

Betriebssysteme (BS)

Speicherverwaltung

<http://ess.cs.tu-dortmund.de/DE/Teaching/SS2017/BS/>

Olaf Spinczyk¹

olaf.spinczyk@tu-dortmund.de
<http://ess.cs.tu-dortmund.de/~os>

¹ In Zusammenarbeit mit **Franz Hauck**, Universität Ulm





Inhalt

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

Silberschatz, Kap. ...
8: *Memory-Management
Strategies*

Tanenbaum, Kap. ...
4: Speicherverwaltung



Inhalt

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



Wiederholung: Betriebsmittel

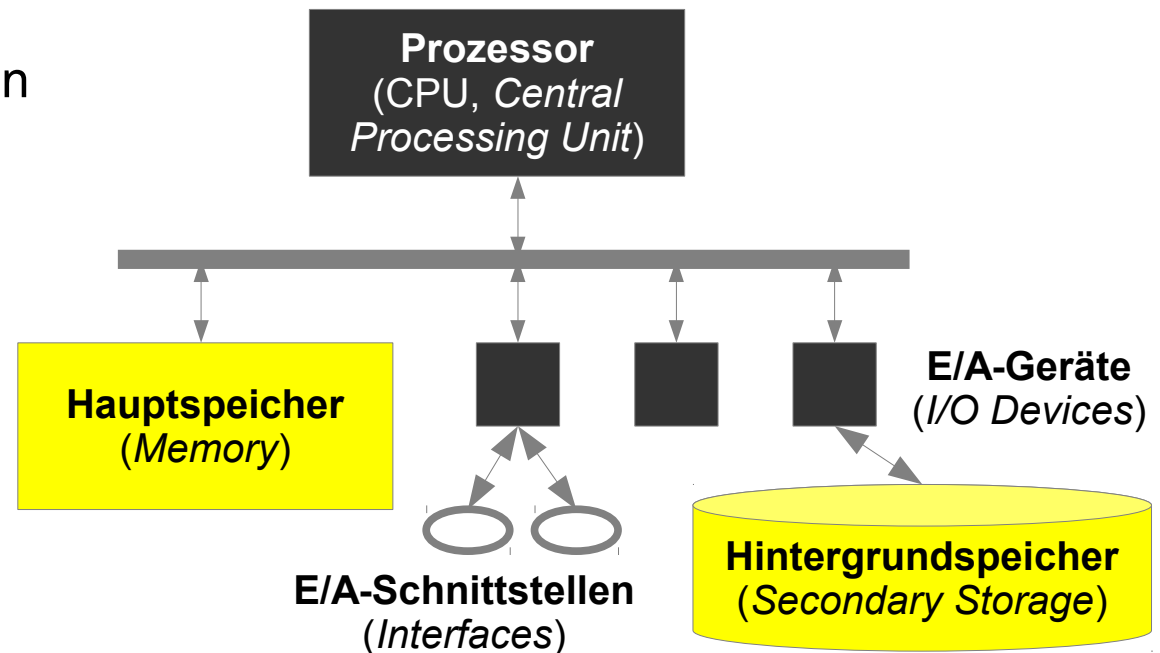
- Das Betriebssystem hat folgende Aufgaben:
 - Verwaltung der Betriebsmittel des Rechners
 - Schaffung von Abstraktionen, die Anwendungen einen einfachen und effizienten Umgang mit Betriebsmitteln erlauben

- Bisher: **Prozesse**

- Konzept zur Abstraktion von der realen CPU

- Nun: **Speicher**

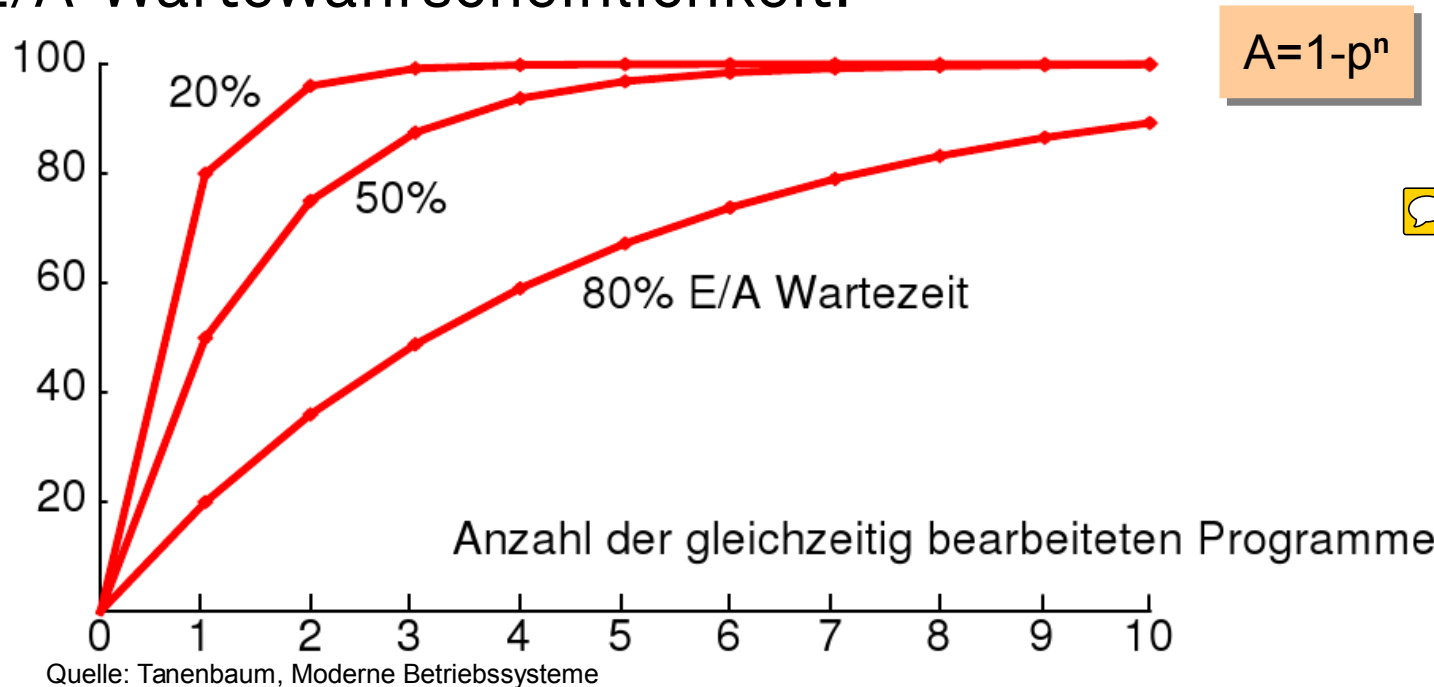
- Verwaltung von Haupt- und Hintergrundspeicher





Wiederholung: Mehrprogrammbetrieb

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



→ **Mehrprogrammbetrieb ist essentiell für eine hohe Auslastung der CPU.**

- Beim Starten und Beenden der Prozesse muss dynamisch Speicher zugewiesen bzw. zurückgenommen werden!



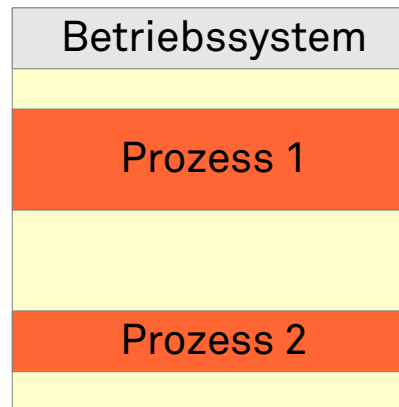
Inhalt

- Wiederholung
- **Grundlegende Aufgaben der Speicherverwaltung**
 - Anforderungen
 - Strategien
- Speichervergabe
 - Platzierungsstrategien
- 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

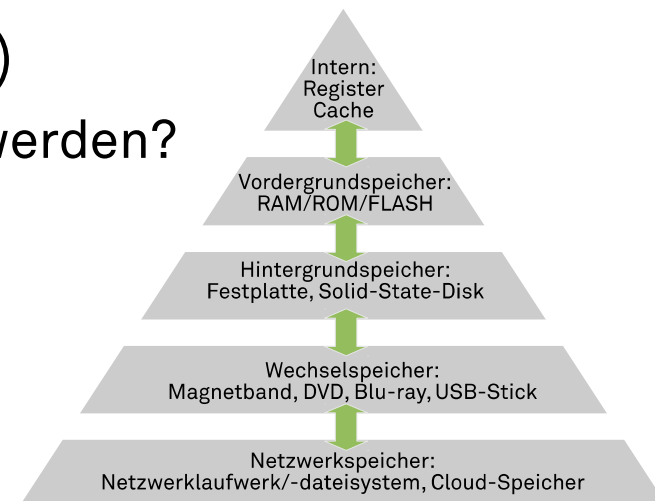
- Freie Speicherbereiche kennen, verwalten und vergeben
- Ein- und Auslagern von Prozessen
- Relokation von Programmbefehlen
- Hardwareunterstützung ausnutzen



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





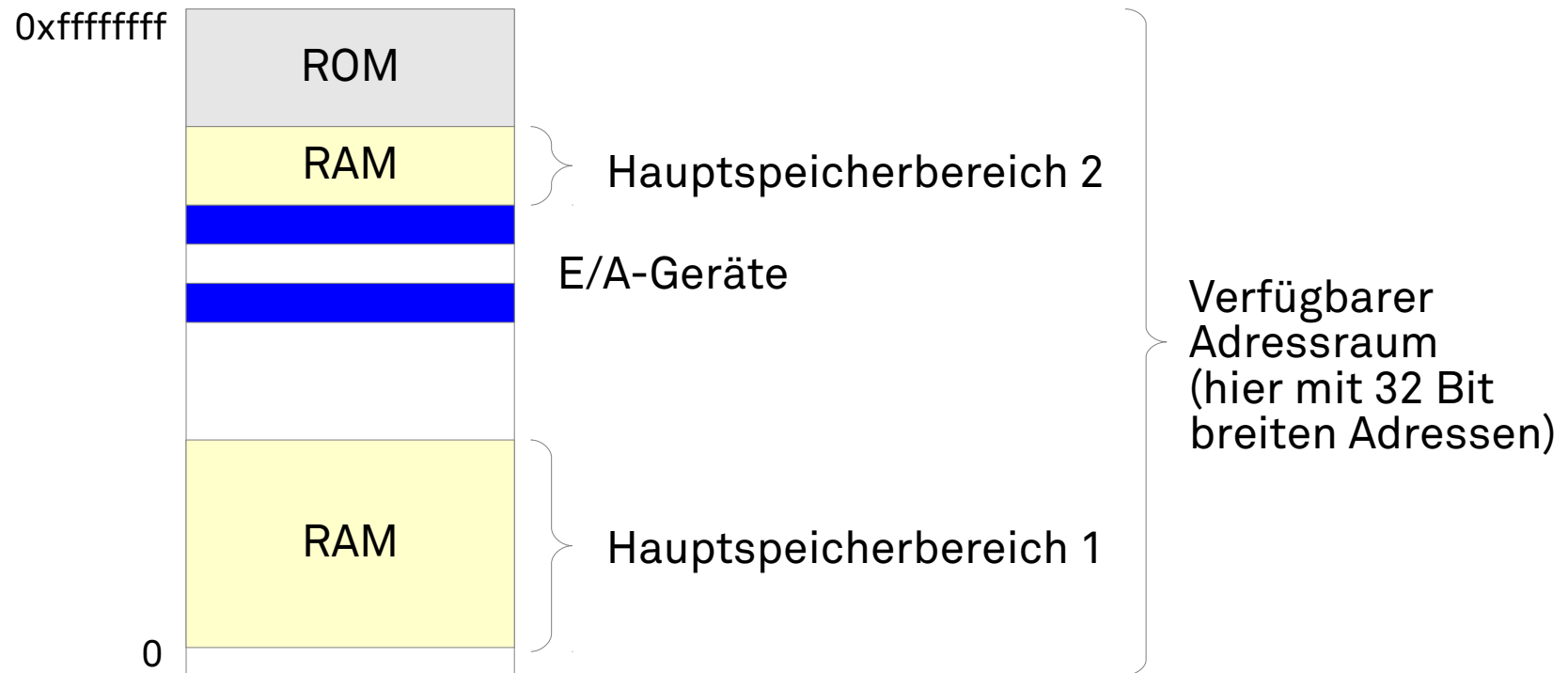
Inhalt

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



Speichervergabe: Problemstellung

- Verfügbarer Speicher



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



Speichervergabe: Problemstellung

Belegung des verfügbaren Hauptspeichers durch ...

- **Benutzerprogramme**
 - Programmbefehle (Code)
 - 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**



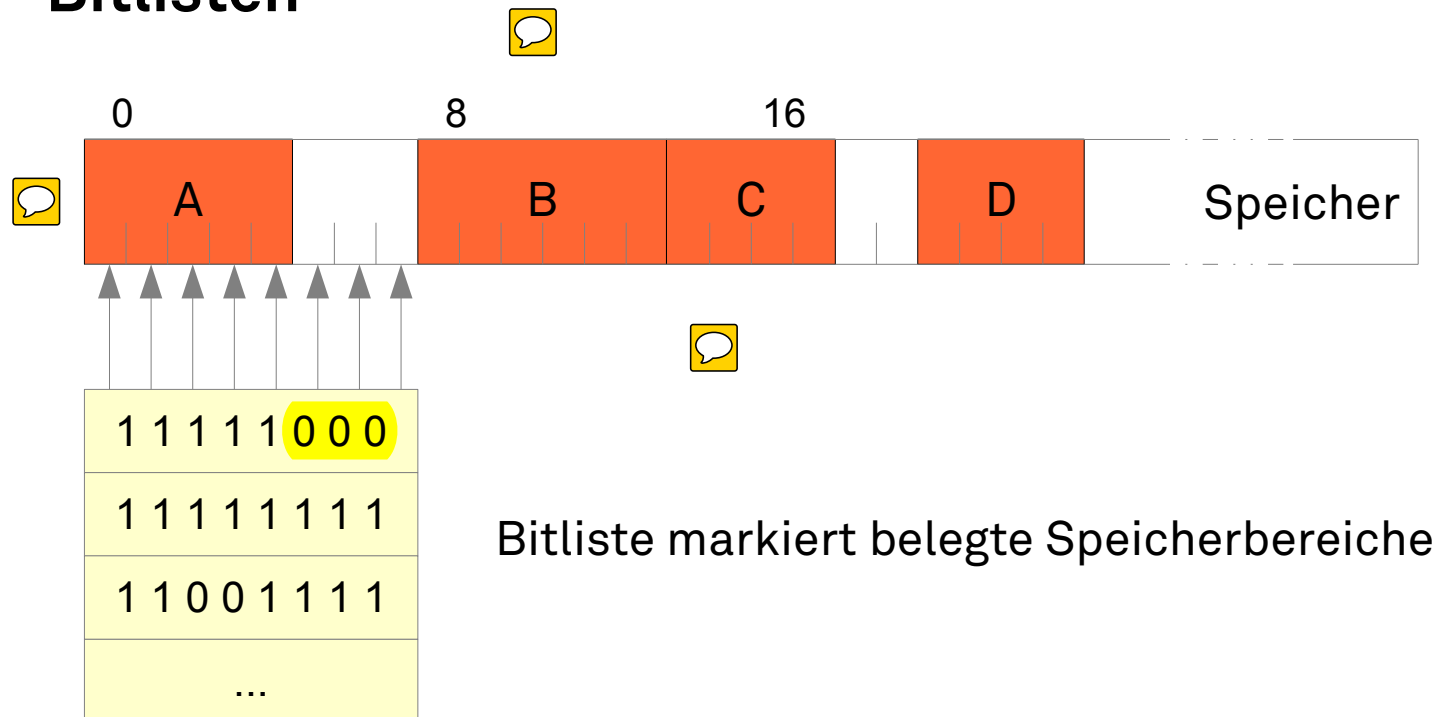
Dynamische Speicherzuteilung

- **Segmente**
 - zusammenhängender Speicherbereich
(Bereich mit aufeinanderfolgenden Adressen)
- **Allokation** (Belegung) und **Freigabe** von Segmenten
- Ein Anwendungsprogramm besitzt üblicherweise folgende Segmente:
 - Codesegment
 - Datensegment
 - Stacksegment (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



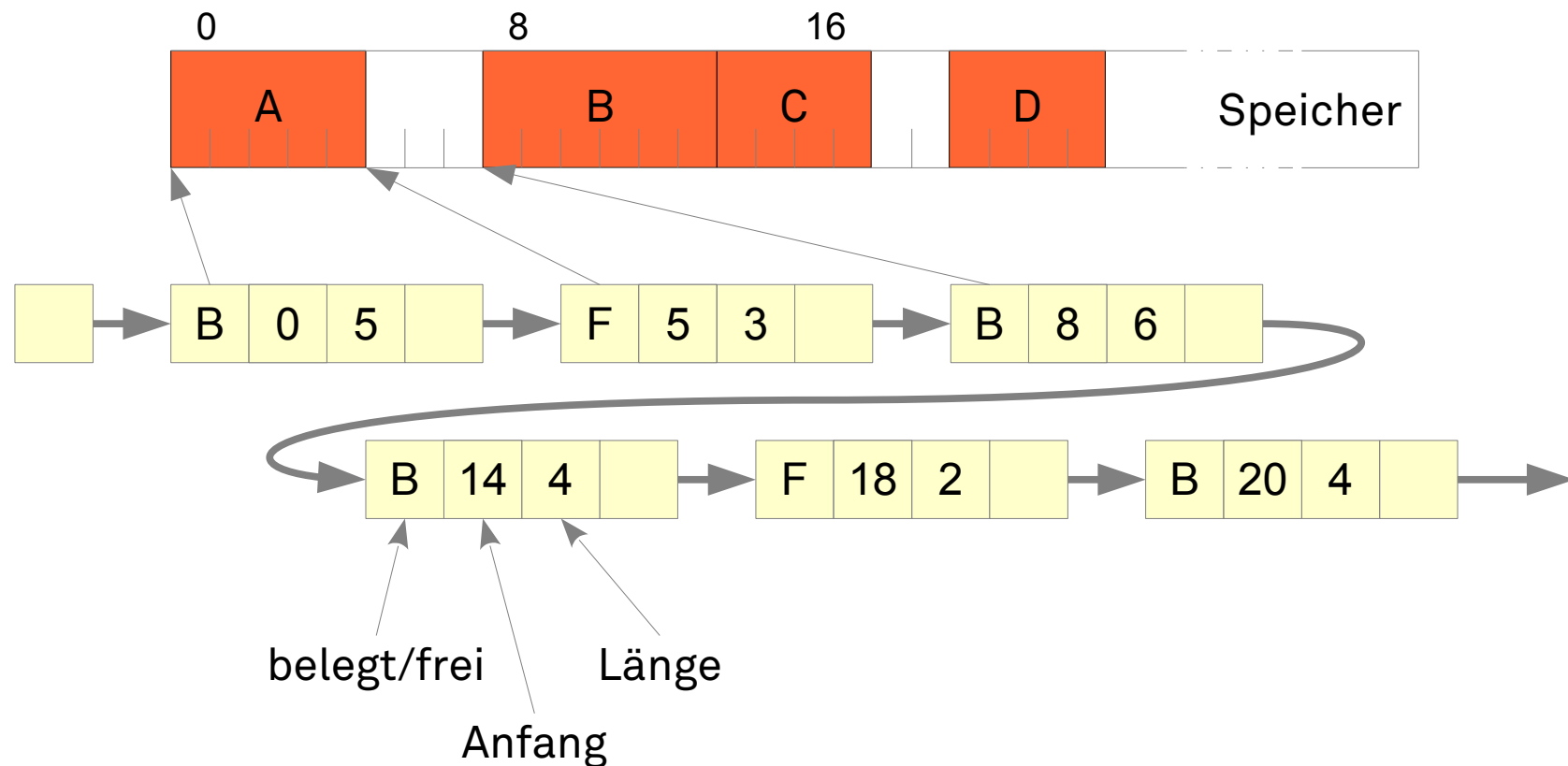
Speichereinheiten gleicher Größe (z.B. 1 Byte, 64 Byte, 1024 Byte)



Freispeicherverwaltung (2)



- Verkettete Liste

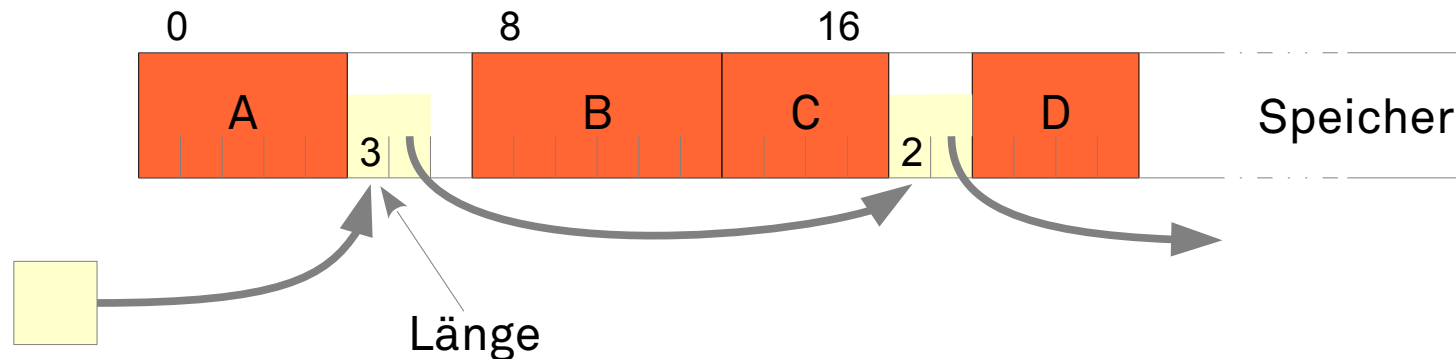


Repräsentation auch von freien Segmenten



Freispeicherverwaltung (3)

• Verkettete Liste im freien Speicher



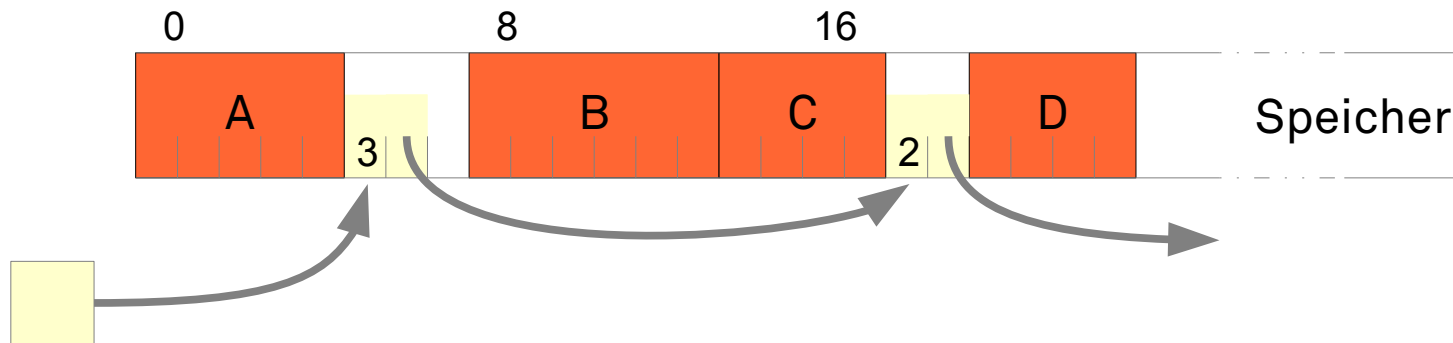
Mindestlückengröße muss garantiert werden

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

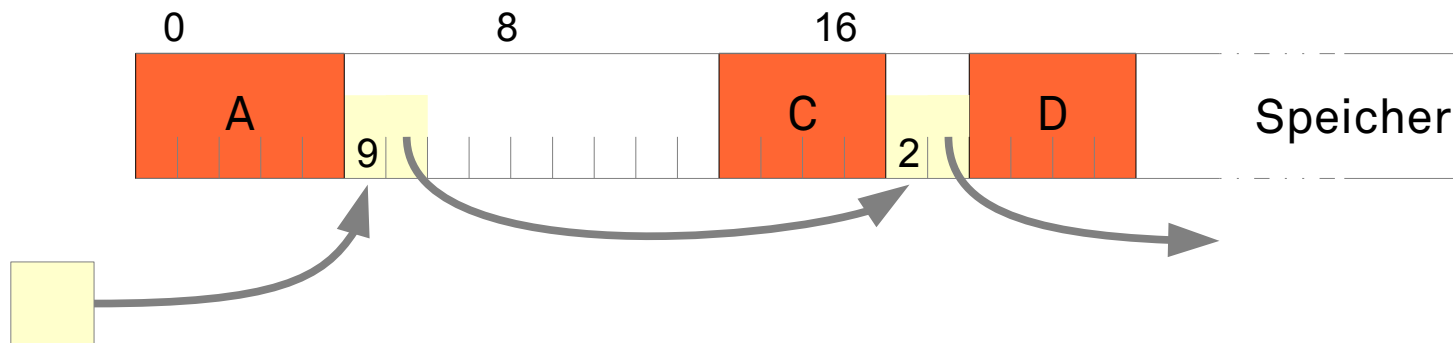


Speicherfreigabe

- Verschmelzung von Lücken





Nach Freigabe von B:





Platzierungsstrategien

...auf der Basis von unterschiedlich sortierten Löcherlisten:

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



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 Speicherbereich 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
- 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*)



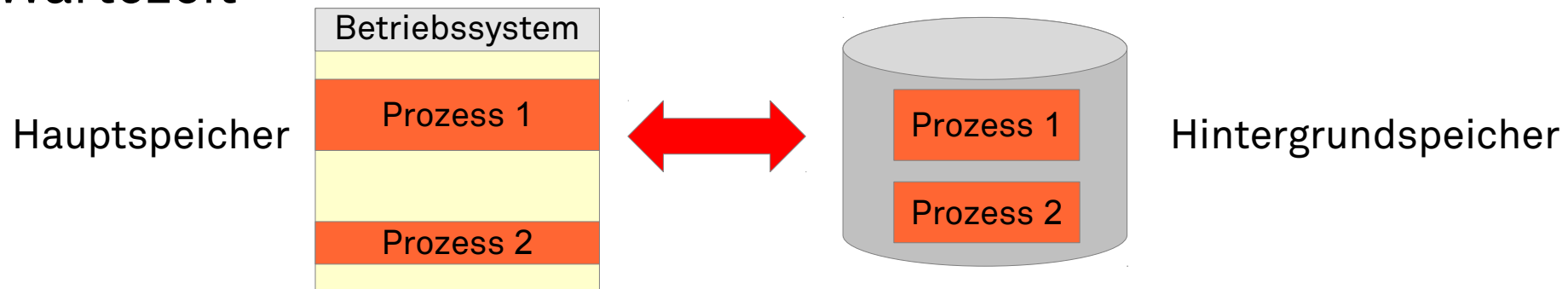
Inhalt

- Wiederholung
- 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 oder Round-Robin Schedulingstrategie
- 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 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

Betriebssystem
Partition 1
Partition 2
Partition 3
Partition 4

➔ Besser: Dynamische Belegung und **Programmrelokation**



Adressbindung und Relokation

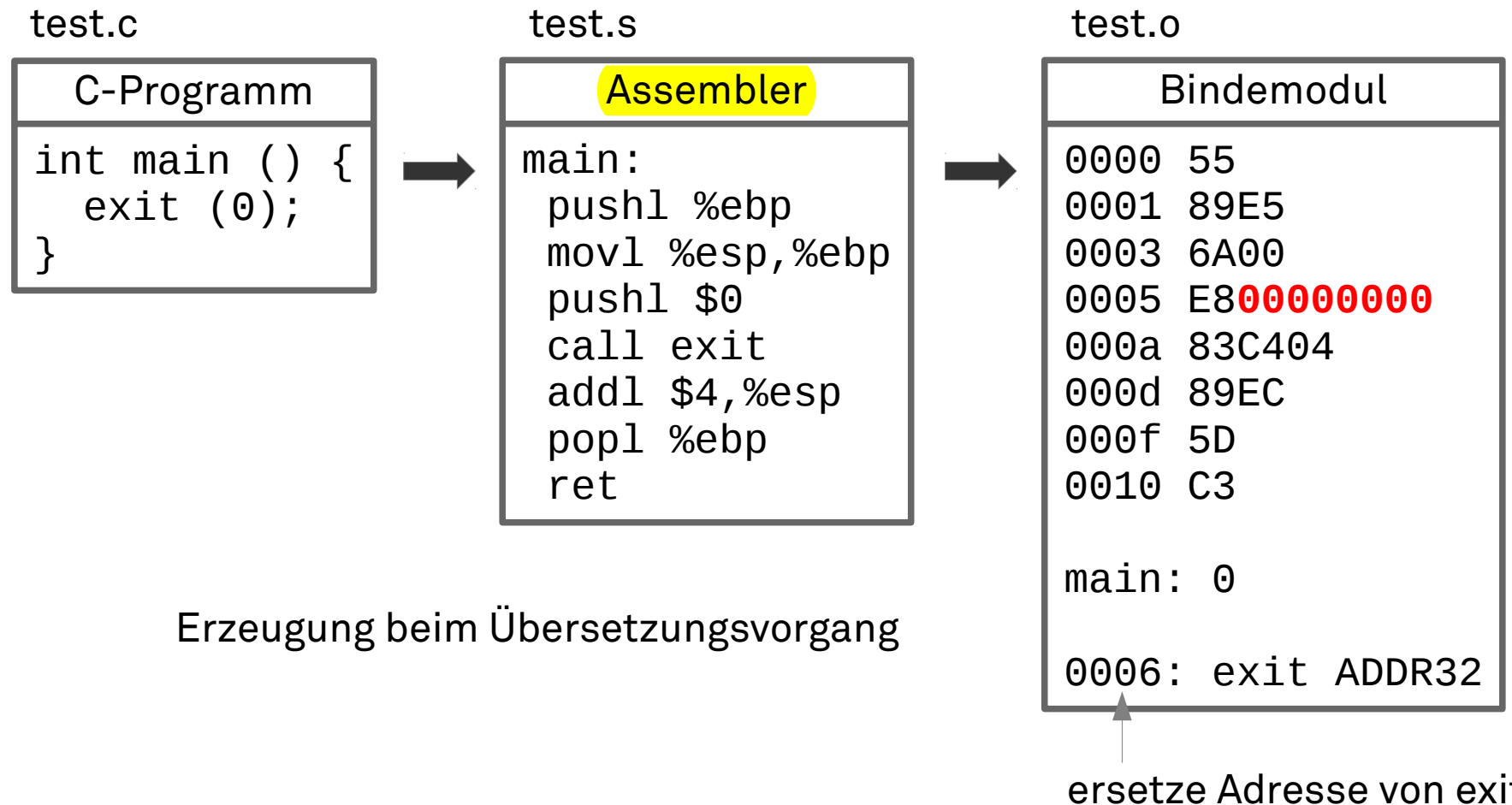
- **Problem:** Maschinenbefehle benutzen absolute Adressen
 - z.B. ein Sprungbefehl in ein Unterprogramm oder ein Ladebefehl für eine Variable aus dem Datensegment
 - Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Adressbindung zwischen dem Befehl und seinem Operanden herzustellen ...
- **Absolutes Binden** (*Compile 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
- **Dynamisches Binden** (*Execution Time*)
 - Der Code greift grundsätzlich nur indirekt auf Operanden zu.
 - Das Programm kann jederzeit im Speicher verschoben werden.





Adressbindung und Relokation (2)

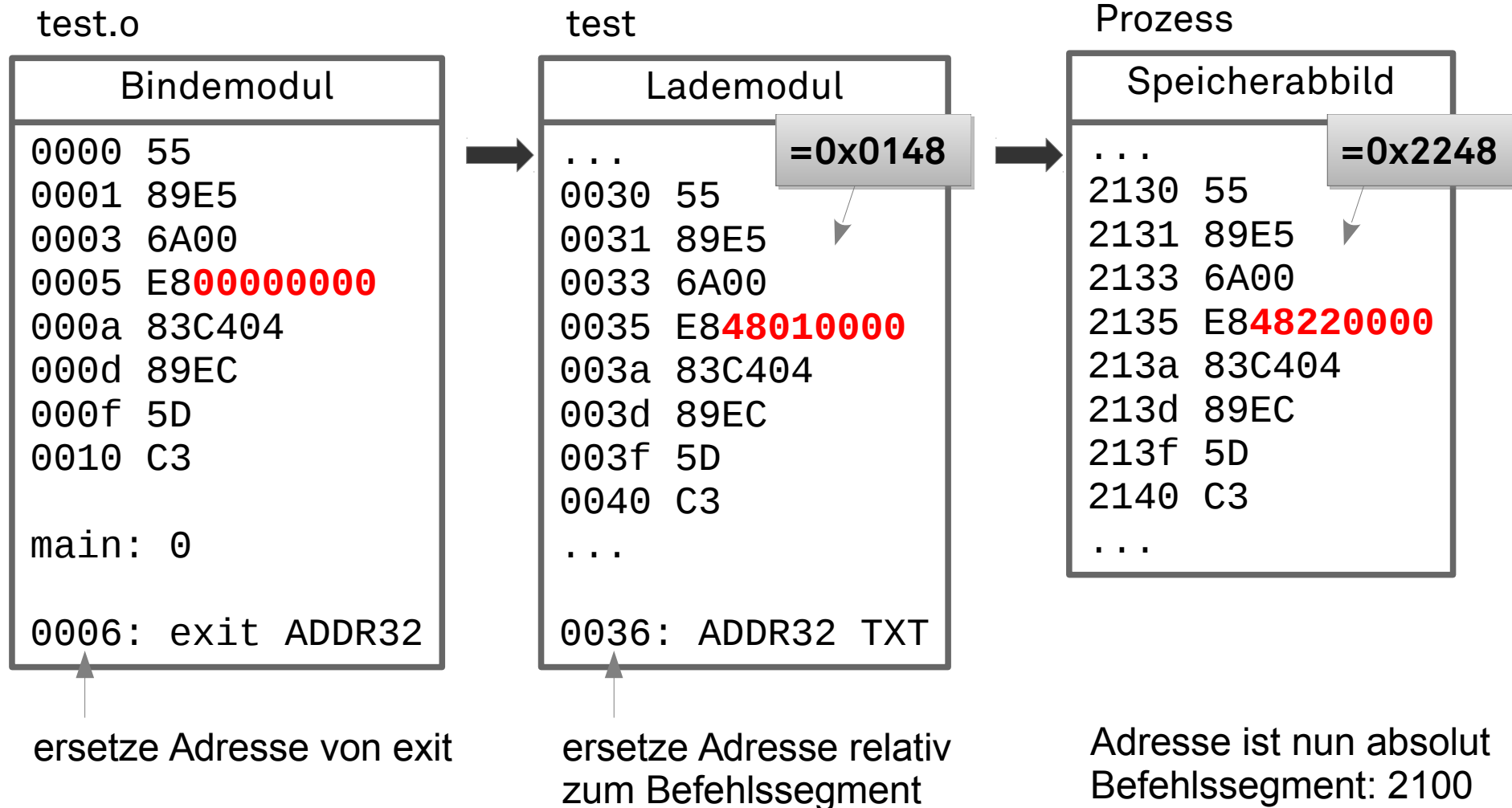
- Übersetzungsvorgang (Erzeugung der Relokationsinformationen)





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 „physikalische“ Adressen
 - Relokation beim Binden reicht (außer für „*Shared Libraries*“)



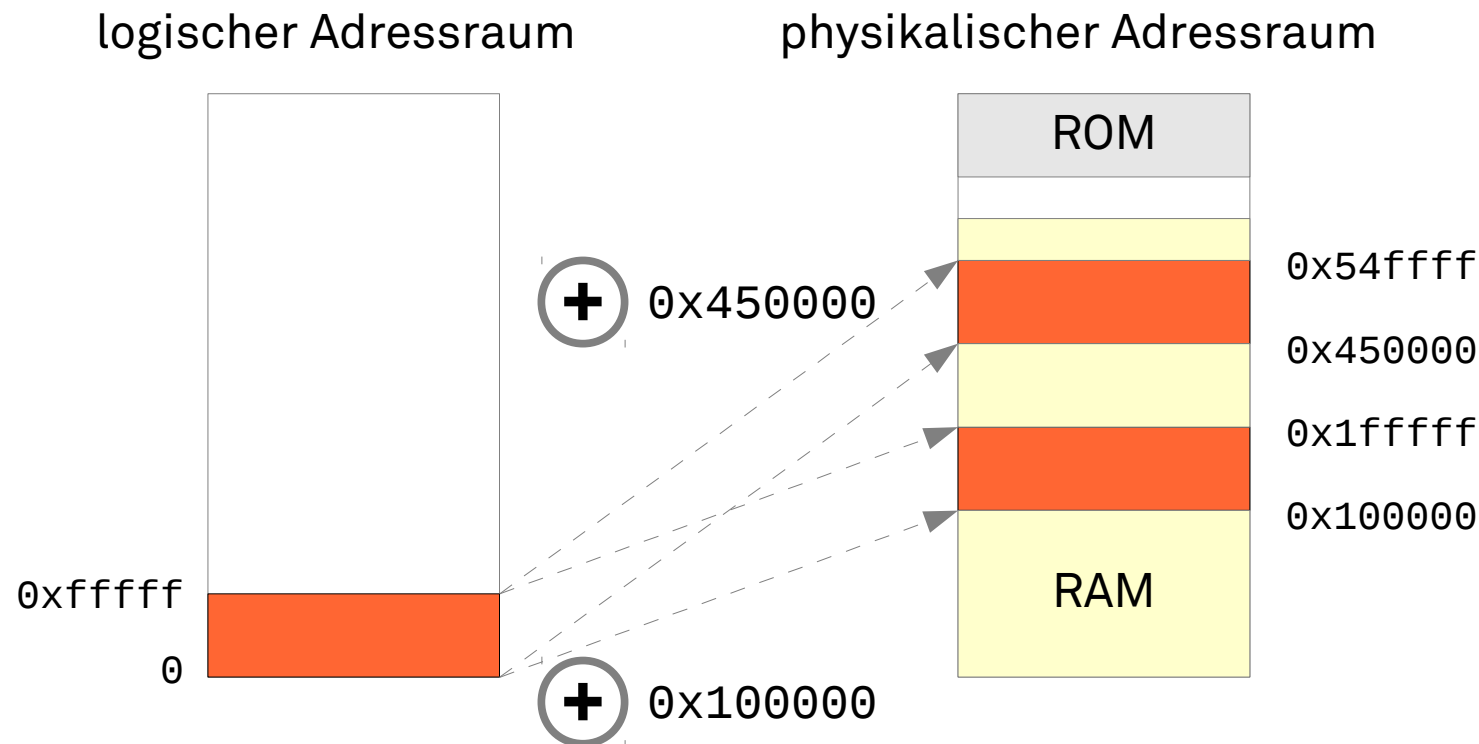
Inhalt

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



Segmentierung

- Hardwareunterstützung: Abbildung logischer auf physikalische Adressen

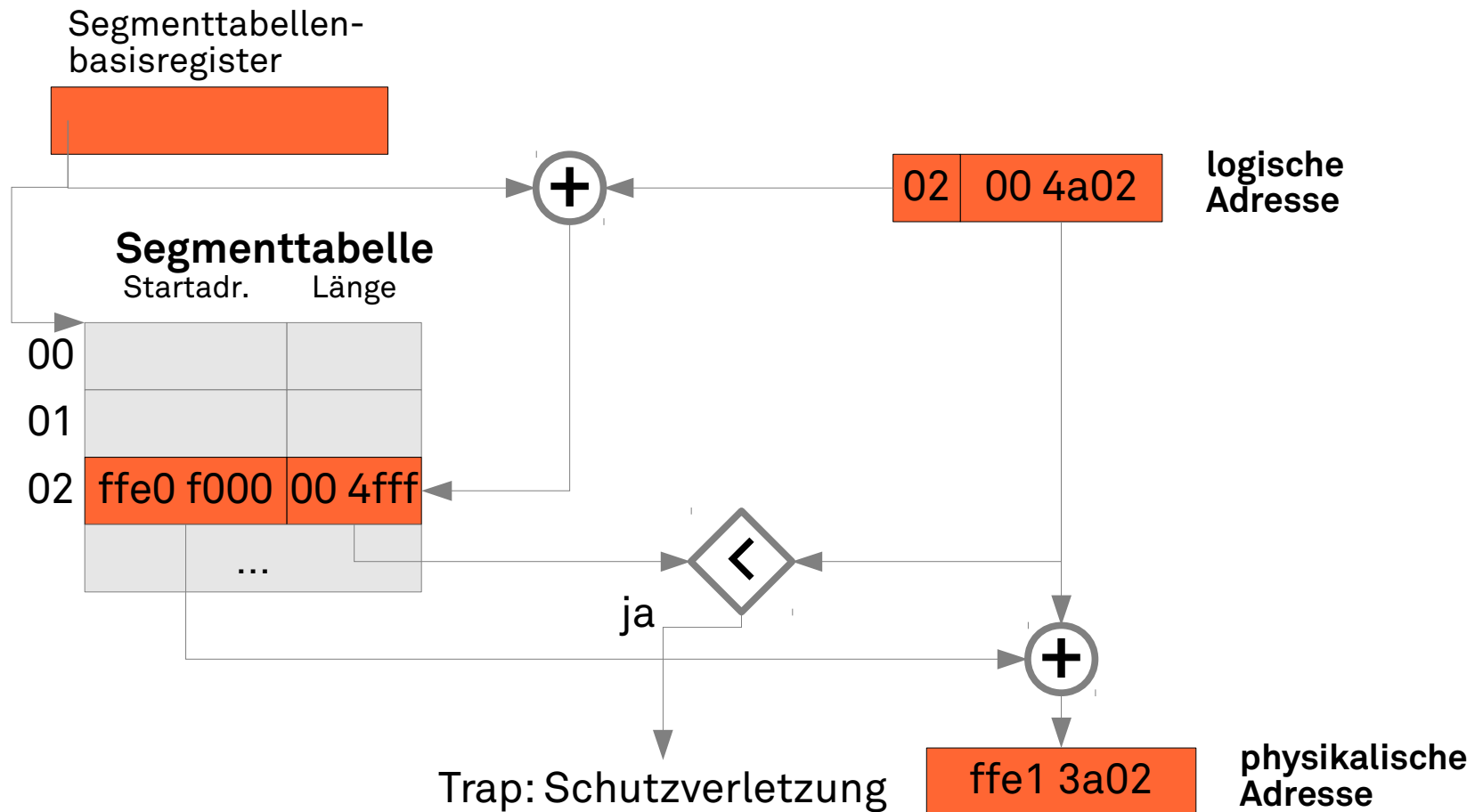


Das Segment des logischen Adressraums kann an jeder beliebigen Stelle im physikalischen Adressraum liegen. Das Betriebssystem bestimmt, wo ein Segment im physikalischen Adressraum tatsächlich liegen soll.



Segmentierung (2)

- Realisierung mit Übersetzungstabelle (pro Prozess)





Segmentierung (3)

- Hardware heißt **MMU** (*Memory Management Unit*)
- Schutz vor Segmentübertretung
 - Rechte zum Lesen, Schreiben und Ausführen von Befehlen, die von der MMU geprüft werden
 - *Trap* 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*)



Segmentierung (4)

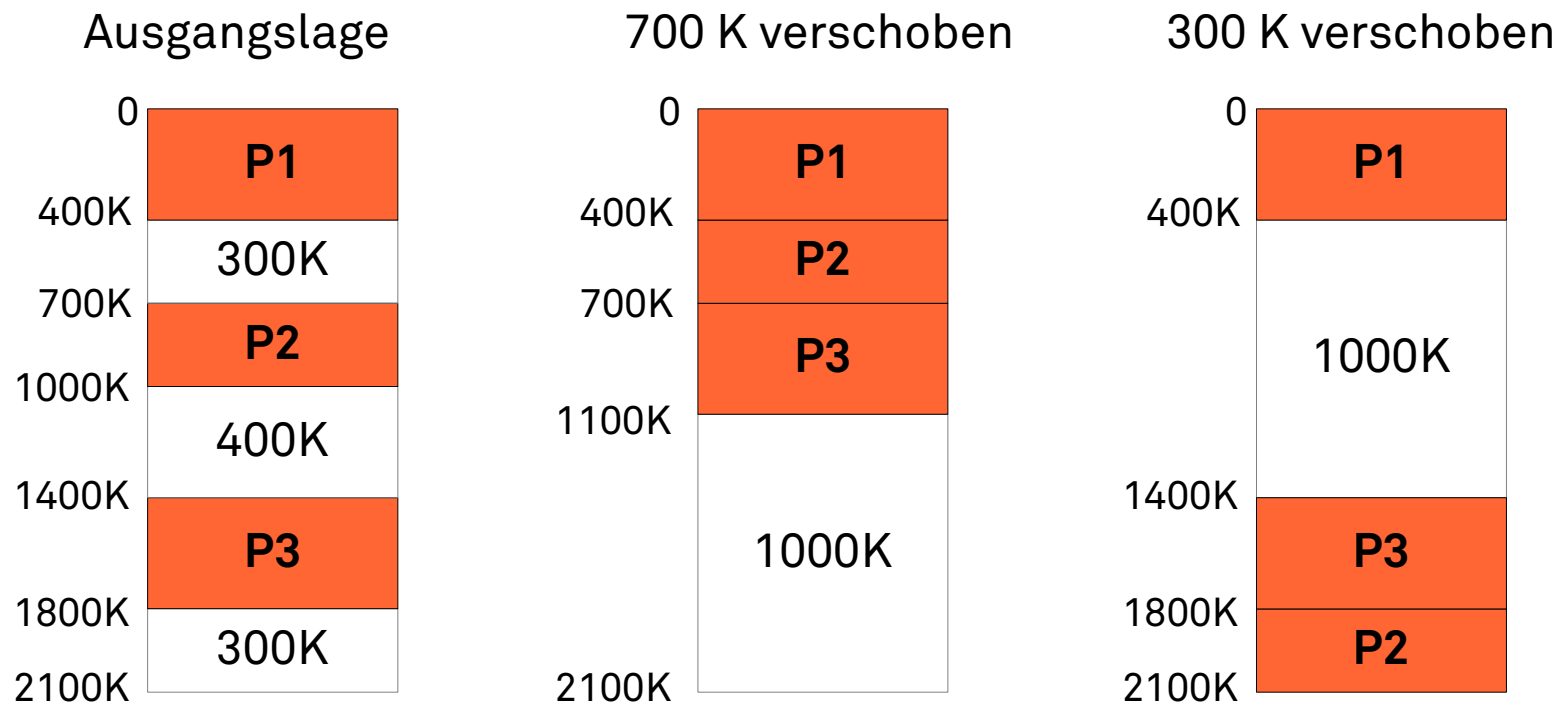
Probleme ...

- **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





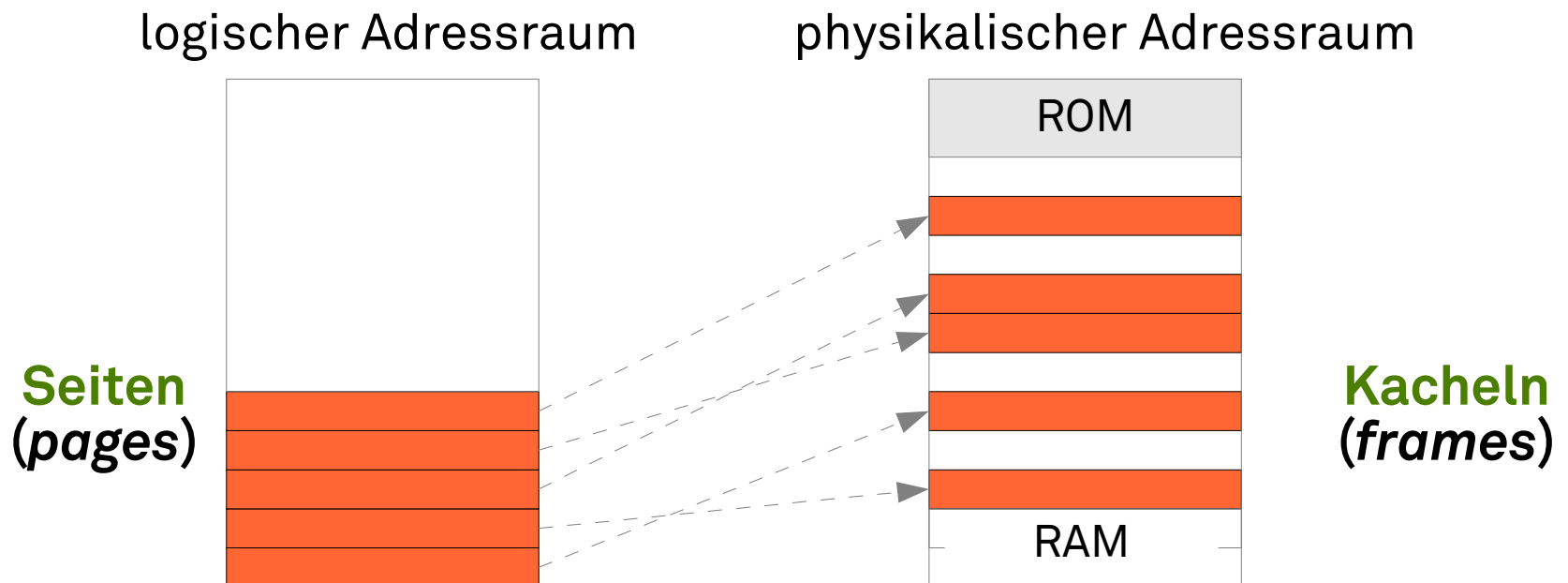
Inhalt

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



Seitenadressierung (*paging*)

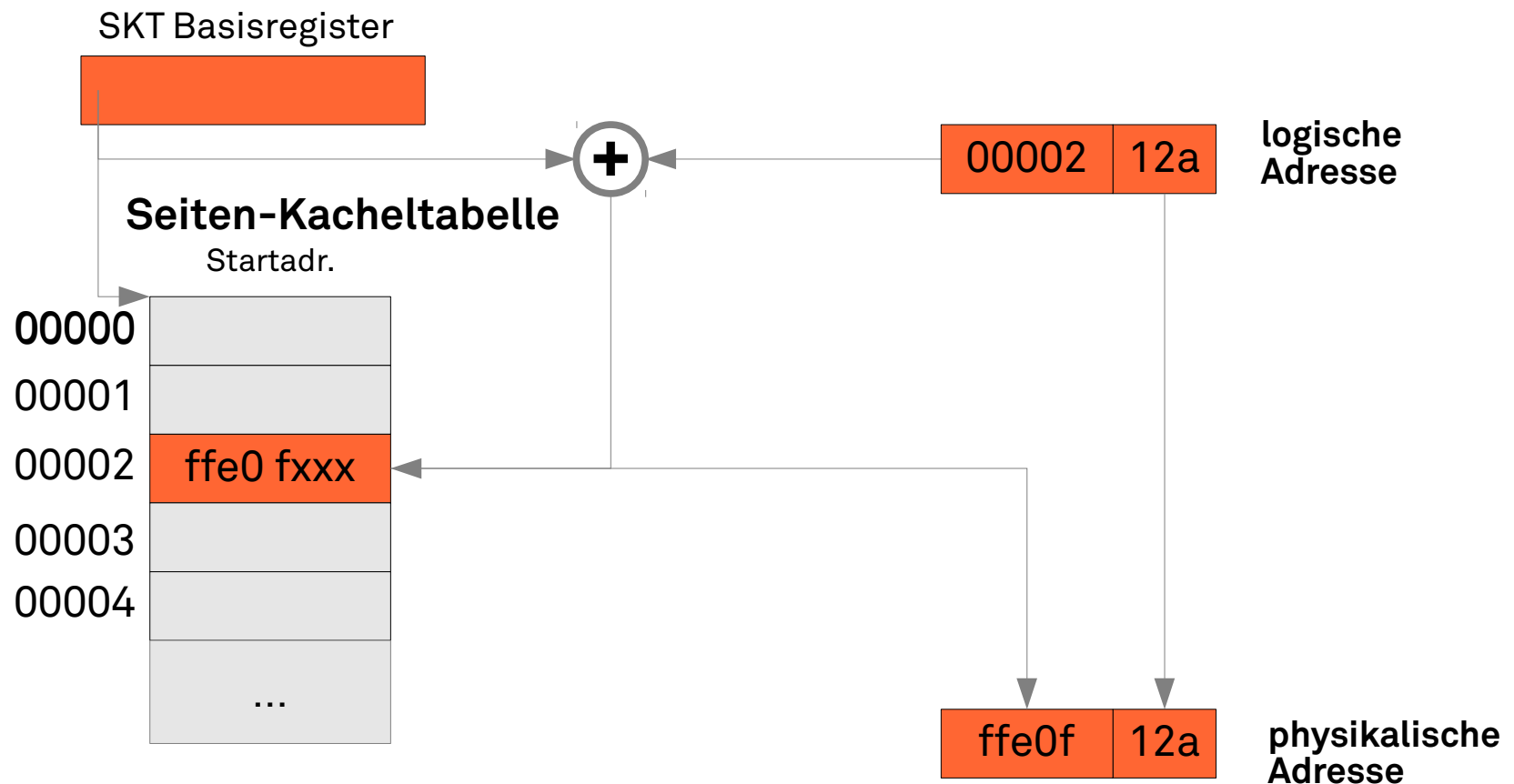
- Einteilung des logischen Adressraums in gleichgroße Seiten, die an beliebigen Stellen im physikalischen Adressraum liegen können
 - Lösung des Fragmentierungsproblems
 - keine Kompaktifizierung mehr nötig
 - Vereinfacht Speicherbelegung und Ein-/Auslagerungen





MMU mit Seiten-Kacheltabelle

- Tabelle setzt Seiten in Kacheln um





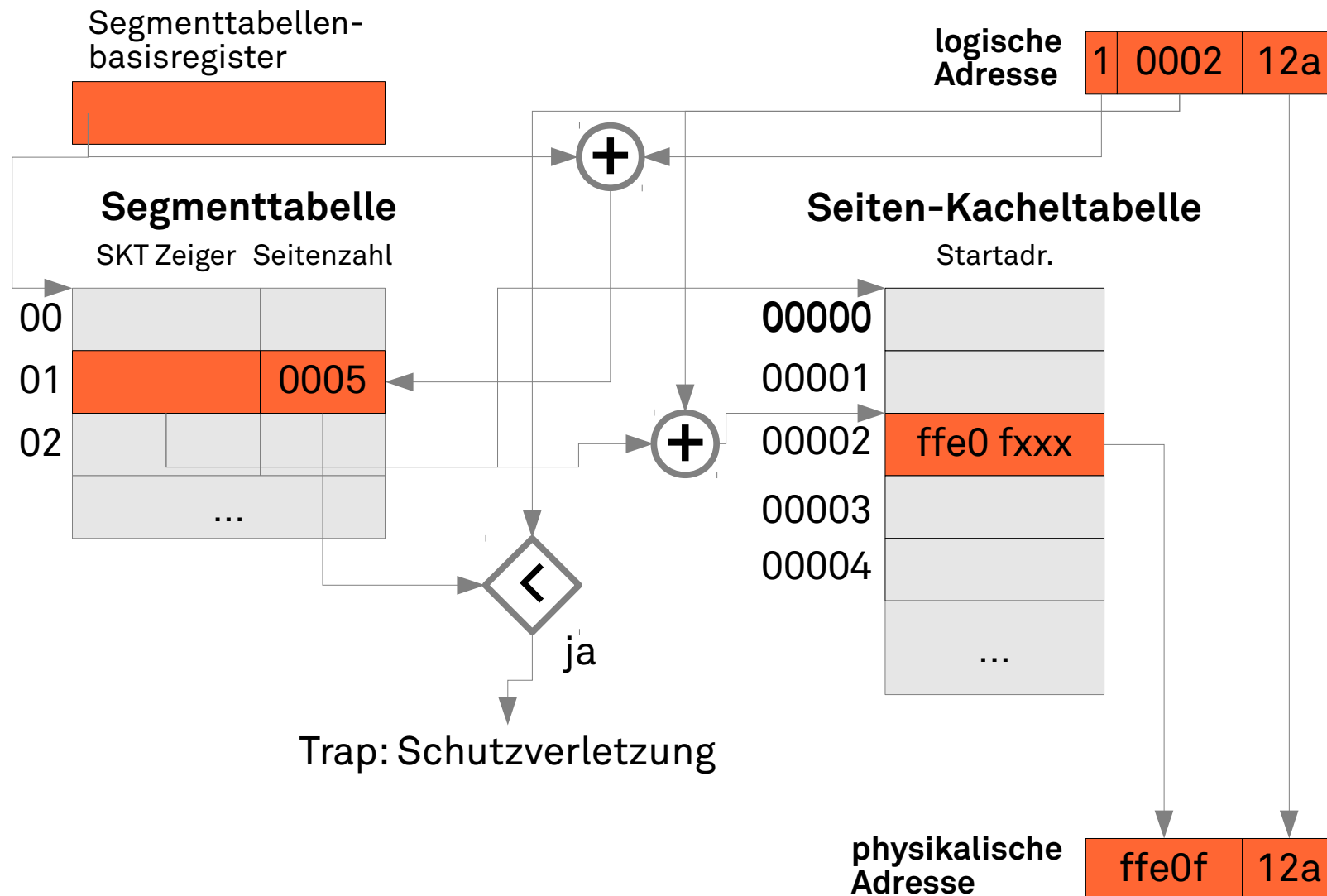
MMU mit Seiten-Kacheltabelle (2)

- 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
 - sinngemäße Nutzung des Speichers schwerer zu kontrollieren (push/pop nur auf „Stack“, Ausführung nur von „Text“, ...)

➔ **Kombination mit Segmentierung**



Segmentierung und Seitenadressierung





Segm. und 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).

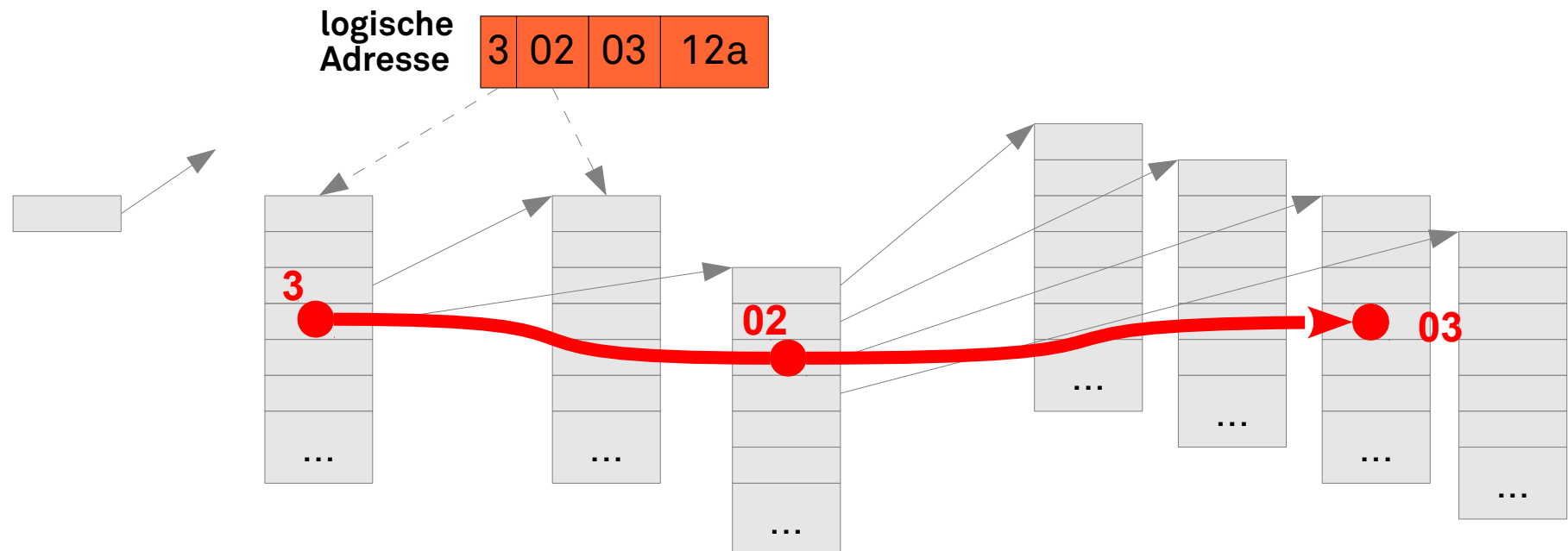
Seiten-Kacheltabelle

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



Mehrstufige Seitenadressierung

- Beispiel: zweifach indirekte Seitenadressierung

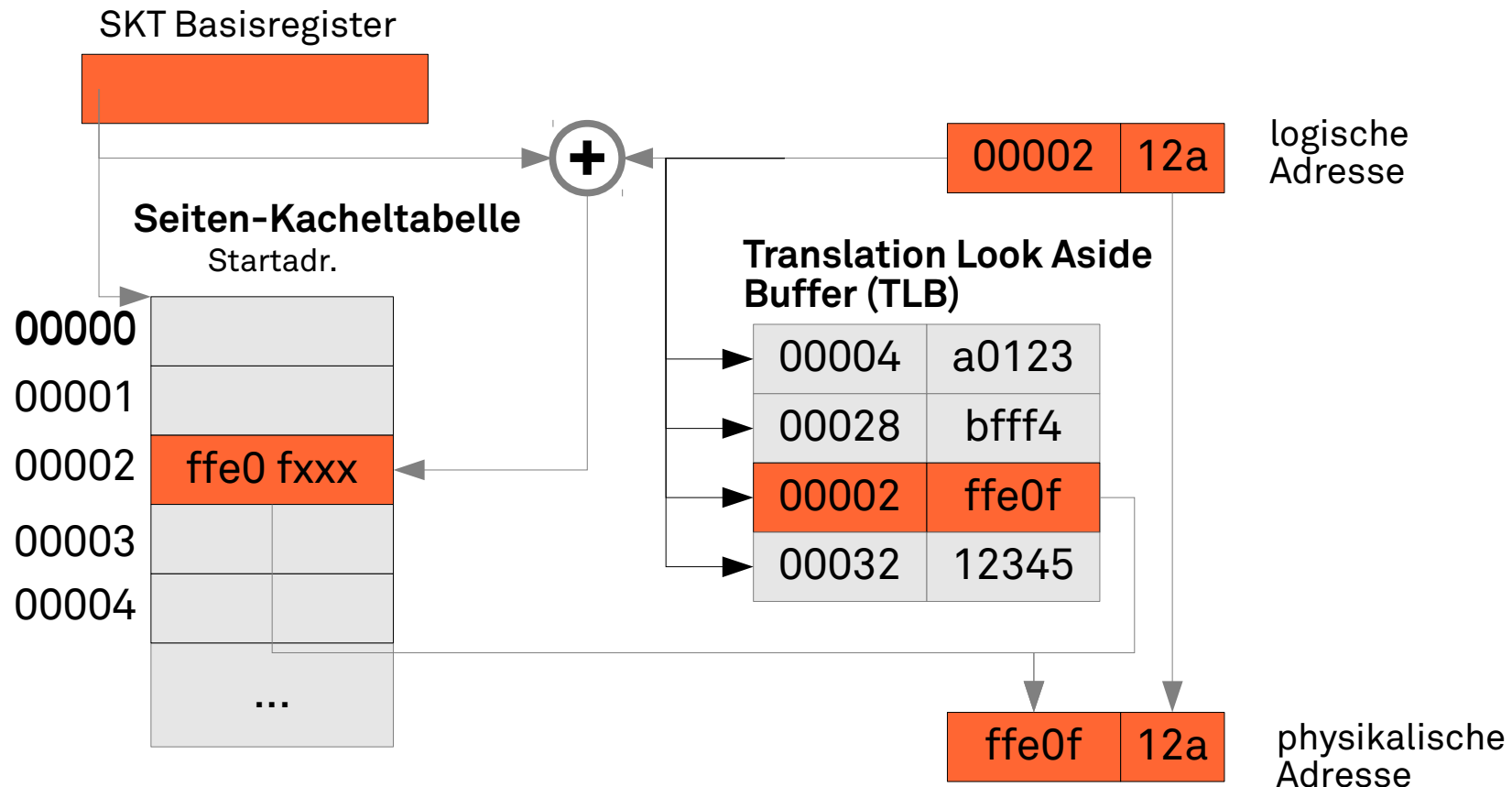


- Präsenzbit auch für jeden Eintrag in den höheren Stufen
 - Tabellen werden aus- und einlagerbar
 - Tabelle können bei Zugriff (=Bedarf) erzeugt werden (spart Speicher!)
- Aber: Noch mehr implizite Speicherzugriffe



Translation Look-Aside Buffer (TLB)

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





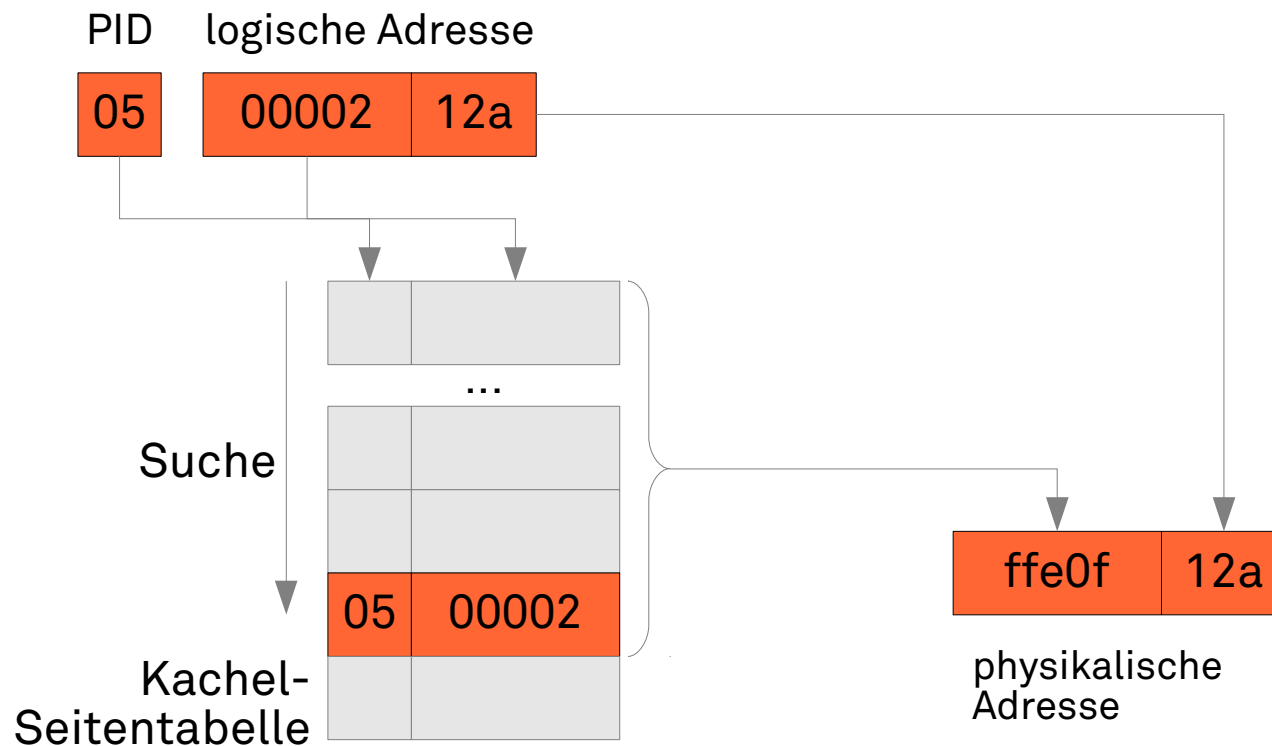
Translation Look-Aside Buffer (2)

- Schneller Zugriff auf Seitenabbildung, falls Information im voll-assoziativen Speicher des TLB
 - keine impliziten Speicherzugriffe nötig
- Bei Kontextwechseln muss TLB gelöscht werden (*flush*)
- 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 Seiten-Kacheltabelle

- Bei großen logischen Adressräumen (z.B. 64 Bit):
 - Klassische Seiten-Kacheltabellen sehr groß (oder ...)
 - Sehr viele Abbildungsstufen
 - Tabellen sehr dünn besetzt
- Invertierte Seiten-Kacheltabelle (*Inverted Page Table*)





Invertierte Seiten-Kacheltabelle (2)

- **Vorteile**

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

- **Nachteile**

- *Sharing* von Kacheln schwer zu realisieren
- prozesslokale Datenstrukturen zusätzlich nötig für Seiten, die ausgelagert sind
- Suche in der **KST** ist aufwendig
 - Einsatz von Assoziativspeichern und Hashfunktionen
- Trotz der Nachteile setzen heute viele Prozessorhersteller bei 64-Bit-Architekturen auf diese Form der Adressumsetzung
 - UltraSparc, PowerPC, IA-64, (Alpha), ...



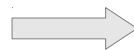
Inhalt

- Wiederholung
- 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