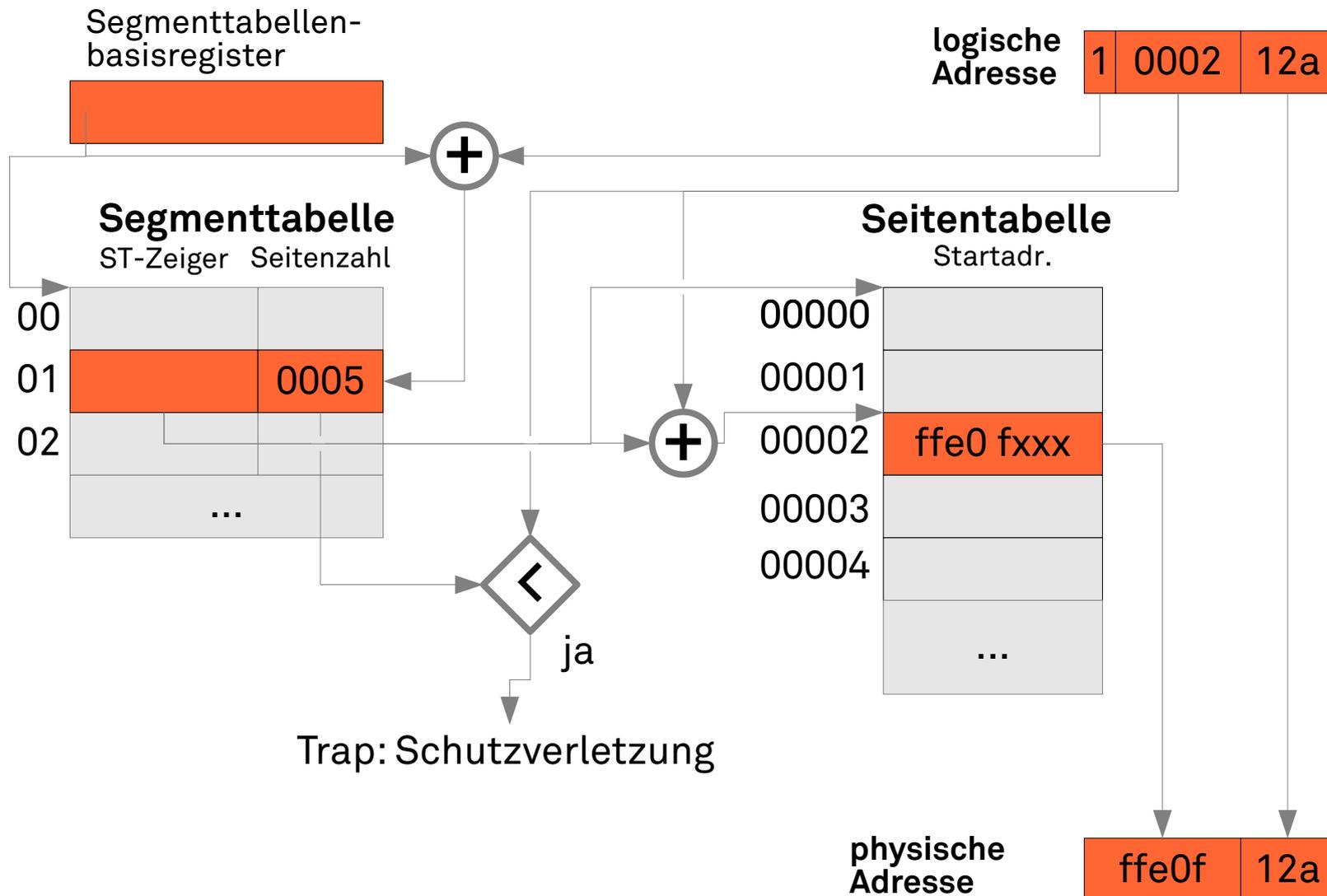


## MMU mit Seitentabelle (2)

- Seitenadressierung erzeugt internen Verschnitt
  - letzte Seite eventuell nicht vollständig genutzt
- Seitengröße
  - kleine Seiten verringern internen Verschnitt, vergrößern aber die Seitentabelle (und umgekehrt)
  - übliche Größe: 4096 Bytes (4 KiB)
- große Tabelle, die im Speicher gehalten werden muss
- viele implizite Speicherzugriffe nötig
- nur ein „Segment“ pro Kontext
  - sinngemäße Nutzung des Speichers schwerer zu kontrollieren (push/pop nur auf „Stack“, Ausführung nur von „Text“, ...)

### → Kombination mit Segmentierung

# Segmentierung und Seitenadressierung



## Segmentierung u. Seitenadressierung (2)

- Noch mehr implizite Speicherzugriffe
  - Große Tabellen im Speicher
  - Vermischung der Konzepte
  - Noch immer Ein-/Auslagerung kompletter Segmente
- Mehrstufige Seitenadressierung mit Ein- und Auslagerung**

# Ein-/Auslagerung von Seiten

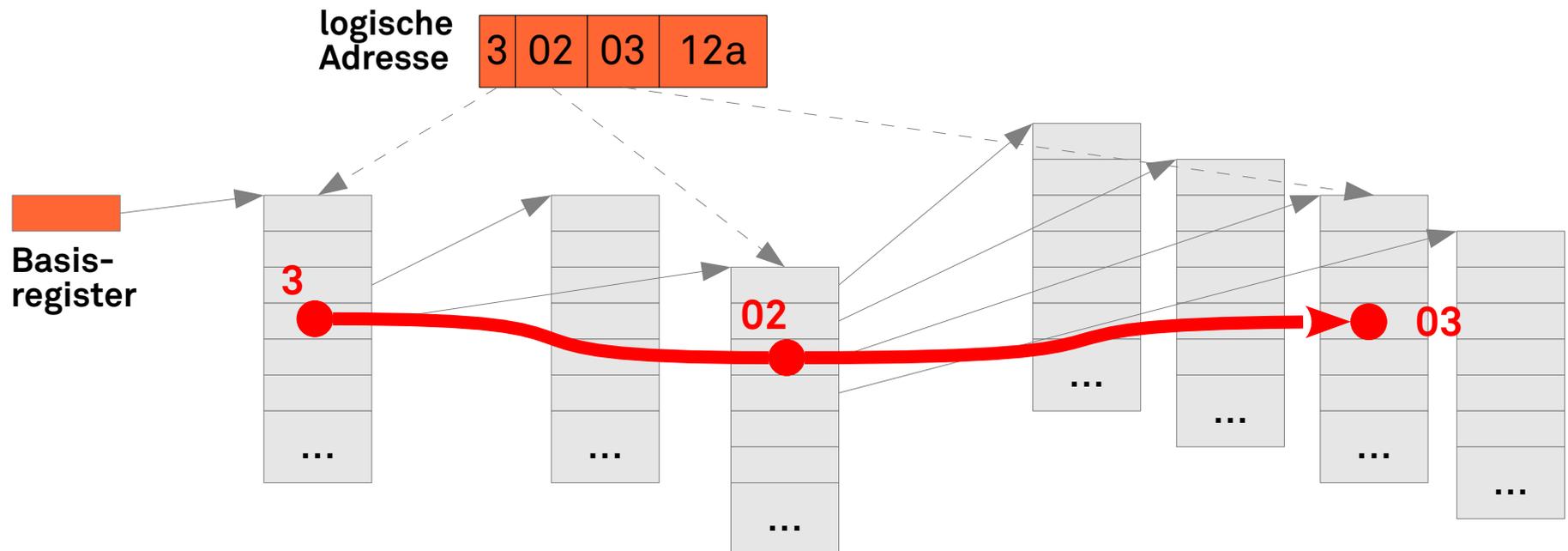
- Es ist nicht nötig, ein gesamtes Segment aus- bzw. einzulagern
  - Seiten können einzeln ein- und ausgelagert werden
  
- Hardware-Unterstützung
  - Ist das Präsenzbit gesetzt, bleibt alles wie bisher.
  - Ist das Präsenzbit gelöscht, wird ein *Trap* ausgelöst (**page fault**).
  - Die *Trap*-Behandlung kann nun für das Laden der Seite vom Hintergrundspeicher sorgen und den Speicherzugriff danach wiederholen (benötigt *HW-Support* in der CPU).

**Seitentabelle**

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

# Mehrstufige Seitenadressierung

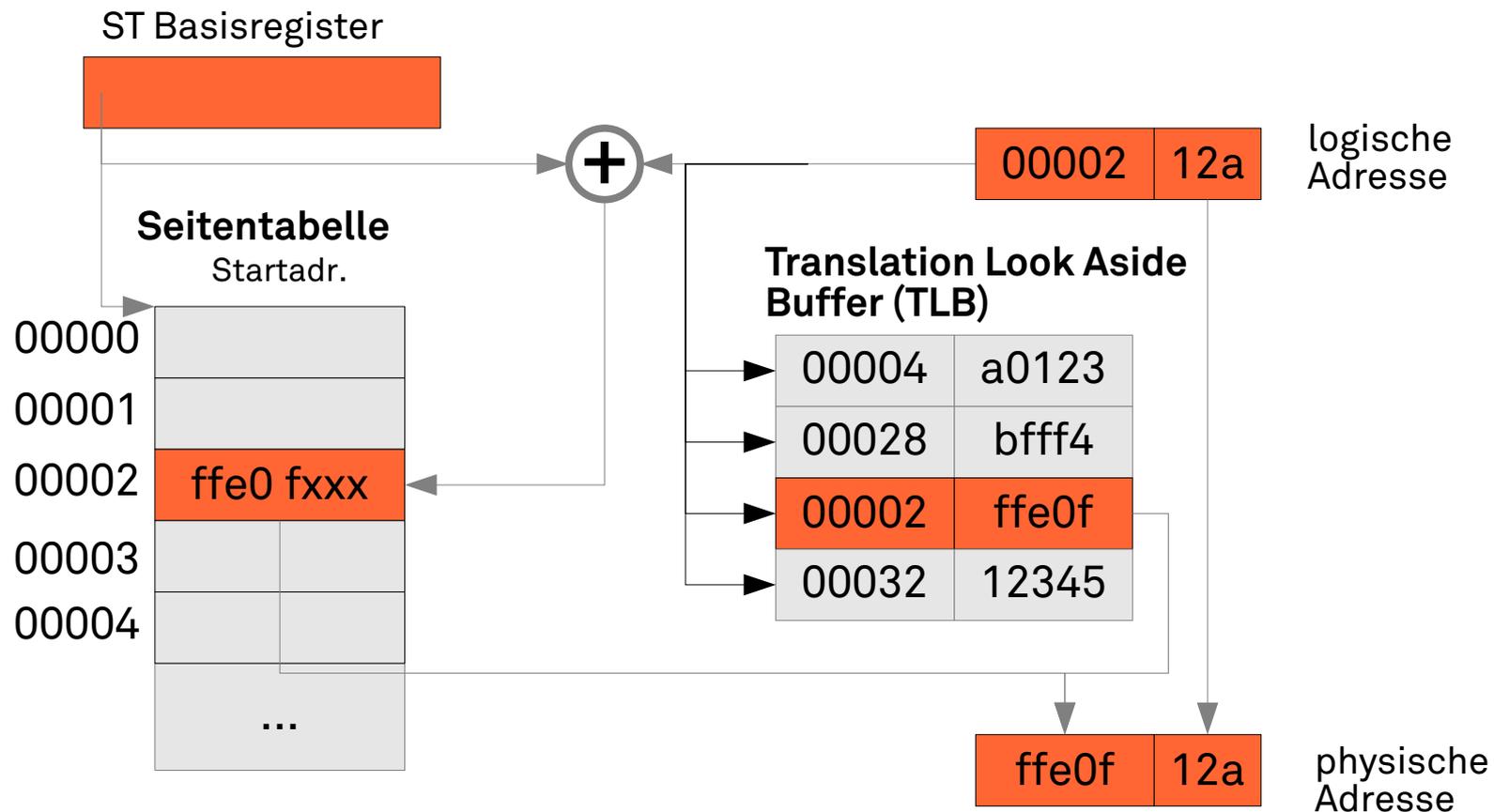
- Beispiel: zweifach indirekte Seitenadressierung



- Präsenzbit auch für jeden Eintrag in den höheren Stufen
  - Tabellen werden aus- und einlagerbar
  - Tabellen können bei Zugriff (=Bedarf) erzeugt werden (spart Speicher!)
- Aber: Noch mehr implizite Speicherzugriffe

# Translation Look-Aside Buffer (TLB)

- Schneller Registersatz wird konsultiert, **bevor** auf die Seitentabelle zugegriffen wird:

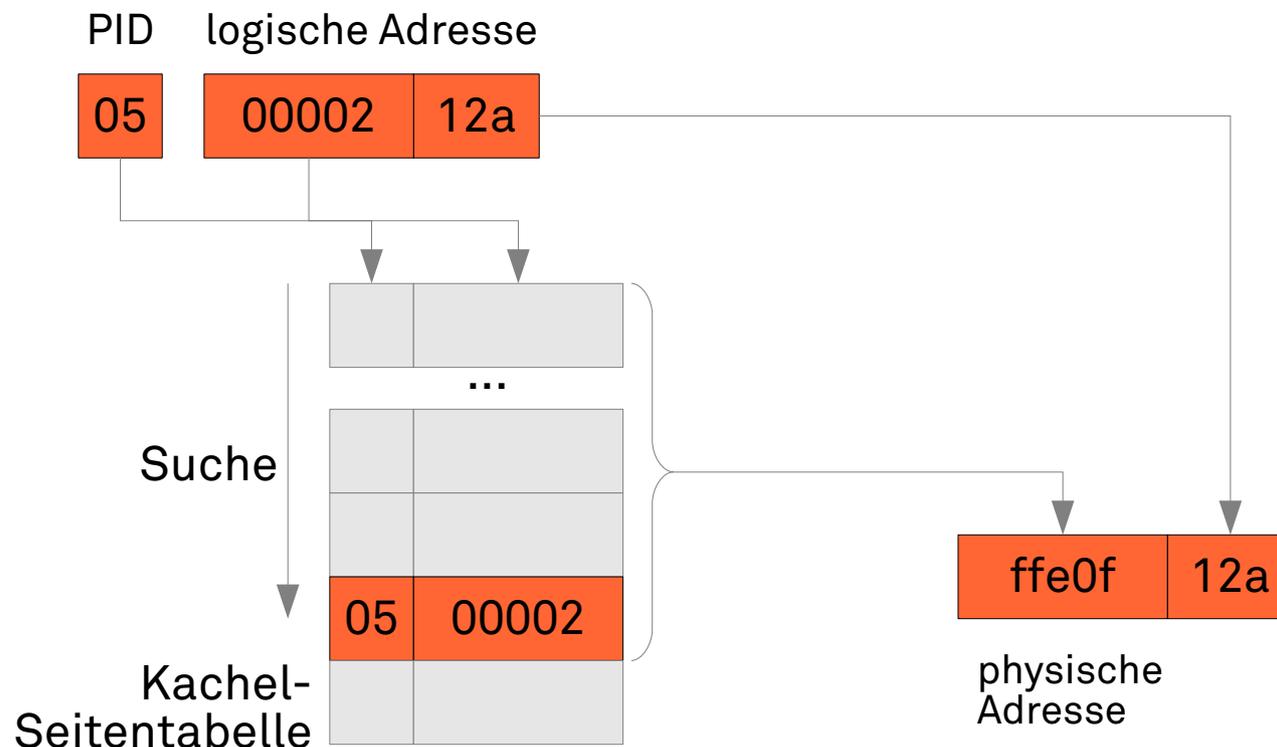


## Translation Look-Aside Buffer (2)

- Schneller Zugriff auf Seitenabbildung, falls Information im voll-assoziativen Speicher des TLB
  - keine impliziten Speicherzugriffe nötig
- Bei Kontextwechseln muss TLB gelöscht werden (**flush**)
  - Process-Context ID (PCID): flush bei Intel-CPU's seit ~2010 (und AMD-CPU's ab Zen 3 / seit 2020) nicht mehr notwendig
- 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:
  - Intel Core i7: 512 Einträge, Seitengröße 4K
  - UltraSPARC T2: Daten-TLB = 128, Code-TLB = 64, Seitengröße 8K
  - Größere TLBs bei den üblichen Taktraten zur Zeit nicht möglich.

# Invertierte Seitentabelle

- Bei großen logischen Adressräumen (z.B. 64 Bit):
  - klassische Seitentabellen sehr groß (oder ...)
  - sehr viele Abbildungsstufen
  - Tabellen sehr dünn besetzt
- **Invertierte Seitentabelle** (*Inverted Page Table*)



## Invertierte Seitentabelle (2)

### ■ Vorteile

- wenig Platz zur Speicherung der Abbildung notwendig
- Tabelle kann immer im Hauptspeicher gehalten werden

### ■ Nachteile

- Sharing von Seitenrahmen schwer zu realisieren
- prozesslokale Datenstrukturen zusätzlich nötig für Seiten, die ausgelagert sind
- **Suche in der Seitentabelle ist aufwendig**
  - Einsatz von Assoziativspeichern und Hashfunktionen

### ■ Trotz der Nachteile setzen heute viele Prozessorhersteller bei 64-Bit-Architekturen auf diese Form der Adressumsetzung

- PowerPC, UltraSparc, IA-64, (Alpha), ...
- Nicht: x86-64/amd64, Arm (AArch64)

# Inhalt

- **Grundlegende Aufgaben der Speicherverwaltung**
  - Anforderungen
  - Strategien
- **Speichervergabe**
  - Platzierungsstrategien
- **Speicherverwaltung bei Mehrprogrammbetrieb**
  - Ein-/Auslagerung
  - Relokation
- **Segmentbasierte Adressabbildung**
- **Seitenbasierte Adressabbildung**
- **Zusammenfassung**

# Zusammenfassung

- Bei der Speicherverwaltung arbeitet das Betriebssystem sehr eng mit der Hardware zusammen.
  - **Segmentierung** und/oder **Seitenadressierung**
  - Durch die implizite Indirektion beim Speicherzugriff können Programme und Daten unter der Kontrolle des Betriebssystems im laufenden Betrieb beliebig verschoben werden.
- Zusätzlich sind diverse strategische Entscheidungen zu treffen.
  - **Platzierungsstrategie** (*First Fit, Best Fit, Buddy, ...*)
    - Unterscheiden sich bzgl. Verschnitt sowie Belegungs- und Freigabeaufwand.
    - Strategiewahl hängt vom erwarteten Anwendungsprofil ab.
  - Bei Ein-/Auslagerung von Segmenten oder Seiten:
    - Ladestrategie
    - Ersetzungsstrategie



nächstes Mal mehr dazu