

Systeme I: Betriebssysteme

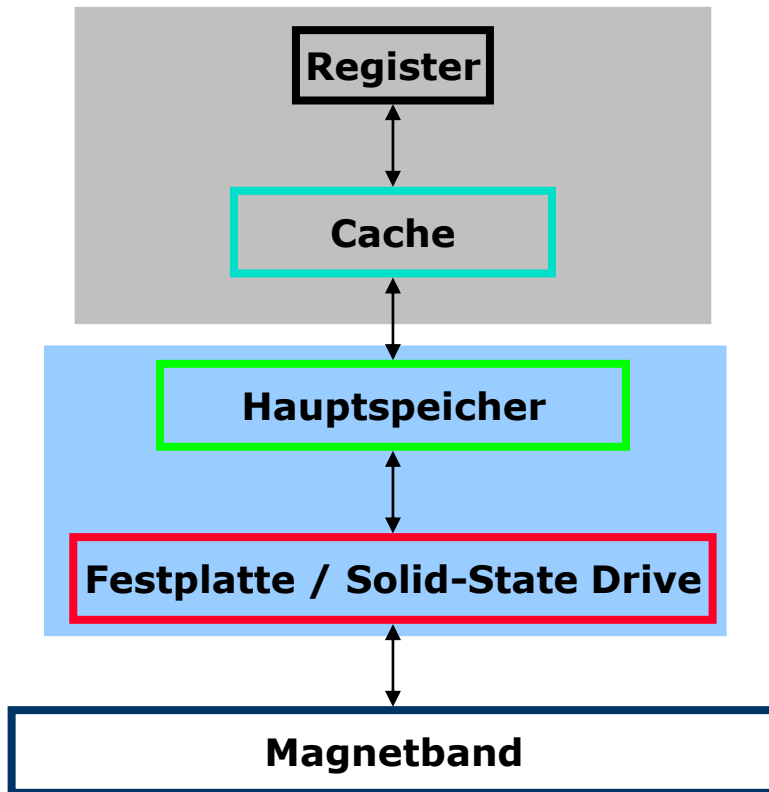
Kapitel 8 **Speicherverwaltung**



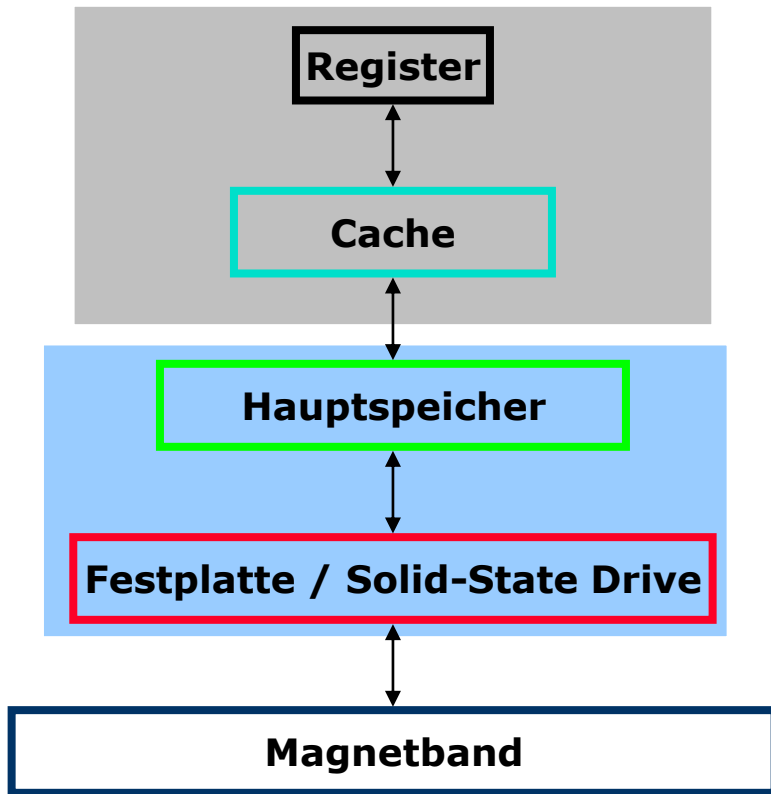
Inhalt Vorlesung

- Aufbau einfacher Rechner
- Überblick: Aufgabe, historische Entwicklung, unterschiedliche Arten von Betriebssystemen
- Betriebssysteme: Komponenten & Konzepte
 - Dateisysteme
 - Prozesse
 - Nebenläufigkeit und wechselseitiger Ausschluss
 - Deadlocks
 - Scheduling
 - **Speicherverwaltung**
 - Sicherheit

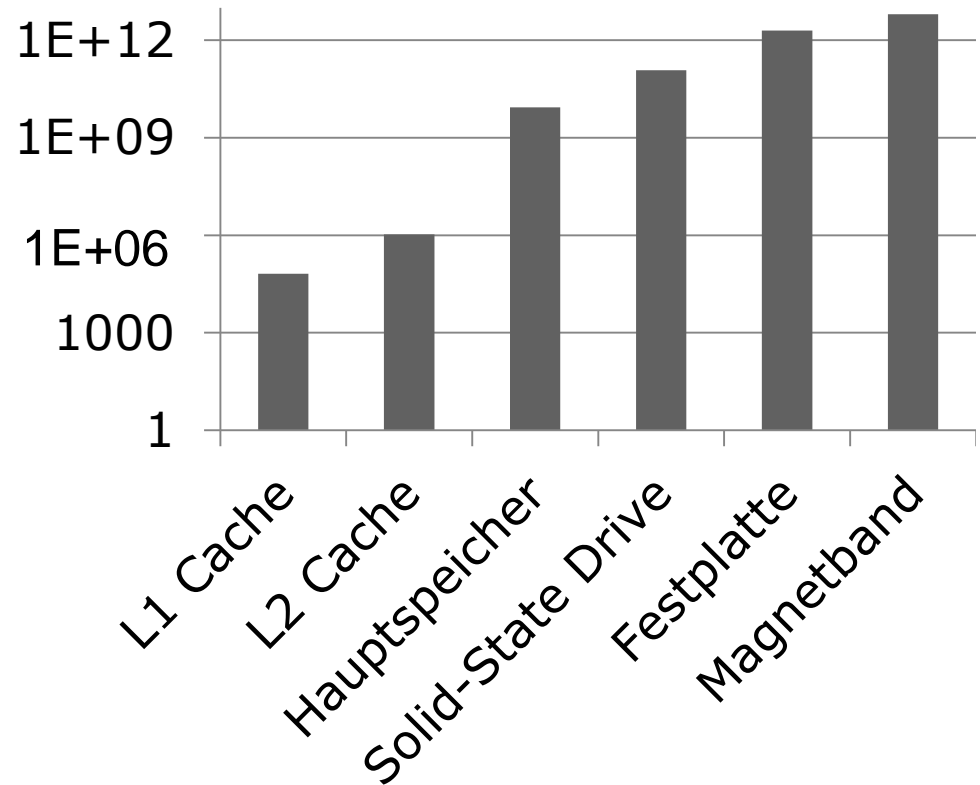
Speicherhierarchie



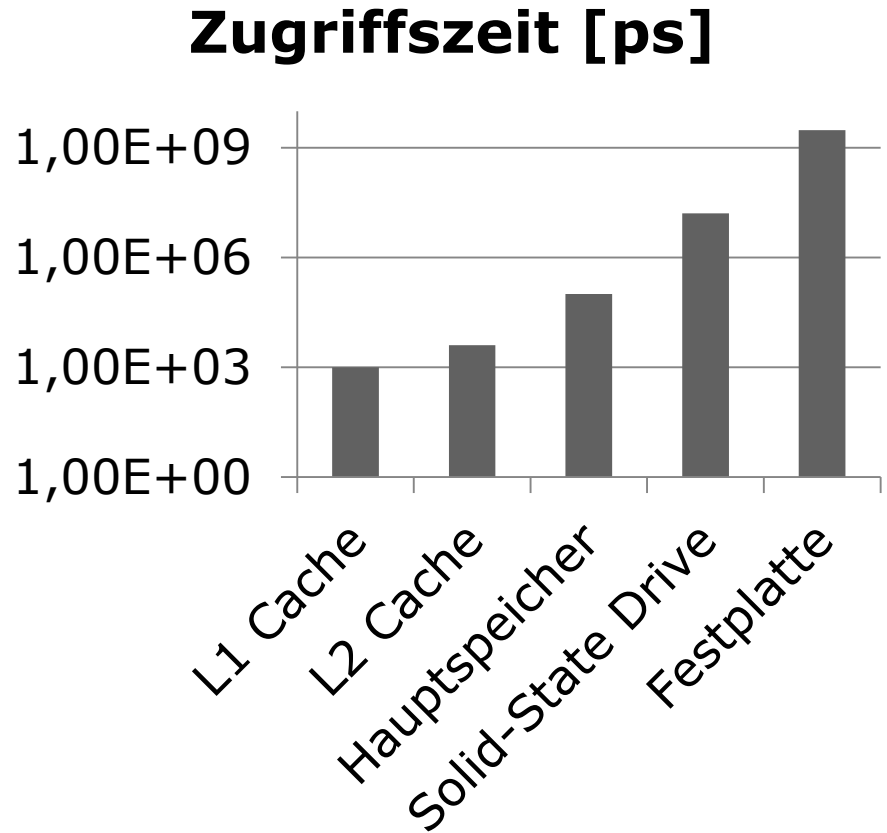
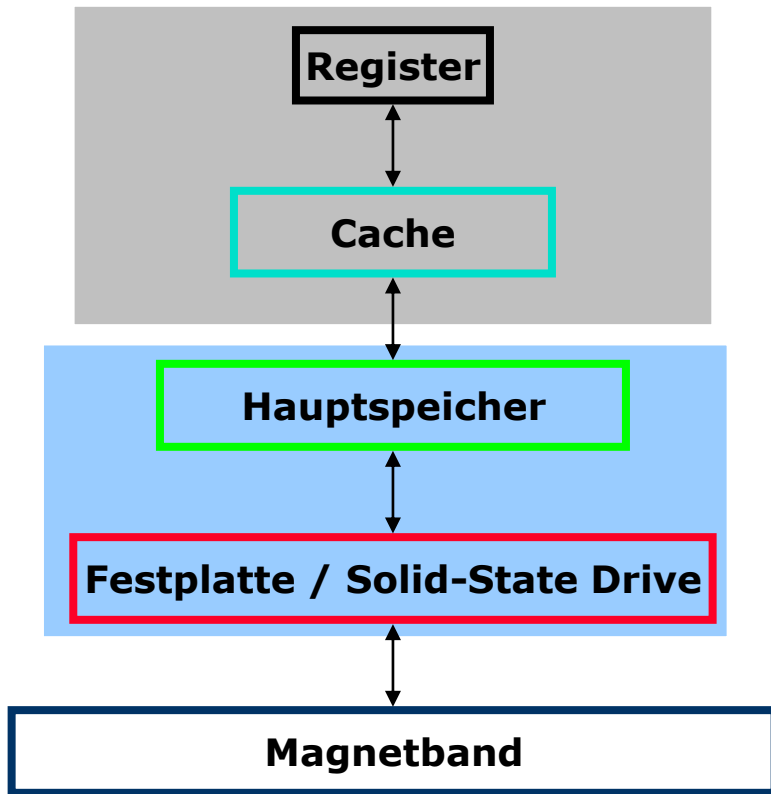
Speicherhierarchie



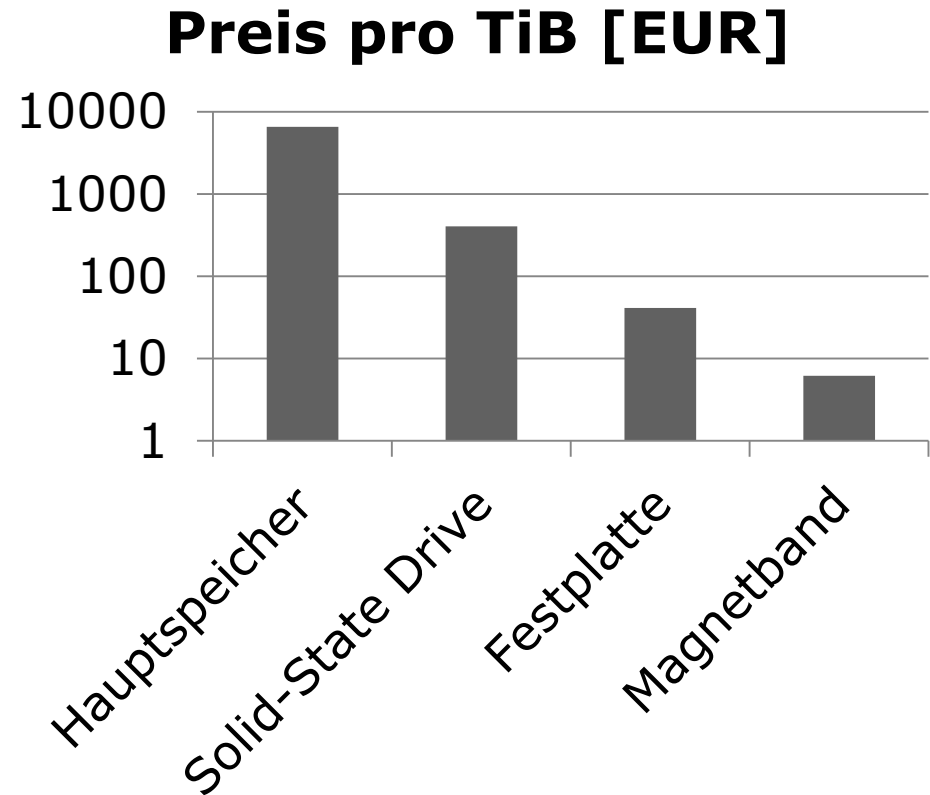
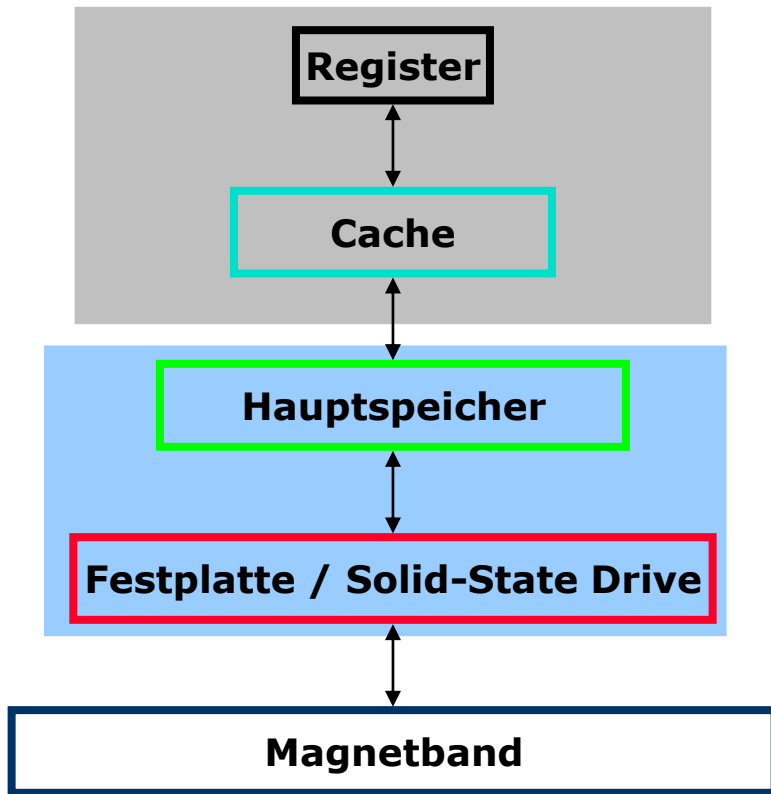
Typische Kapazität [Byte]



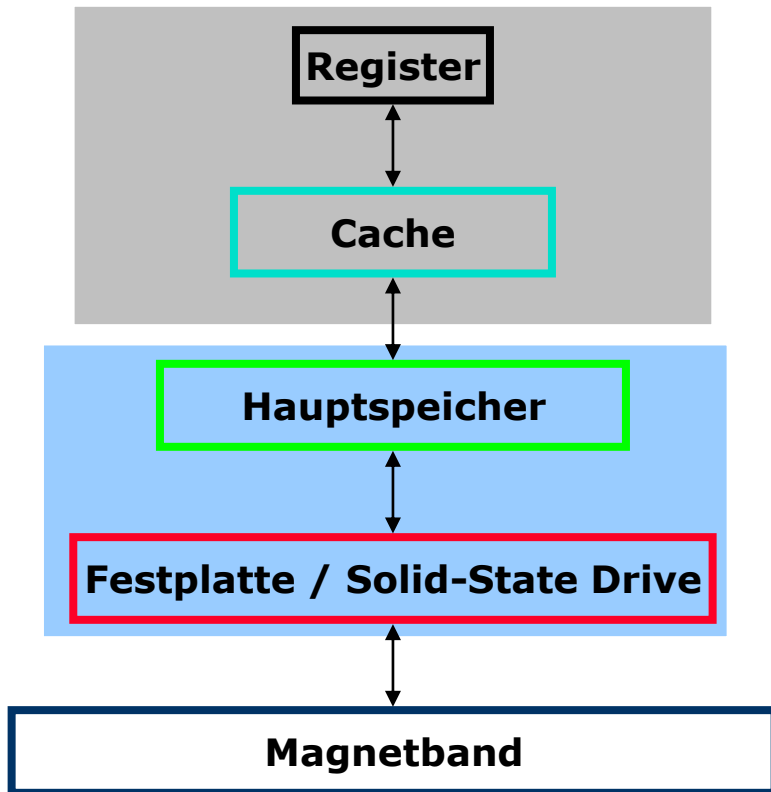
Speicherhierarchie



Speicherhierarchie



Speicherhierarchie



Kleine Kapazität, kurze Zugriffszeit,
hohe Kosten pro Bit

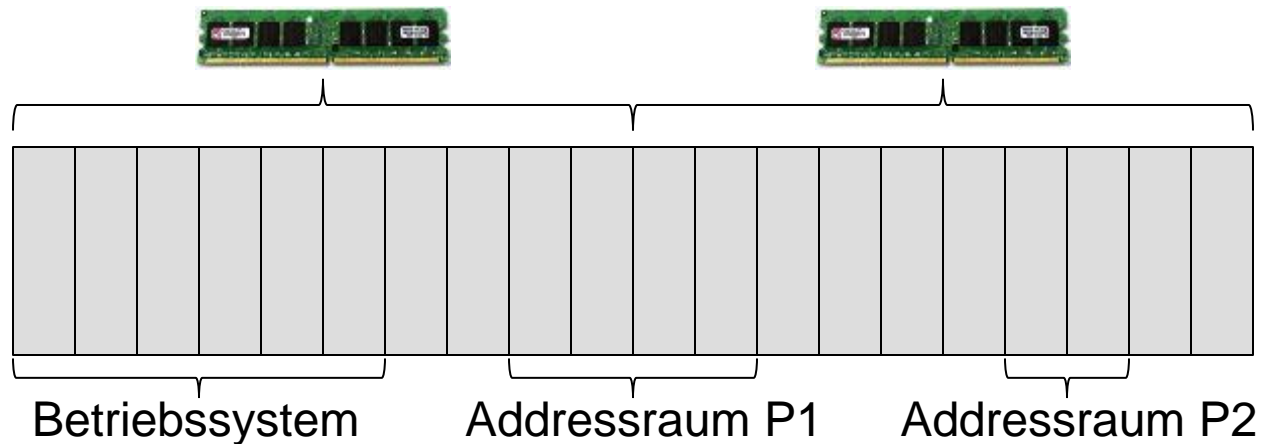
Große Kapazität, lange Zugriffszeit,
niedrige Kosten pro Bit

Einführung

- Hauptspeicher ist in mehrere Bereiche aufgeteilt
 - Bereich für das Betriebssystem
 - Bereich für Prozesse
- Speicherverwaltung: Dynamische Aufteilung entsprechend aktueller Prozesse
- Speicher muss effizient aufgeteilt werden, damit möglichst viele Prozesse Platz haben

Adressraum

- Abstraktion vom physikalischen Speicher
- Speicherzellen im Hauptspeicher haben eindeutige Adresse
- Adressraum: Menge von Adressen, die ein Prozess benutzen darf (lesen / schreiben)
- Jeder Prozess hat eigenen Adressraum



Anforderungen an Speicherverwaltung

- Bereitstellung von Platz im Hauptspeicher für Betriebssystem und Prozesse
- Ziel aus Betriebssystemersicht: Möglichst viele Prozesse im Speicher
- Fünf wichtige Anforderungen:
 - Relokation
 - Schutz
 - Gemeinsame Nutzung
 - Logische Organisation
 - Physikalische Organisation

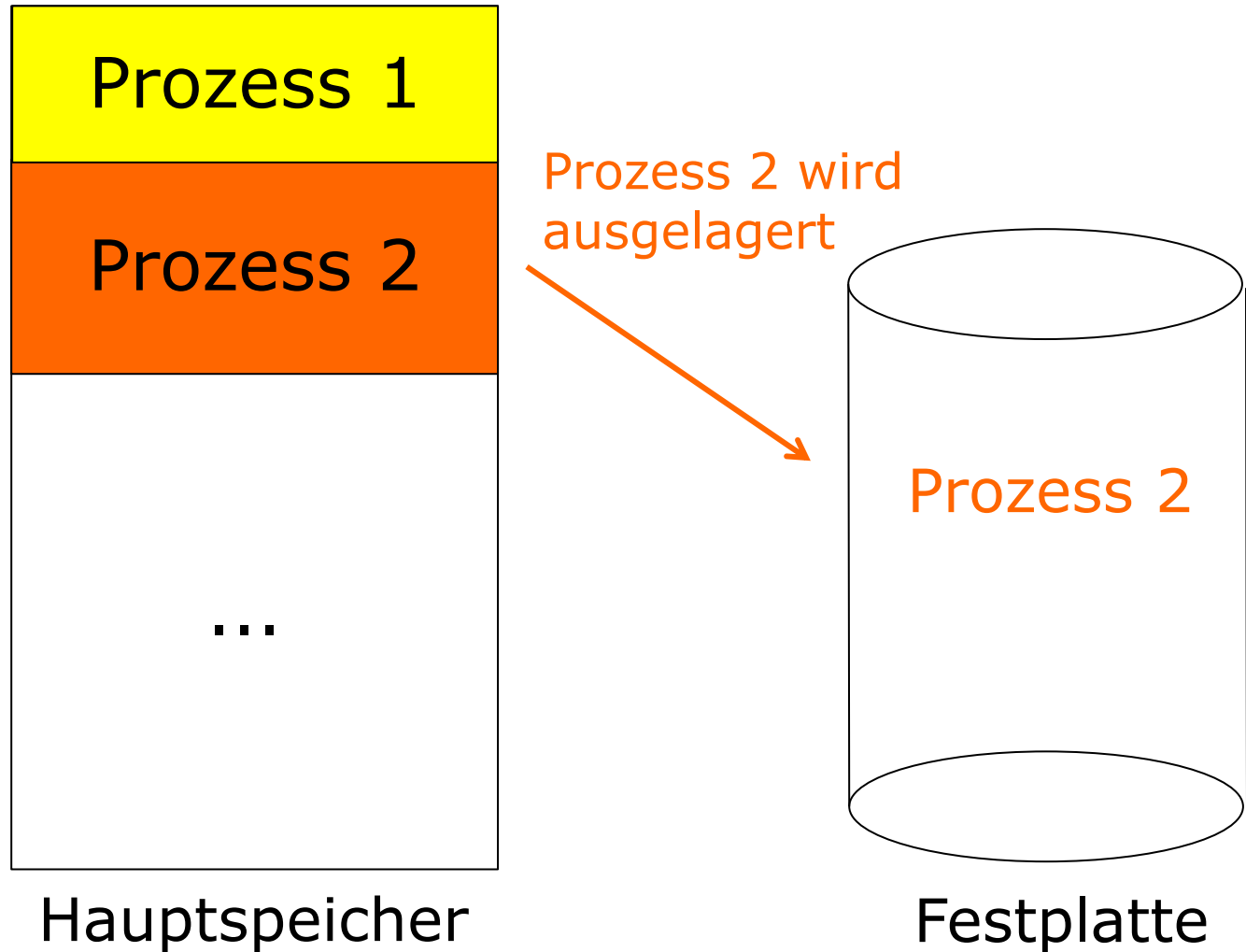
Anforderungen an Speicherverwaltung

- Bereitstellung von Platz im Hauptspeicher für Betriebssystem und Prozesse
- Ziel aus Betriebssystemersicht: Möglichst viele Prozesse im Speicher
- Fünf wichtige Anforderungen:
 - **Relokation**
 - Schutz
 - Gemeinsame Nutzung
 - Logische Organisation
 - Physikalische Organisation

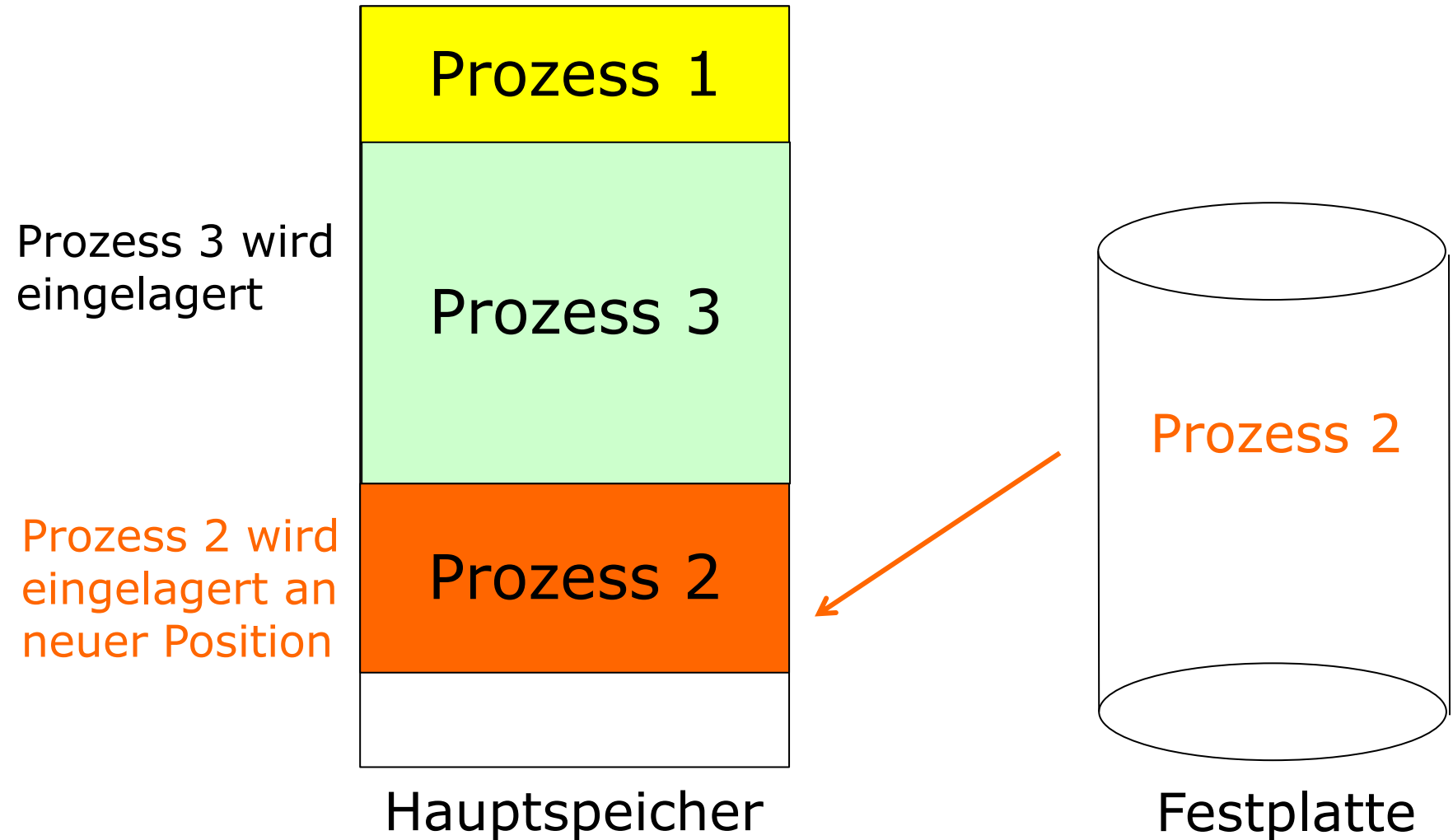
Relokation (1)

- Relokation = Verlagerung
- Mehrere Prozesse gleichzeitig im System
- Auslagern und Wiedereinlagern von Prozessen aus dem Hauptspeicher
- Ort der Einlagerung im Voraus **unbekannt**

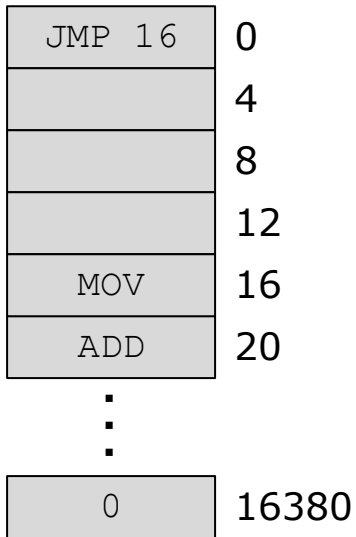
Relokation (2)



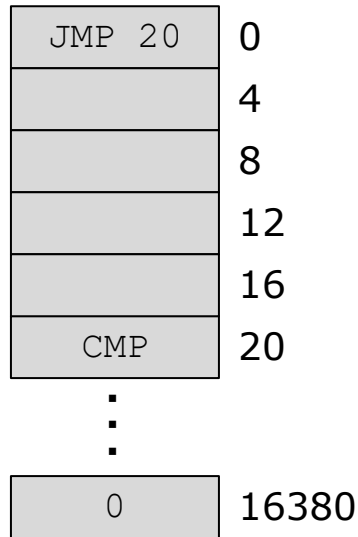
Relokation (3)



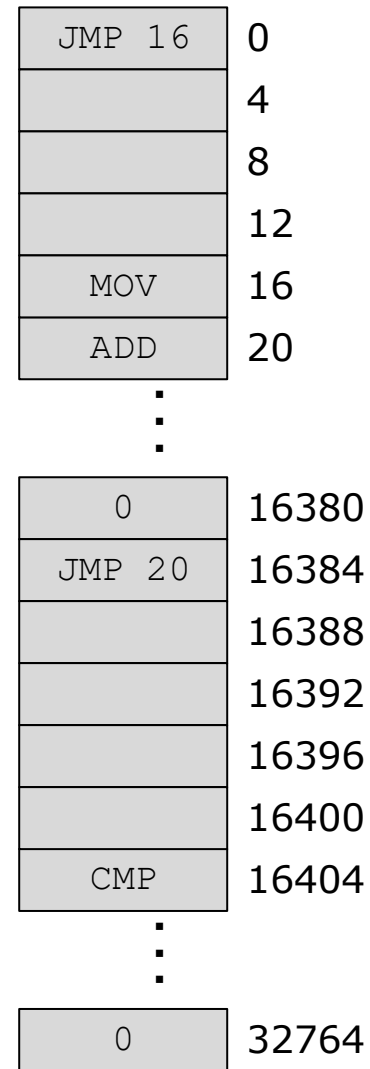
Beispiel Relokationsproblem



Programm A



Programm B

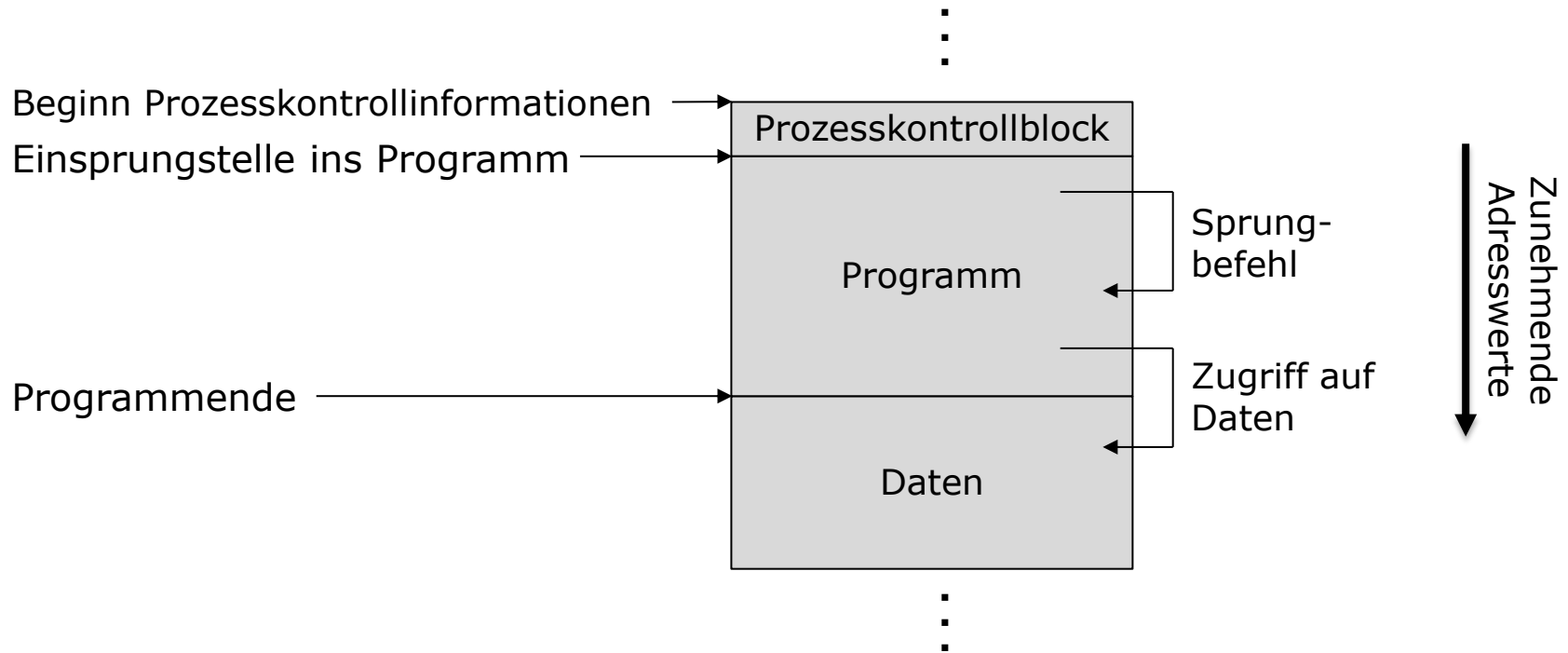


A und B im Speicher

Relokation (4)

- Problem: Speicherreferenzen innerhalb des Programms
- Absolute Sprungbefehle: Adresse auf den nächsten auszuführenden Befehl
- Datenzugriffsbefehle: Adresse des Bytes, das referenziert wird
- Prozessorhardware und Betriebssystem müssen die Speicherreferenzen in physikalische Speicheradressen übersetzen

Relokation (5)



- Beispiel Sprungbefehl: `JMP i`
- Beispiel Datenzugriffsbefehl: `MOV REG1, j`

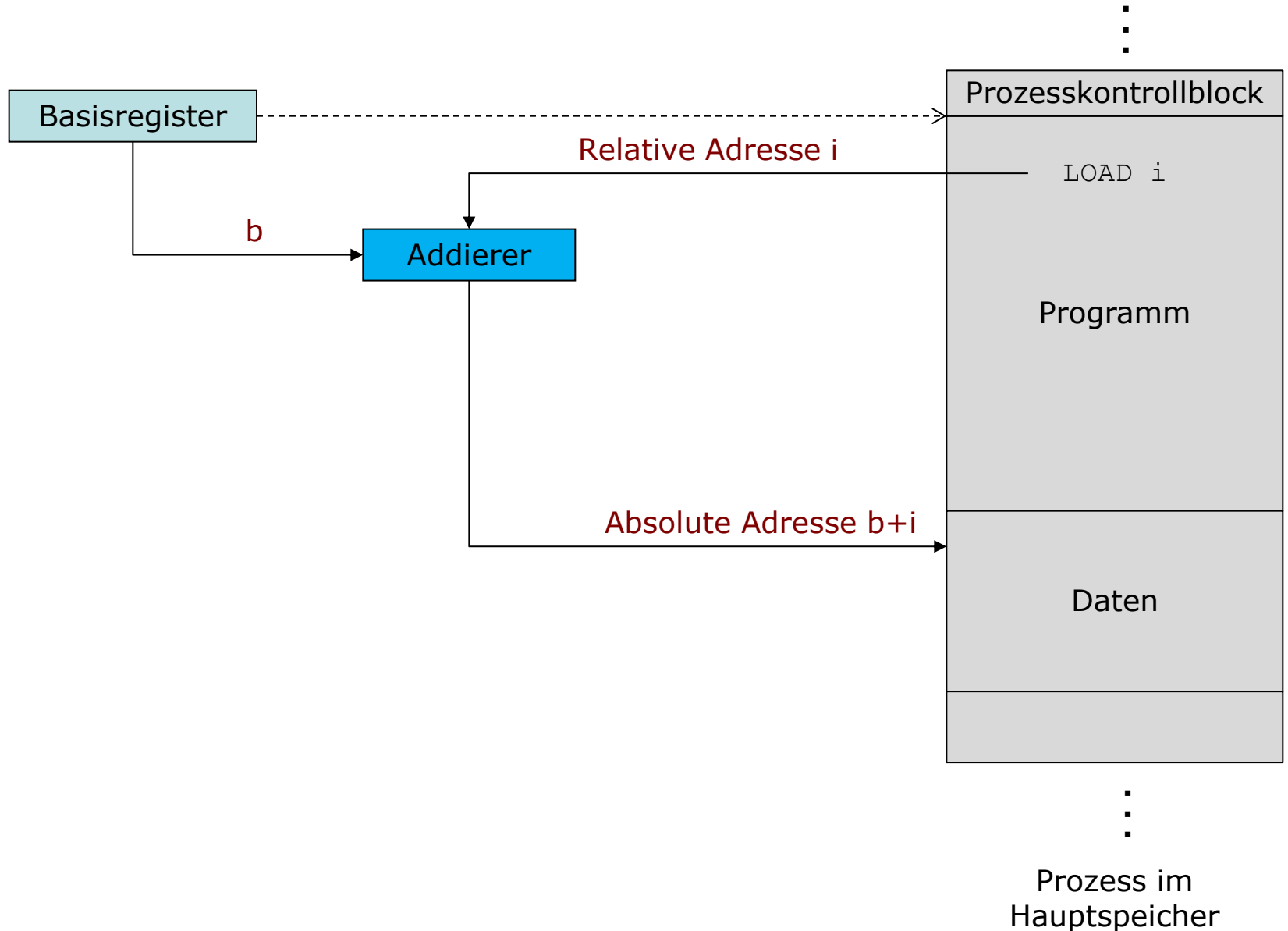
Relokation (6)

- **Physikalische bzw. absolute Adresse:** Konkrete Stelle im Hauptspeicher
- **Logische Adresse:** Bezug auf eine Speicherstelle, unabhängig von der aktuellen Zuteilung im Speicher
- **Relative Adresse:**
 - Spezialfall einer logischen Adresse
 - Adresse relativ zu einem bekannten Punkt (in der Regel Programmmanfang)

Relokation (7)

- Dynamisches Laden zur Laufzeit:
Berechnung von absoluten Adressen aus relativen Adressen durch Hardware
- Beim Einlagern: Adresse des Programm-
anfangs wird im **Basisregister** gespeichert

Relokation über Basisregister



Relokation (7)

- Dynamisches Laden zur Laufzeit:
Berechnung von absoluten Adressen aus relativen Adressen durch Hardware
- Beim Einlagern: Adresse des Programm-
anfangs wird im **Basisregister** gespeichert
- Absolute Adresse: Relative Adresse wird um
den Wert erhöht, der sich im Basisregister
befindet

Anforderungen an Speicherverwaltung

- Bereitstellung von Platz im Hauptspeicher für Betriebssystem und Prozesse
- Ziel aus Betriebssystemersicht: Möglichst viele Prozesse im Speicher
- Fünf wichtige Anforderungen:
 - Relokation
 - **Schutz**
 - Gemeinsame Nutzung
 - Logische Organisation
 - Physikalische Organisation

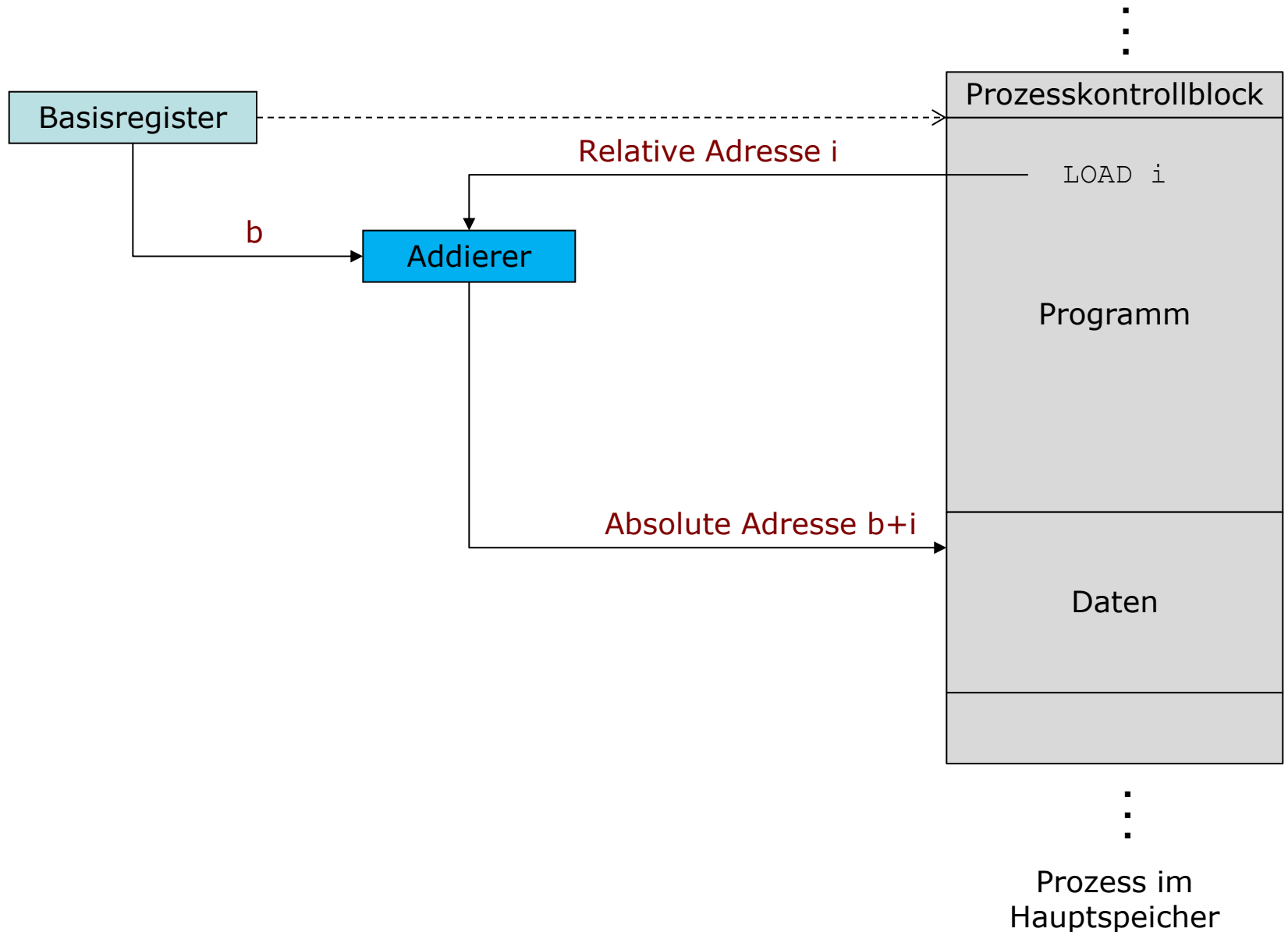
Schutz (1)

- Schutz von Prozessen gegen Störungen durch andere Prozesse
- Überprüfung aller Speicherzugriffe notwendig
- Schwierigkeit: In der Regel und auch im Allgemeinen nicht zur Übersetzungszeit eines Programms überprüfbar
- Grund: Dynamisch berechnete Adressen während der Laufzeit, absolute Adressen nicht bekannt (siehe Theoretische Informatik)

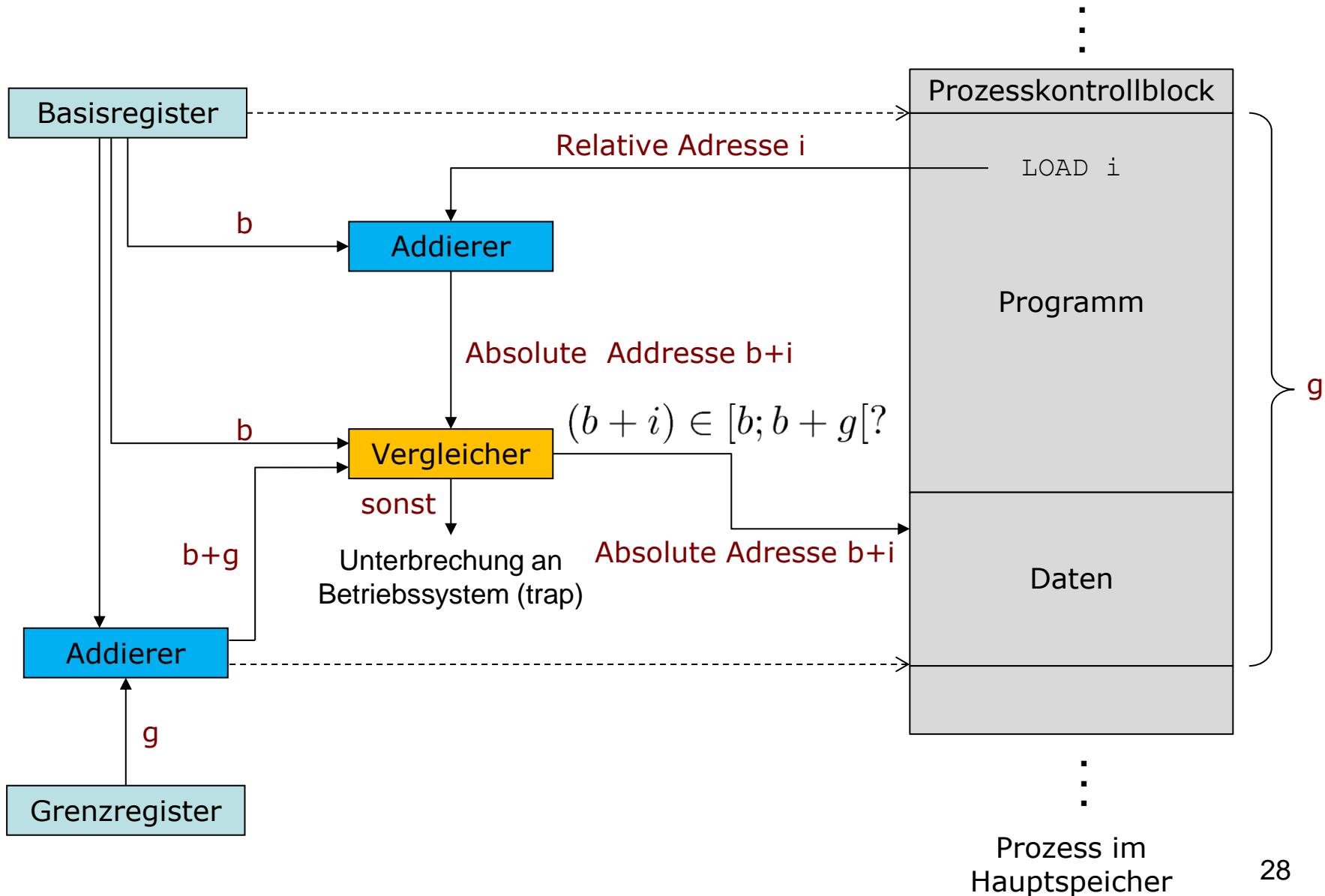
Schutz (2)

- Lösung: Dynamische Überprüfung zur Laufzeit
- Ggf. Abbruch von Befehlen bei Zugriff auf Datenbereich anderer Prozesse
- **Grenzregister/Limitregister**: Enthält die Größe des Adressraums eines Programms

Relokation und Schutz (1)



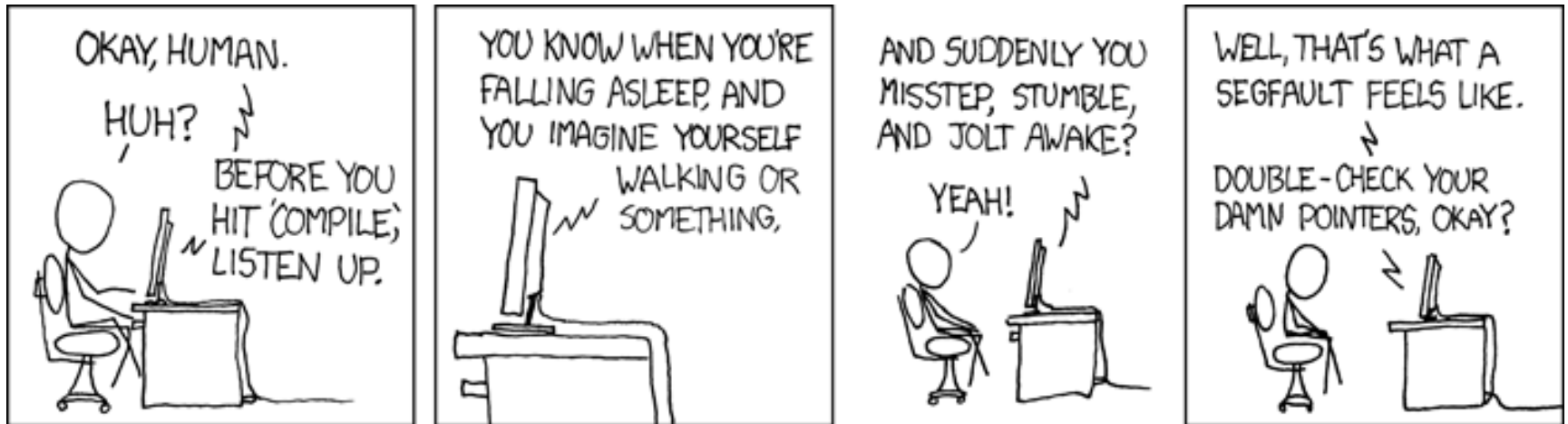
Relokation und Schutz (1)



Relokation und Schutz (2)

- Absolute Adresse: Relative Adresse wird um den Wert erhöht, der sich im Basisregister befindet
- Vergleich der resultierenden Adresse
 - Mit Basisregister
 - Mit Basisregister + Grenzregister
- Befehlsausführung nur, wenn die Adresse innerhalb der Grenzen liegt, sonst Interrupt

Relokation und Schutz (3)



<http://xkcd.com/371/>

Anforderungen an Speicherverwaltung

- Bereitstellung von Platz im Hauptspeicher für Betriebssystem und Prozesse
- Ziel aus Betriebssystemersicht: Möglichst viele Prozesse im Speicher
- Fünf wichtige Anforderungen:
 - Relokation
 - Schutz
 - **Gemeinsame Nutzung**
 - Logische Organisation
 - Physikalische Organisation

Gemeinsame Nutzung

- Kontrollierter Zugriff mehrerer Prozesse auf gemeinsam genutzte Bereiche des Speichers
- Anwendungsbeispiele:
 - Ausführung des gleichen Programms durch eine Reihe von Prozessen, Code nur einmal im Speicher
 - Zugriff auf dieselbe Datenstruktur bei Zusammenarbeit von Prozessen
 - Kooperation von Prozessen über gemeinsam genutzten Datenspeicher („Shared Memory“)

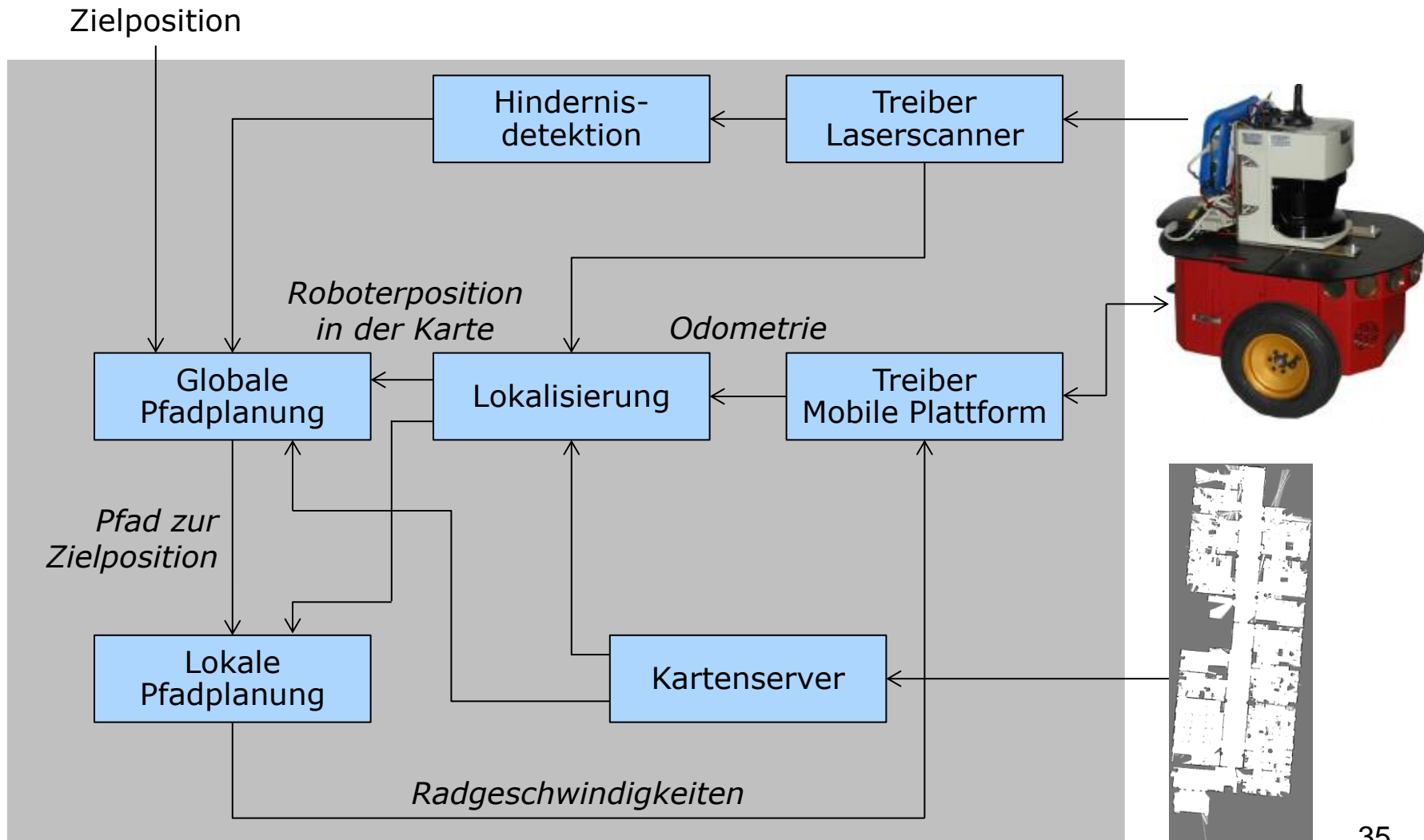
Anforderungen an Speicherverwaltung

- Bereitstellung von Platz im Hauptspeicher für Betriebssystem und Prozesse
- Ziel aus Betriebssystemersicht: Möglichst viele Prozesse im Speicher
- Fünf wichtige Anforderungen:
 - Relokation
 - Schutz
 - Gemeinsame Nutzung
 - **Logische Organisation**
 - Physikalische Organisation

Logische Organisation

- Logischer Aufbau großer Programme:
 - Verschiedene Module
 - Unabhängig übersetzt; Referenzen auf Funktionen in anderen Modulen werden erst zur Laufzeit aufgelöst
 - Verschiedene Module können unterschiedliche Grade von Schutz besitzen (z.B. nur lesen / ausführen)
 - Gemeinsame Nutzung von Modulen durch verschiedene Prozesse
- Betriebssystem muss mit Modulen umgehen können

Exkurs Logische Organisation: Mobile Roboterplattform



Anforderungen an Speicherverwaltung

- Bereitstellung von Platz im Hauptspeicher für Betriebssystem und Prozesse
- Ziel aus Betriebssystemersicht: Möglichst viele Prozesse im Speicher
- Fünf wichtige Anforderungen:
 - Relokation
 - Schutz
 - Gemeinsame Nutzung
 - Logische Organisation
 - **Physikalische Organisation**

Physikalische Organisation

- Betrachte zwei Ebenen
 - Hauptspeicher (schnell, teuer, flüchtig)
 - Festplatte (langsam, billig, nicht flüchtig)
- Grundproblem: Daten zwischen Haupt- und Sekundärspeicher verschieben
 - Aufwändig, erschwert durch Multiprogramming
 - Verwaltung durch das Betriebssystem

Grundlegende Methoden der Speicherverwaltung

Partitionierung

- Speicheraufteilung zwischen verschiedenen Prozessen (Partitionierung mit festen Grenzen)

Paging

- Einfaches Paging / kombiniert mit Konzept des virtuellen Speichers

Segmentierung

- Einfache Segmentierung / kombiniert mit Konzept des virtuellen Speichers

Grundlegende Methoden der Speicherverwaltung

Partitionierung

- Speicheraufteilung zwischen verschiedenen Prozessen (Partitionierung mit festen Grenzen)

Paging

- Einfaches Paging / kombiniert mit Konzept des virtuellen Speichers

Segmentierung

- Einfache Segmentierung / kombiniert mit Konzept des virtuellen Speichers

Partitionierung

- Aufteilung des Speichers in Bereiche mit festen Grenzen
- Fester, zusammenhängender Teil des Hauptspeichers für Betriebssystem
- Pro Prozess ein zusammenhängender Teil des Speichers
- Verschiedene Varianten:
 1. Statische Partitionierung
 2. Dynamische Partitionierung
 3. Buddy-Verfahren

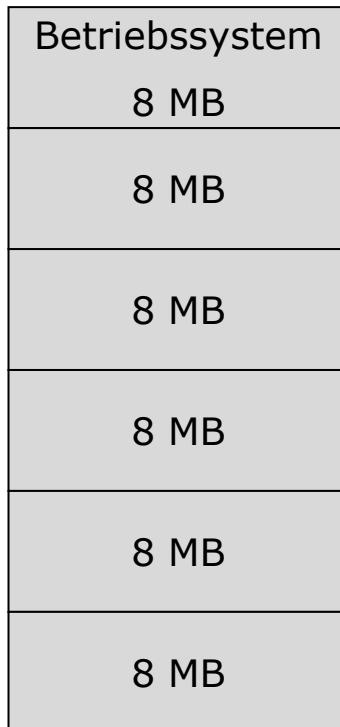
Partitionierung

- Aufteilung des Speichers in Bereiche mit festen Grenzen
- Fester, zusammenhängender Teil des Hauptspeichers für Betriebssystem
- Pro Prozess ein zusammenhängender Teil des Speichers
- Verschiedene Varianten:
 - 1. Statische Partitionierung**
 2. Dynamische Partitionierung
 3. Buddy-Verfahren

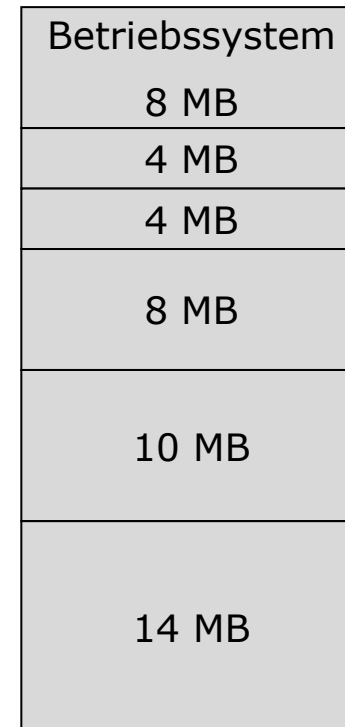
Statische Partitionierung (1)

- Einteilung des Speichers in **fixe Anzahl von Partitionen**
- **Zwei Varianten**

Alle Partitionen mit gleicher Länge



Partitionen mit unterschiedlicher Länge



Statische Partitionierung (2)

Zuweisung von Partitionen an Prozesse:

- Bei Bereichen mit gleicher Länge: trivial
- Bei Bereichen mit variabler Länge: Kleinste verfügbare Partition, die gerade noch ausreicht (Verwaltung nicht trivial)
- Oft Speicherbedarf nicht im Voraus feststellbar (dafür Verfahren des virtuellen Speichers, siehe später)

Statische Partitionierung (3)

Probleme bei gleich großen Partitionen:

- Programm möglicherweise zu groß für Partition
- Interne Fragmentierung:
Platzverschwendung, wenn Programm kleiner als Größe der zugeordneten Partition
- Fest vorgegebene, maximale Anzahl von Prozessen im Speicher

Partitionen unterschiedlicher Länge

- Größere Programme können untergebracht werden
- Kleinere Programme führen zu geringerer interner Fragmentierung

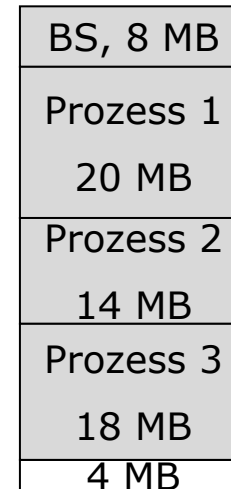
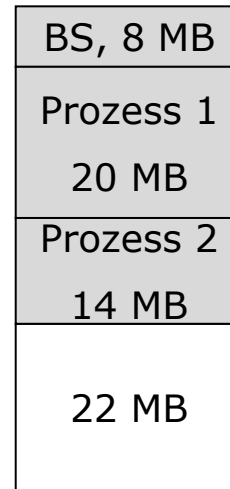
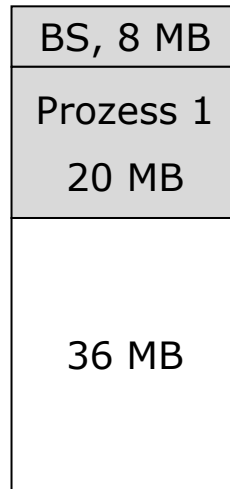
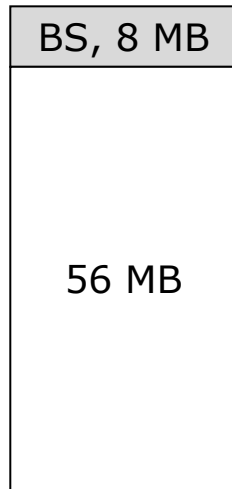
Partitionierung

- Aufteilung des Speichers in Bereiche mit festen Grenzen
- Fester, zusammenhängender Teil des Hauptspeichers für Betriebssystem
- Pro Prozess ein zusammenhängender Teil des Speichers
- Verschiedene Varianten:
 1. Statische Partitionierung
 2. **Dynamische Partitionierung**
 3. Buddy-Verfahren

Dynamische Partitionierung (1)

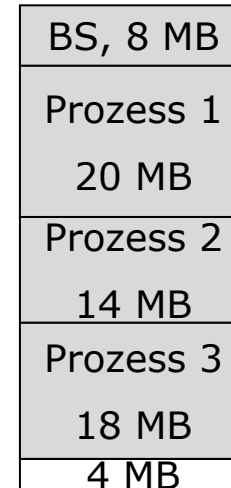
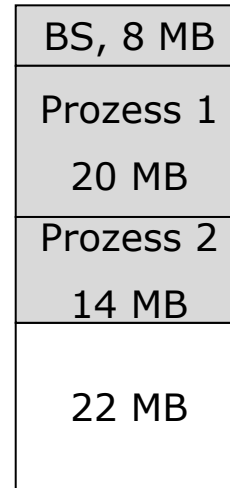
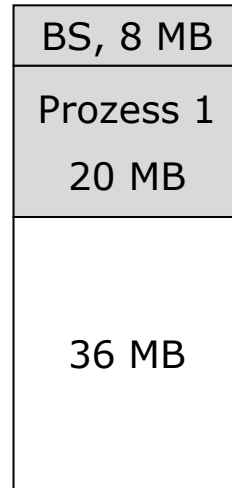
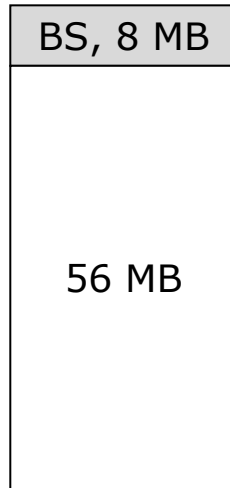
- Einteilung des Speichers in Partitionen
 - variable Länge
 - variable Anzahl
- Prozesse erhalten exakt passende Speicherbereiche (keine interne Fragmentierung)
- Aber: Ein- und Auslagern führt zu **externer Fragmentierung** mit einer Vielzahl kleiner Lücken, d.h. Speicherauslastung nimmt ab

Dynamische Partitionierung (2)

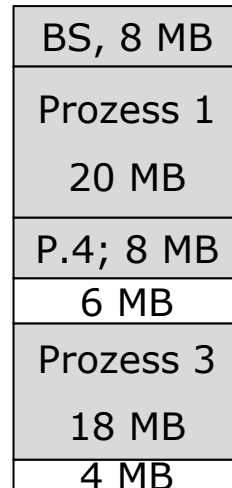
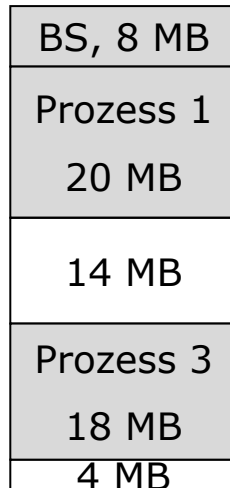


Anforderung:
Prozess 4
braucht 8 MB

Dynamische Partitionierung (2)



Anforderung:
Prozess 4
braucht 8 MB

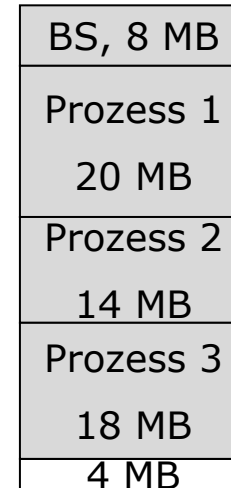
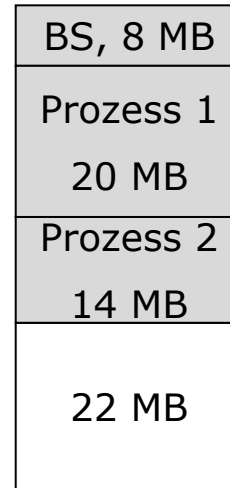
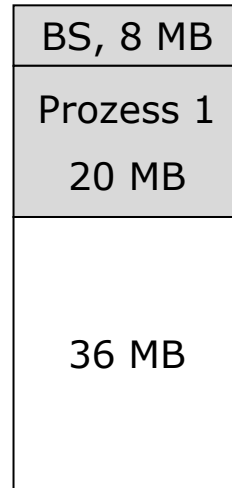
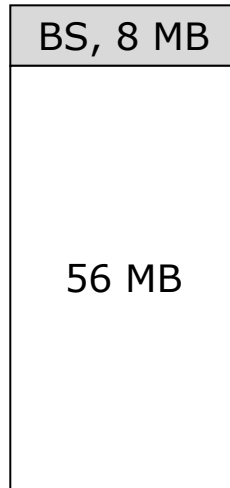


Genügend
Platz für
Prozess 4,
aber Lücke
entsteht

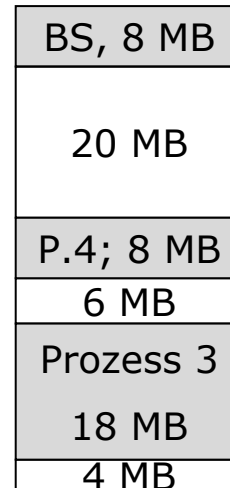
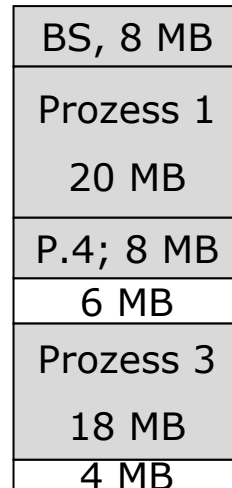
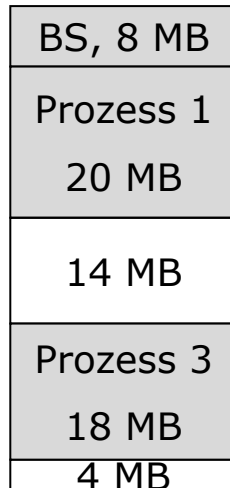
Annahme:
Kein Prozess
im
Hauptspeicher
bereit, aber
ausgelagerter
Prozess 2
(14MB) bereit

Prozess 2 wird
ausgelagert

Dynamische Partitionierung (2)



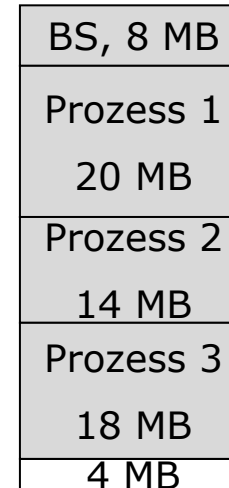
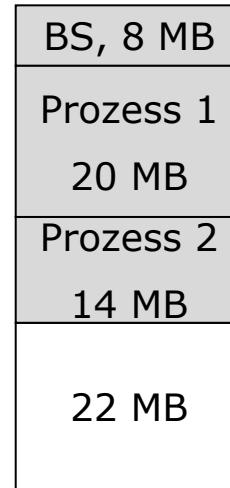
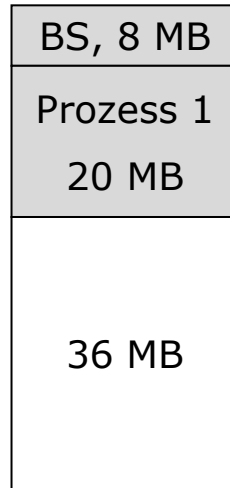
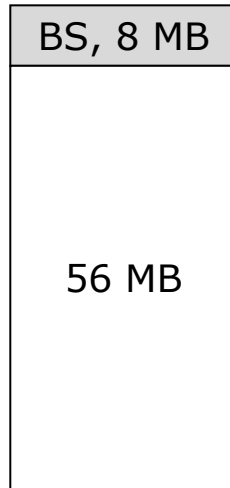
Anforderung:
Prozess 4
braucht 8 MB



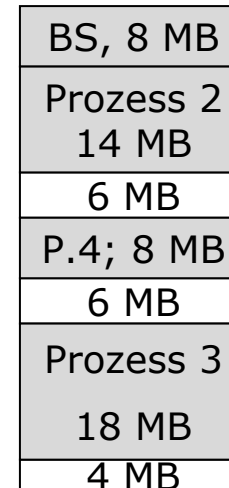
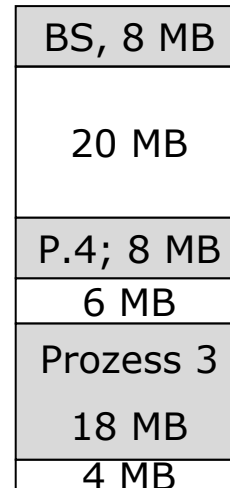
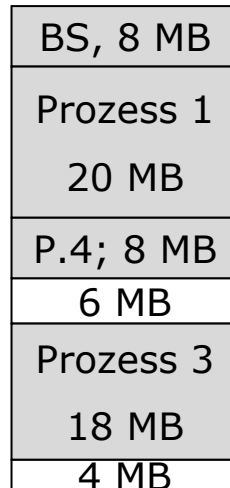
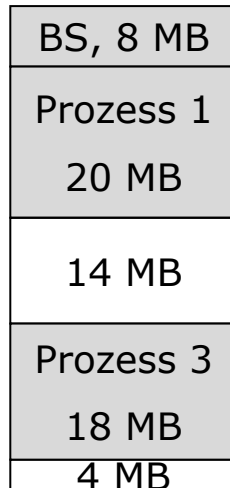
Prozess 2 wird
ausgelagert

Da nicht
genügend
Platz für
Prozess 2:
Prozess 1 wird
ausgelagert

Dynamische Partitionierung (2)



Anforderung:
Prozess 4
braucht 8 MB



Prozess 2 wird
wieder
eingelagert

Prozess 2 wird
ausgelagert

Dynamische Partitionierung (3)

Defragmentierung möglich, aber

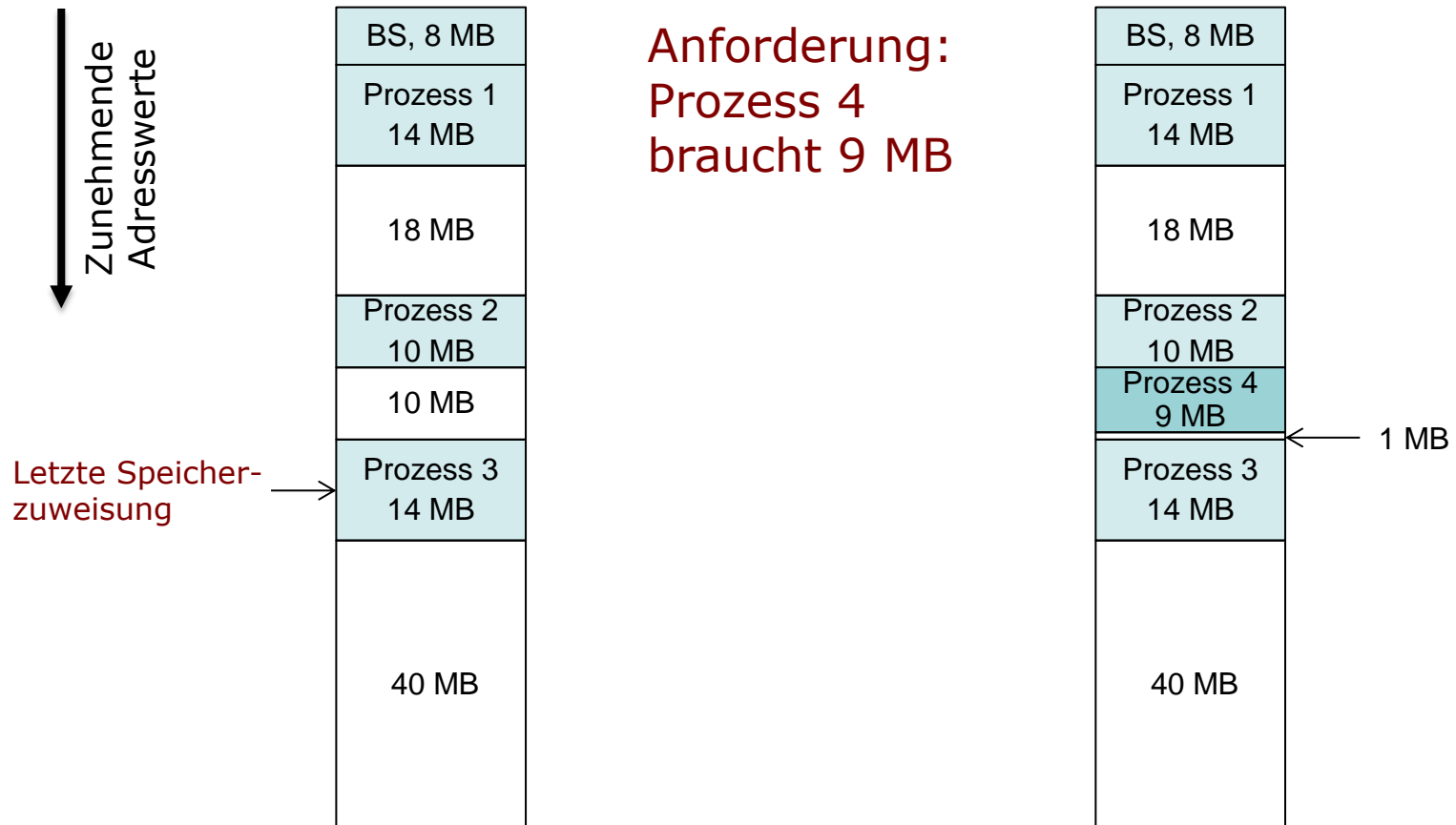
- Verschiebung aufwändig:
Speicherzuteilungsstrategie wichtig
- Speicherverdichtung nur erfolgreich, wenn
dynamische Relokation möglich

Dynamische Partitionierung (4)

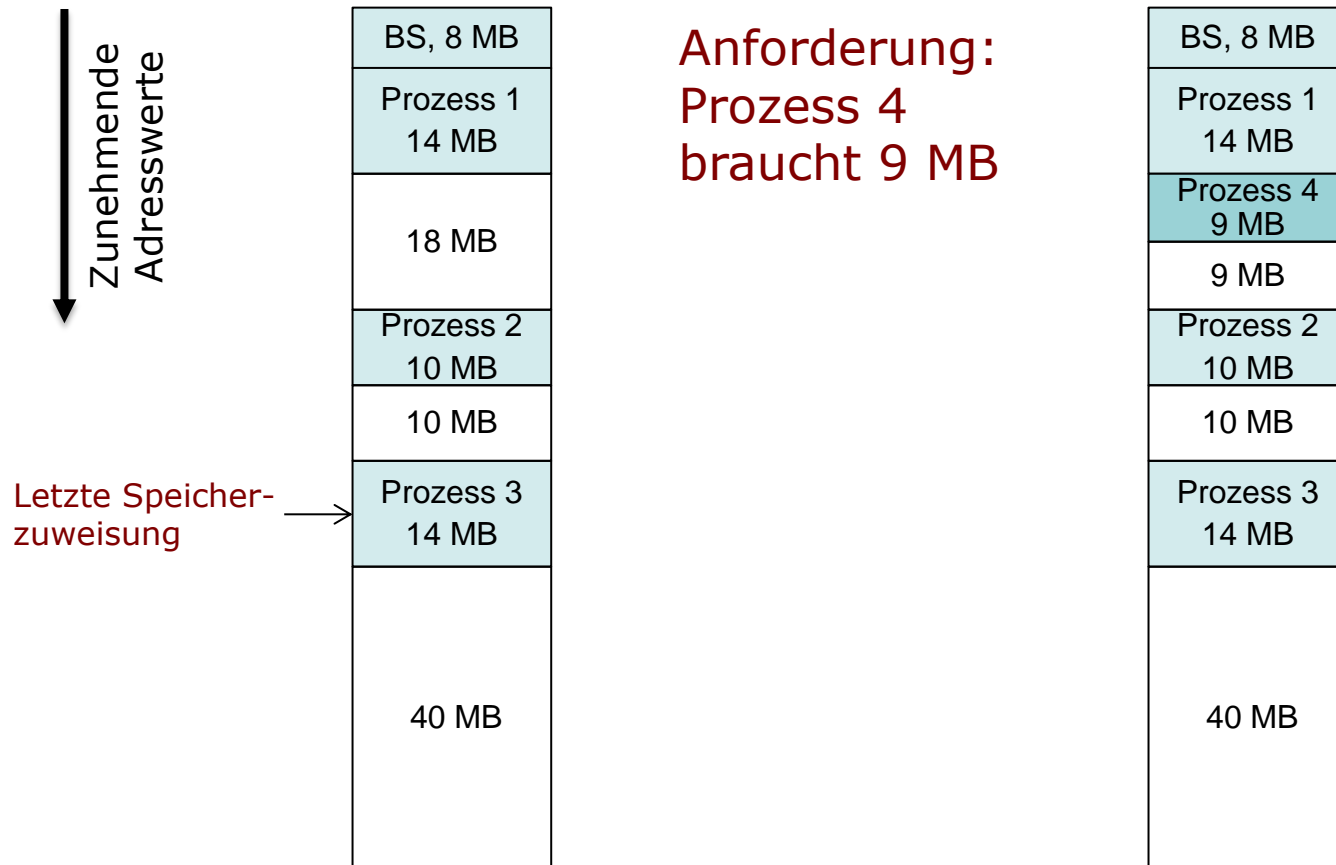
Speicherzuteilungsalgorithmen:

- **Best Fit:** Suche kleinsten Block, der ausreicht
- **First Fit:** Suche beginnend mit Speicheranfang bis ausreichend großer Block gefunden
- **Next Fit:** Suche beginnend mit der Stelle der letzten Speicherzuweisung

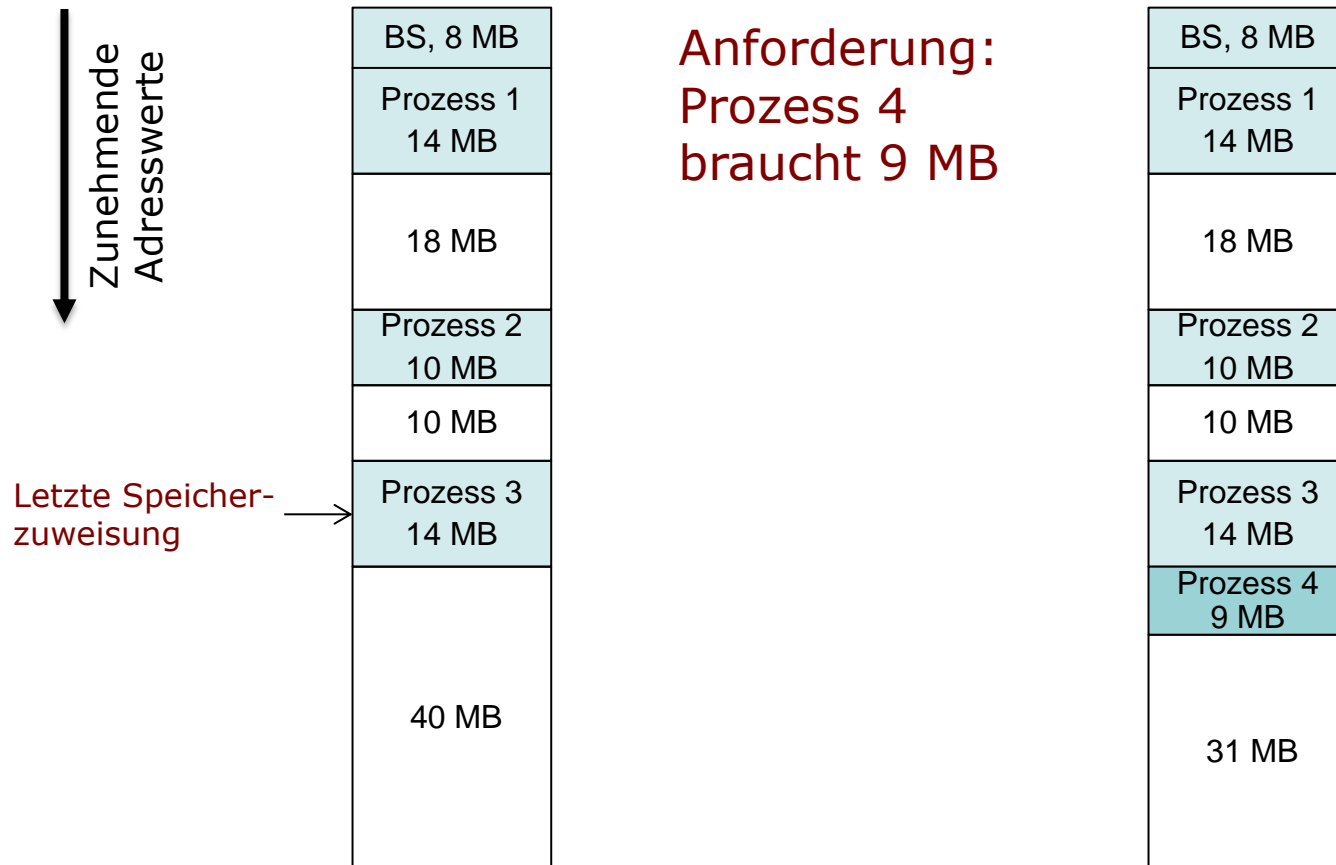
Speicherzuteilungsalgorithmen: Best Fit



Speicherzuteilungsalgorithmen: First Fit



Speicherzuteilungsalgorithmen: Next Fit



Dynamische Partitionierung (5)

Analyse der Speicherzuteilungsalgorithmen:

- Im Schnitt ist First Fit am besten!
- Next Fit: Etwas schlechter
 - Typischer Effekt: Schnelle Fragmentierung des größten freien Speicherblocks am Ende des Speichers
- Best Fit: Am schlechtesten
 - Schnell eine Reihe von sehr kleinen Fragmenten, Defragmentierung nötig
 - Außerdem: Suche braucht Zeit

Partitionierung

- Aufteilung des Speichers in Bereiche mit festen Grenzen
- Fester, zusammenhängender Teil des Hauptspeichers für Betriebssystem
- Pro Prozess ein zusammenhängender Teil des Speichers
- Verschiedene Varianten:
 1. Statische Partitionierung
 2. Dynamische Partitionierung
 3. **Buddy-Verfahren**

Nachteile Partitionierung

- **Statische** Partitionierung:
 - Anzahl von Prozessen im Speicher beschränkt
 - Interne Fragmentierung
- **Dynamische** Partitionierung:
 - Schwierigere Verwaltung
 - Externe Fragmentierung
- **Buddy-System** (Halbierungsverfahren):
Kompromiss zwischen statischer und dynamischer Partitionierung

Buddy System (1)

- Dynamische Anzahl nicht-ausgelagerter Prozesse
- Interne Fragmentierung **beschränkt**
- **Keine** explizite Defragmentierung
- **Effiziente Suche** nach „passendem Block“

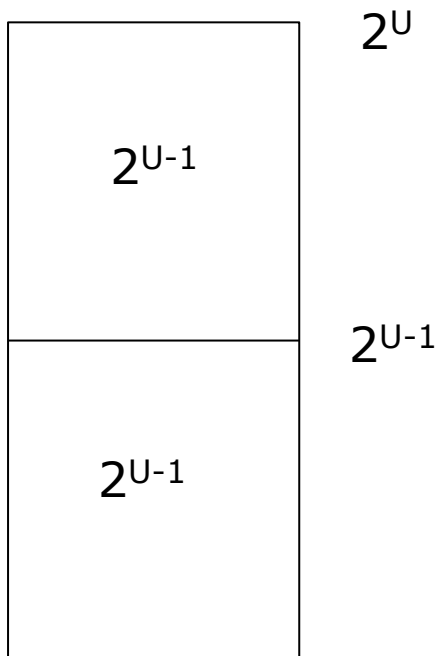
Buddy System (2)

- Verwalte Speicherblöcke der Größe 2^K
 - mit $L \leq K \leq U$, wobei
 - 2^L = Größe des kleinsten zuteilbaren Blocks
 - 2^U = Größe des größten zuteilbaren Blocks
(i.d.R. Gesamtgröße des verfügbaren Speichers)
- Zu Beginn: Es existiert genau ein Block der Größe 2^U

Buddy System (3)

Anforderung eines Blocks der Größe s :

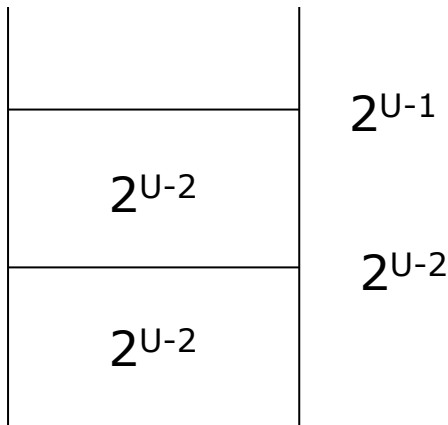
- Wenn $2^{U-1} < s \leq 2^U$: Weise gesamten Speicher zu
- Sonst: Teile auf in zwei Blöcke der Größe 2^{U-1}



Buddy System (4)

Anforderung eines Blocks der Größe s :

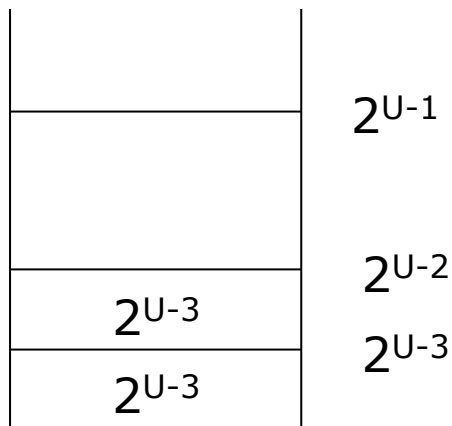
- Wenn $2^{U-1} < s \leq 2^U$: Weise gesamten Speicher zu
- Sonst: Teile auf in zwei Blöcke der Größe 2^{U-1}
- Wenn $2^{U-2} < s \leq 2^{U-1}$: Weise Block der Größe 2^{U-1} zu
- Sonst: Wähle Block der Größe 2^{U-1} und halbiere



Buddy System (4)

Anforderung eines Blocks der Größe s :

- Wenn $2^{U-1} < s \leq 2^U$: Weise gesamten Speicher zu
- Sonst: Teile auf in zwei Blöcke der Größe 2^{U-1}
- Wenn $2^{U-2} < s \leq 2^{U-1}$: Weise Block der Größe 2^{U-1} zu
- Sonst: Wähle Block der Größe 2^{U-1} und halbiere
- ...



Buddy System (4)

Anforderung eines Blocks der Größe s :

- Wenn $2^{U-1} < s \leq 2^U$: Weise gesamten Speicher zu
- Sonst: Teile auf in zwei Blöcke der Größe 2^{U-1}
- Wenn $2^{U-2} < s \leq 2^{U-1}$: Weise Block der Größe 2^{U-1} zu
- Sonst: Wähle Block der Größe 2^{U-1} und halbiere
- ...
- Fahre fort bis zu Blöcken der Größe 2^K mit $2^{K-1} < s \leq 2^K$ oder bis minimale Blockgröße erreicht
- Weise einen der beiden Blöcke zu (bzw. Weise Block mit Minimalgröße zu)

Vorteil: Bei resultierendem Block ist der Verschnitt kleiner als die halbe Blockgröße

Buddy System (5)

- Verwalte für alle $L \leq K \leq U$ Listen mit freien Blöcken der Größe 2^K
- Allgemeiner Fall: Anforderung eines Blocks der Größe $2^{i-1} < s \leq 2^i$:
 - Vergib Block aus Liste i , wenn vorhanden
 - Sonst: Wähle Block aus nächstgrößerer nichtleerer Liste
 - Teile diesen rekursiv auf, bis ein Block der Größe 2^i vorhanden, weise diesen zu (bzw. weise Block mit Minimalgröße zu)

Buddy System (6)

- Wenn nach Freigabe eines Blocks der Größe 2^k der entsprechende **Partnerblock** der Größe 2^k ebenfalls frei ist:
 - Fasse die Blöcke zu einem Block der Größe 2^{k+1} zusammen
 - Mache ggf. rekursiv weiter
- Binärbaumdarstellung der Blockzuteilung

Buddy-System (7)

Beispiel: Speicher der Größe 1 GiB

Folge von Anforderungen und Freigaben:

- A fordert 100 MiB an
- B fordert 240 MiB an
- C fordert 64 MiB an
- D fordert 256 MiB an
- Freigabe B
- Freigabe A
- E fordert 75 MiB an
- Freigabe C
- Freigabe E
- Freigabe D

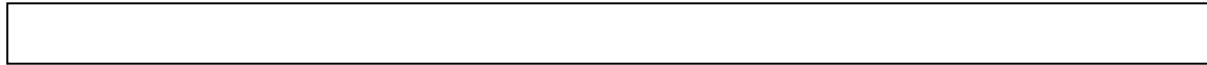
Annahme:

- Obergrenze der Blockgröße: 1 GiB
- Untergrenze: 64 MiB

Buddy-System (8)

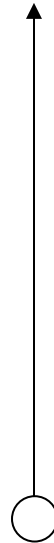
Zunächst verfügbar:

1 GiB



Freie Blöcke:

1 GiB: 1
512 MiB: 0
256 MiB: 0
128 MiB: 0
64 MiB: 0



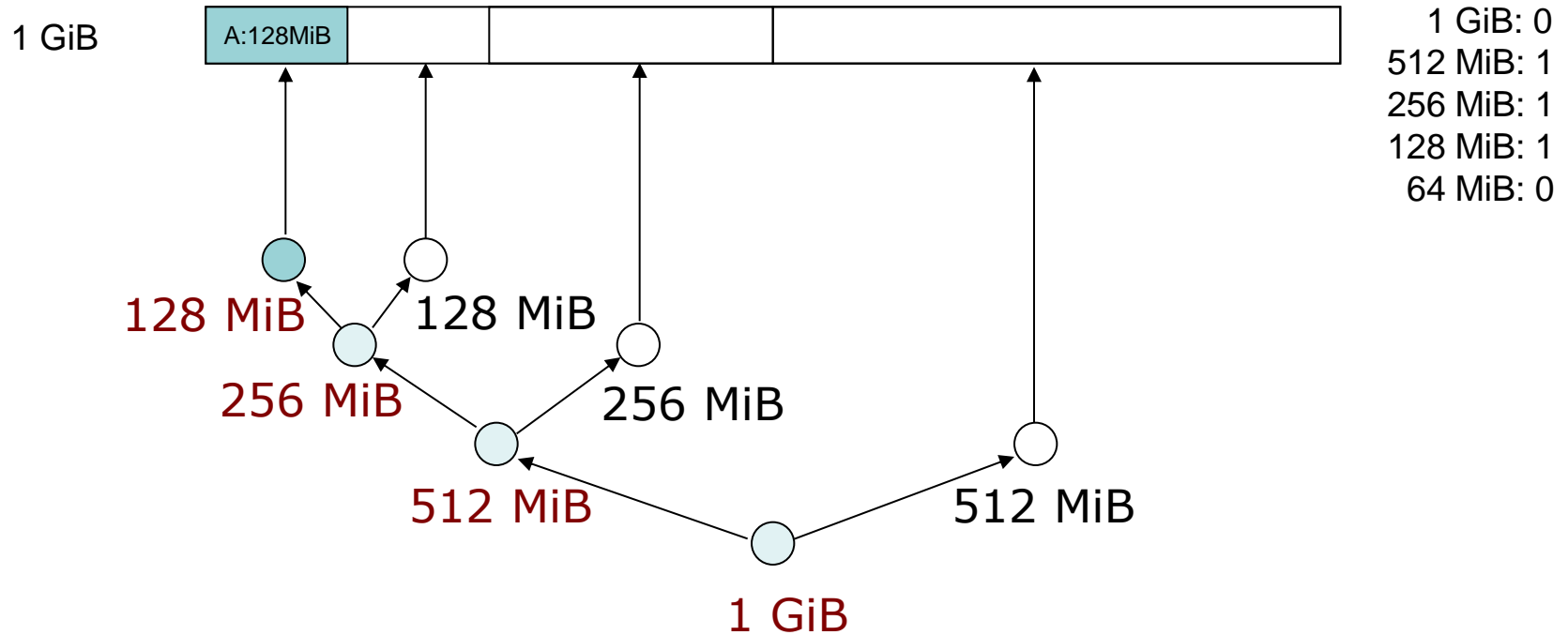
Gesamter Speicher als 1 Block verfügbar

Es folgt Anforderung A: 100 MiB, d.h. Block der Größe 128 MiB

Buddy-System (9)

Nach Anforderung A: 100 MiB, d.h. Block der Größe 128 MiB:

Freie Blöcke:

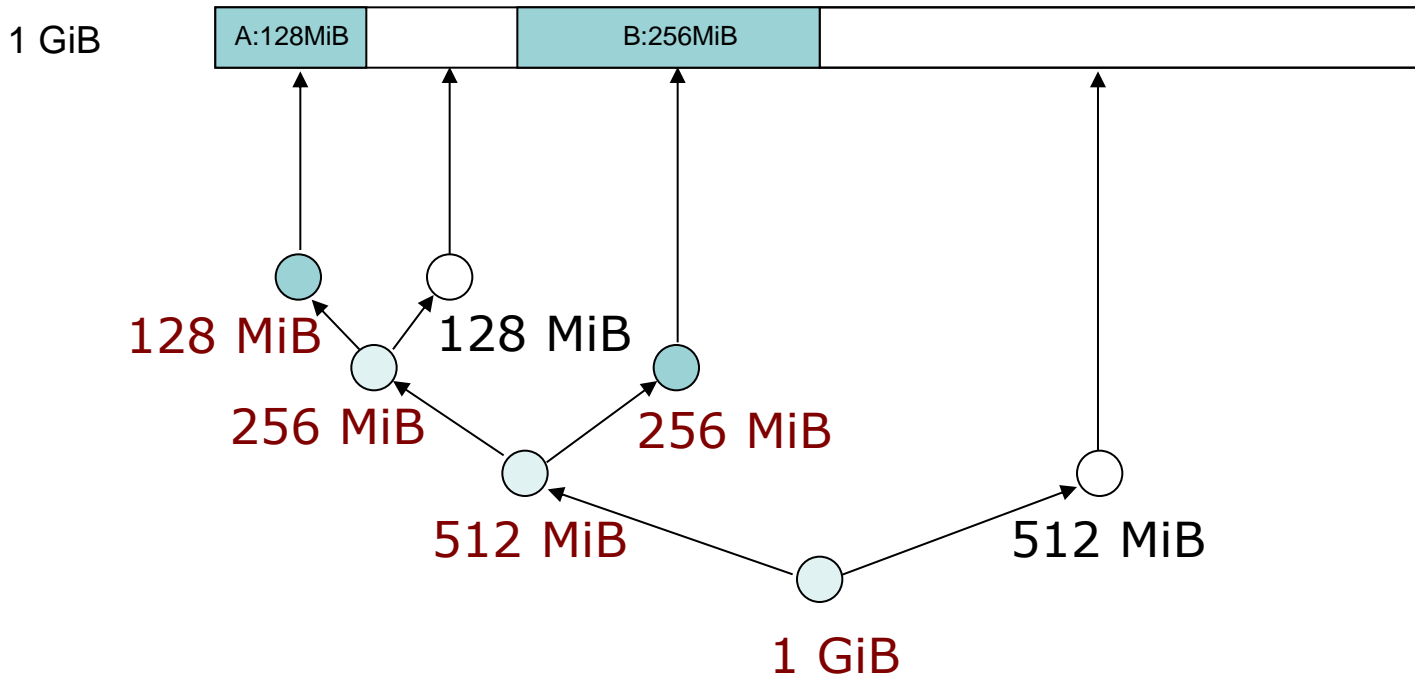


Es folgt Anforderung B: 240 MiB, d.h. Block der Größe 256 MiB

Buddy-System (10)

Nach Anforderung B: 240 MiB, d.h. Block der Größe 256 MiB.

Freie Blöcke:



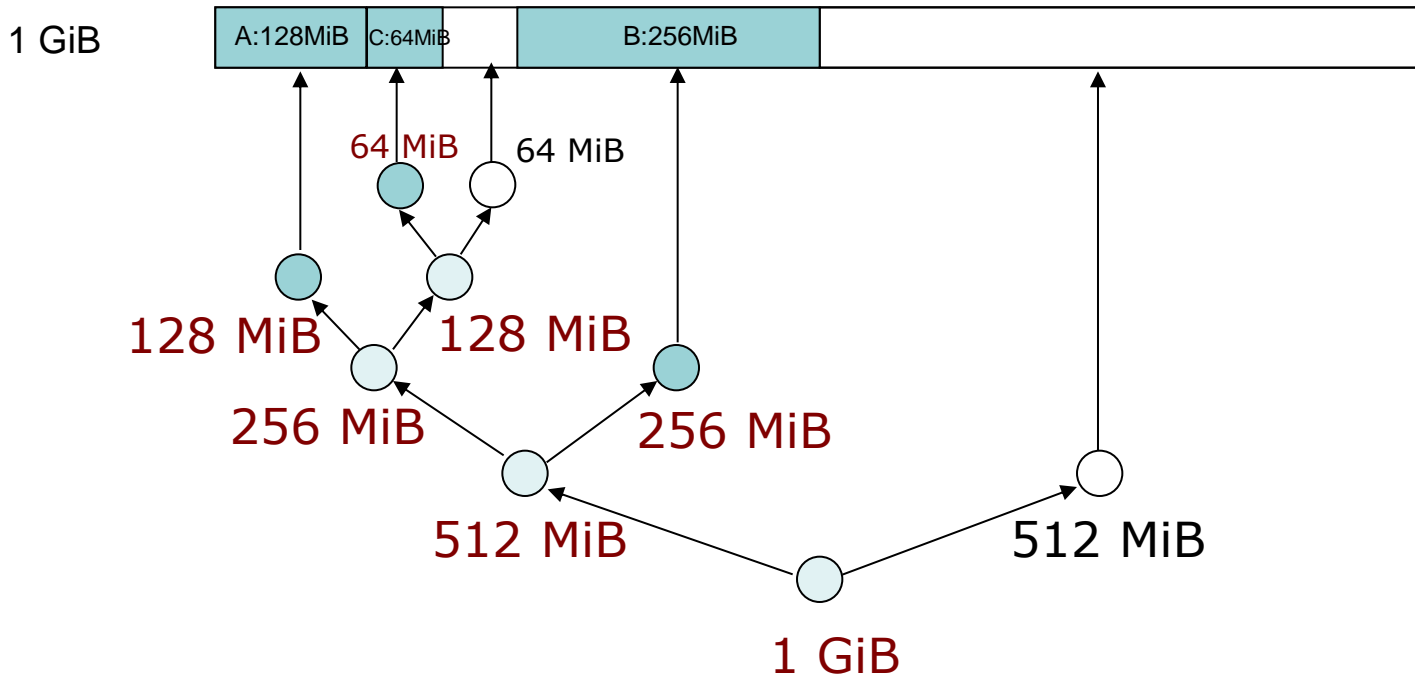
1 GiB: 0
512 MiB: 1
256 MiB: 0
128 MiB: 1
64 MiB: 0

Es folgt Anforderung C: 64 MiB, d.h. Block der Größe 64 MiB

Buddy-System (11)

Nach Anforderung C: 64 MiB, d.h. Block der Größe 64 MiB.

Freie Blöcke:



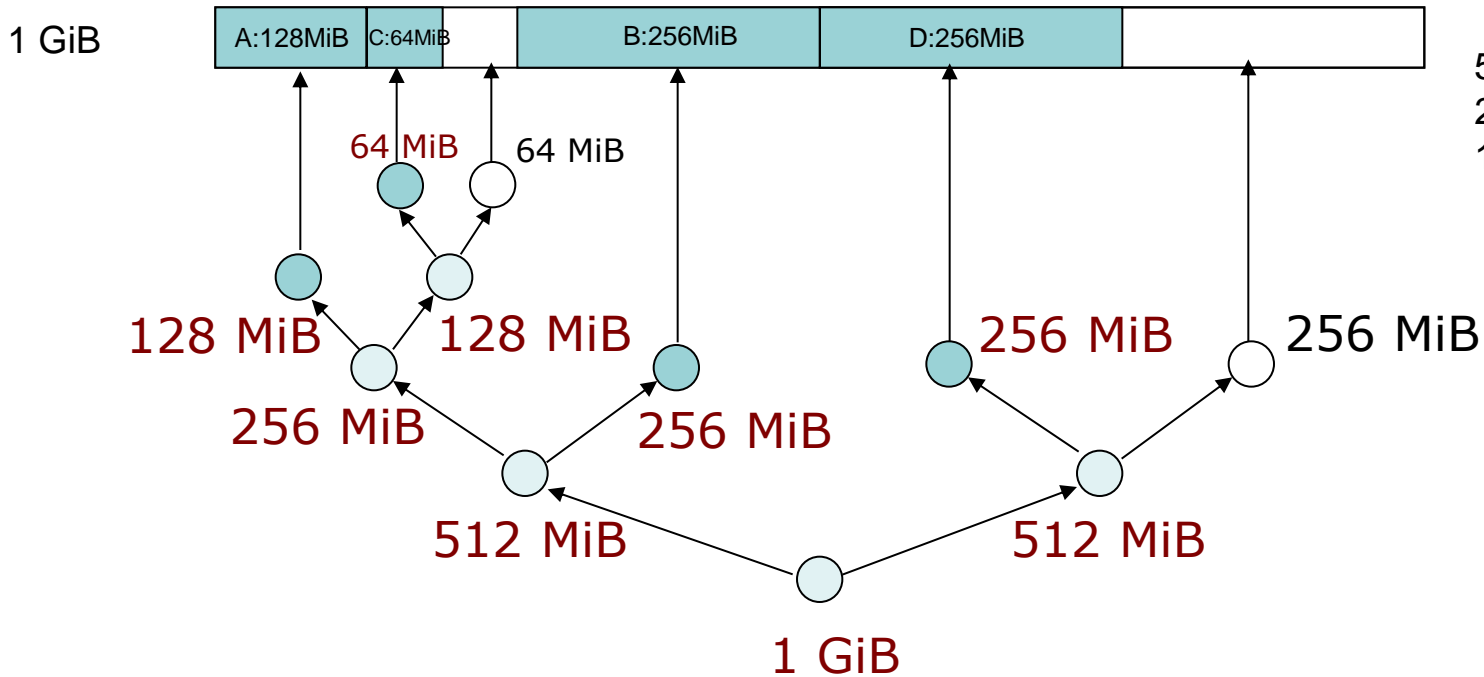
1 GiB: 0
512 MiB: 1
256 MiB: 0
128 MiB: 0
64 MiB: 1

Es folgt Anforderung D: 256 MiB, d.h. Block der Größe 256 MiB

Buddy-System (12)

Nach Anforderung D: 256 MiB, d.h. Block der Größe 256 MiB.

Freie Blöcke:

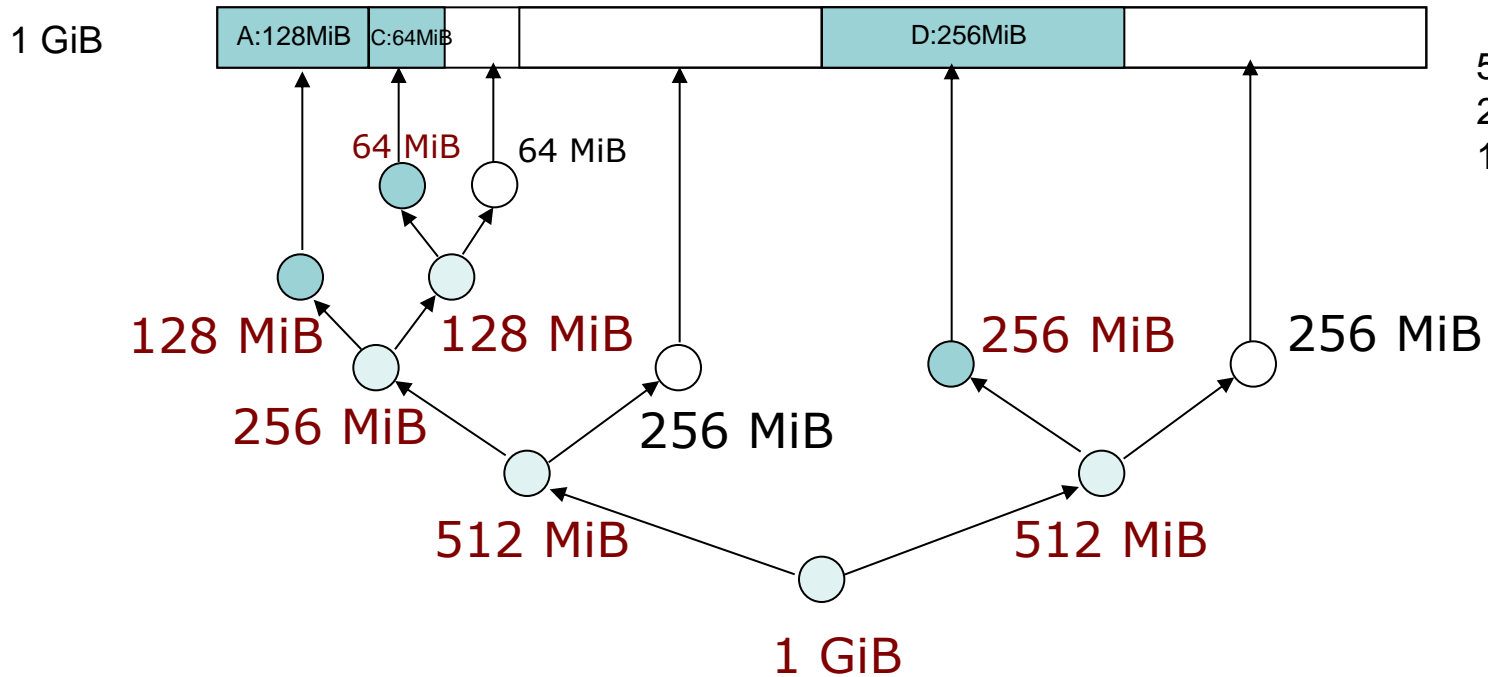


Es folgt Freigabe B

Buddy-System (13)

Nach Freigabe B:

Freie Blöcke:

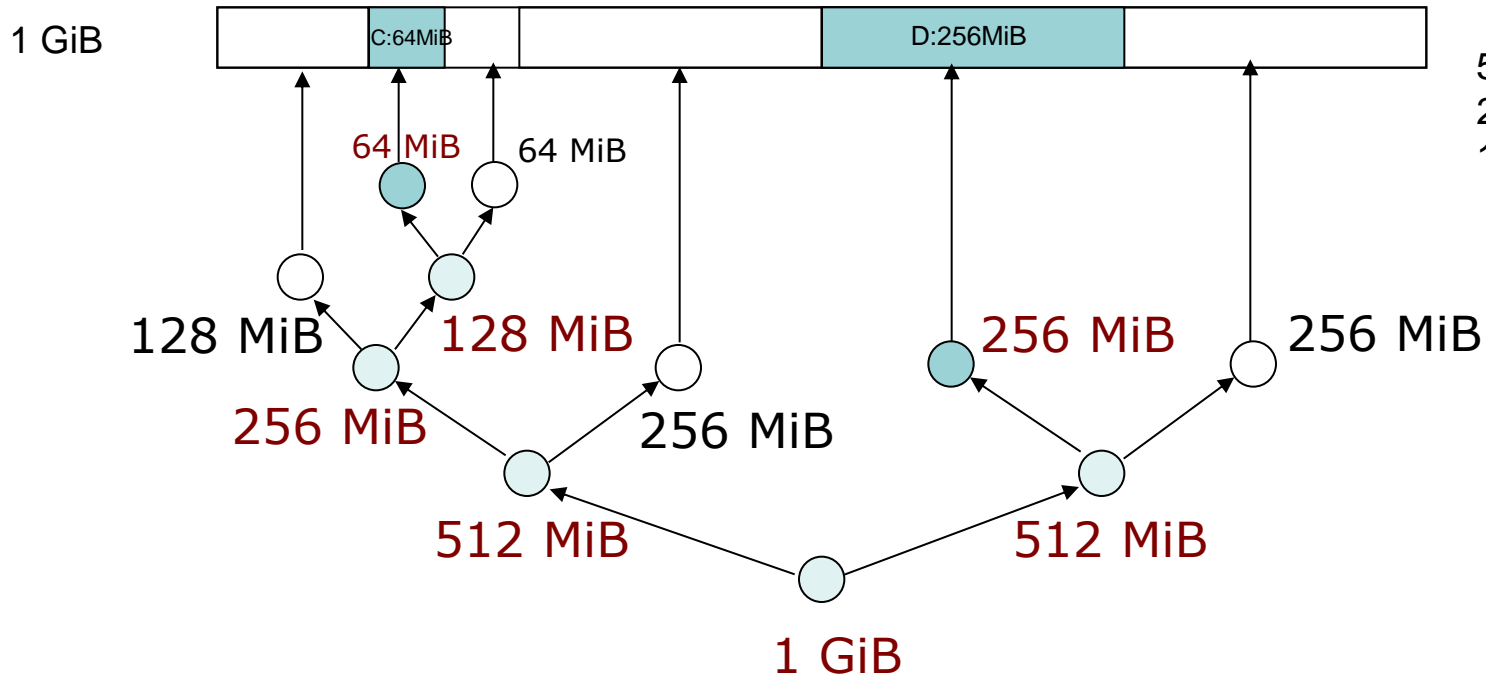


Es folgt Freigabe A

Buddy-System (14)

Nach Freigabe A:

Freie Blöcke:

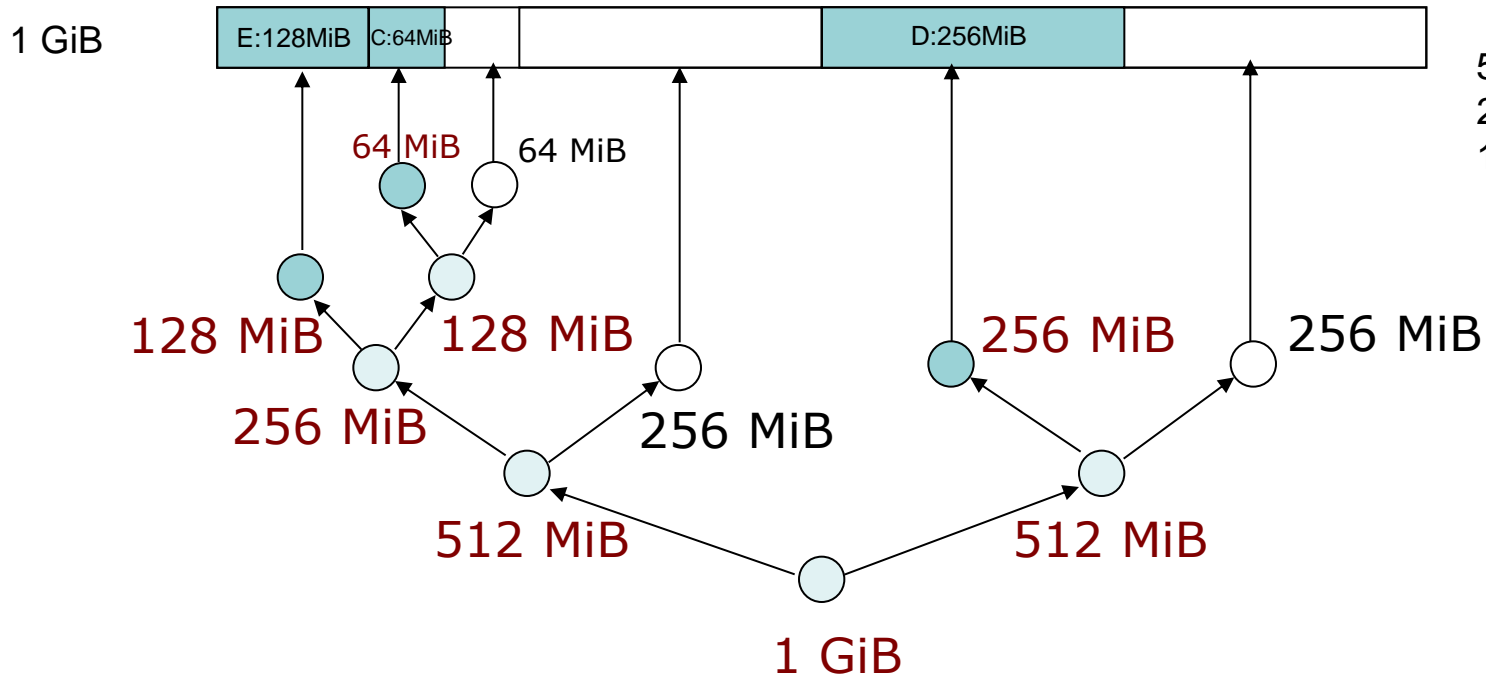


Es folgt Anforderung E: 75 MiB, d.h. Block der Größe 128 MiB

Buddy-System (15)

Nach Anforderung E: 75 MiB, d.h. Block der Größe 128 MiB:

Freie Blöcke:



1 GiB: 0
512 MiB: 0
256 MiB: 2
128 MiB: 0
64 MiB: 1

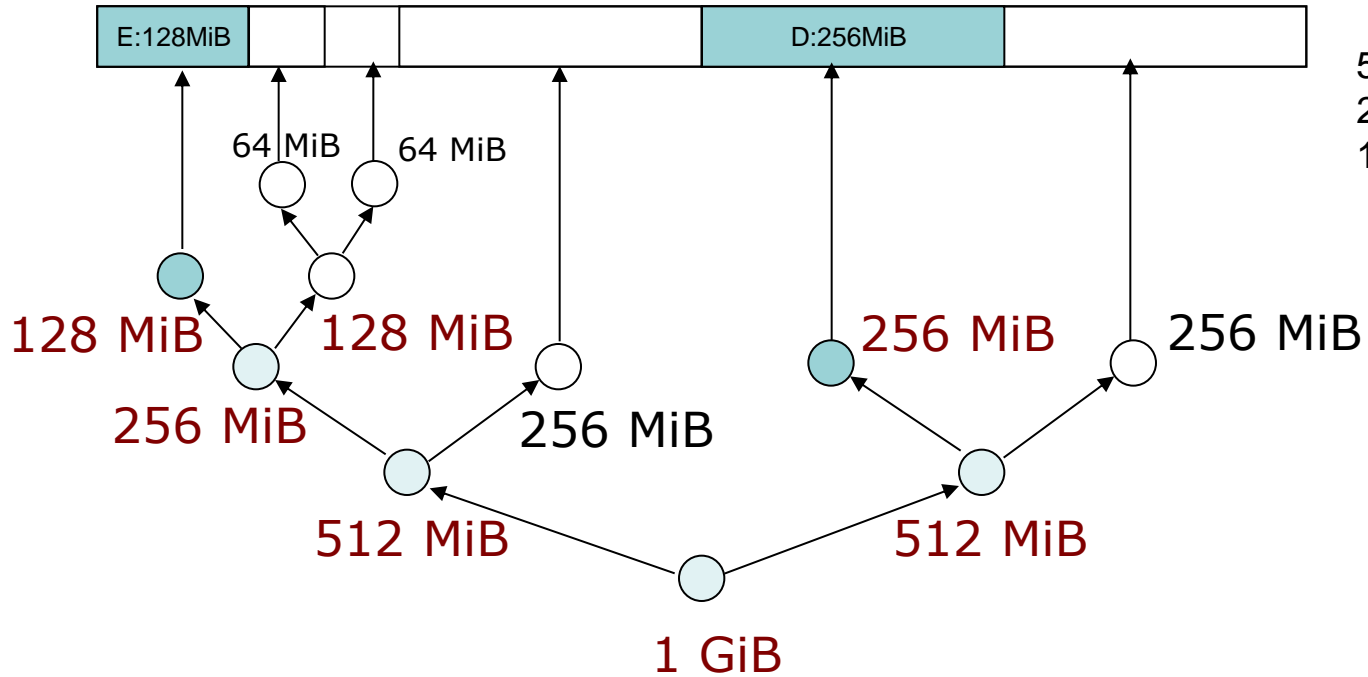
Es folgt Freigabe C

Buddy-System (16)

Bei Freigabe C:

Freie Blöcke:

1 GiB



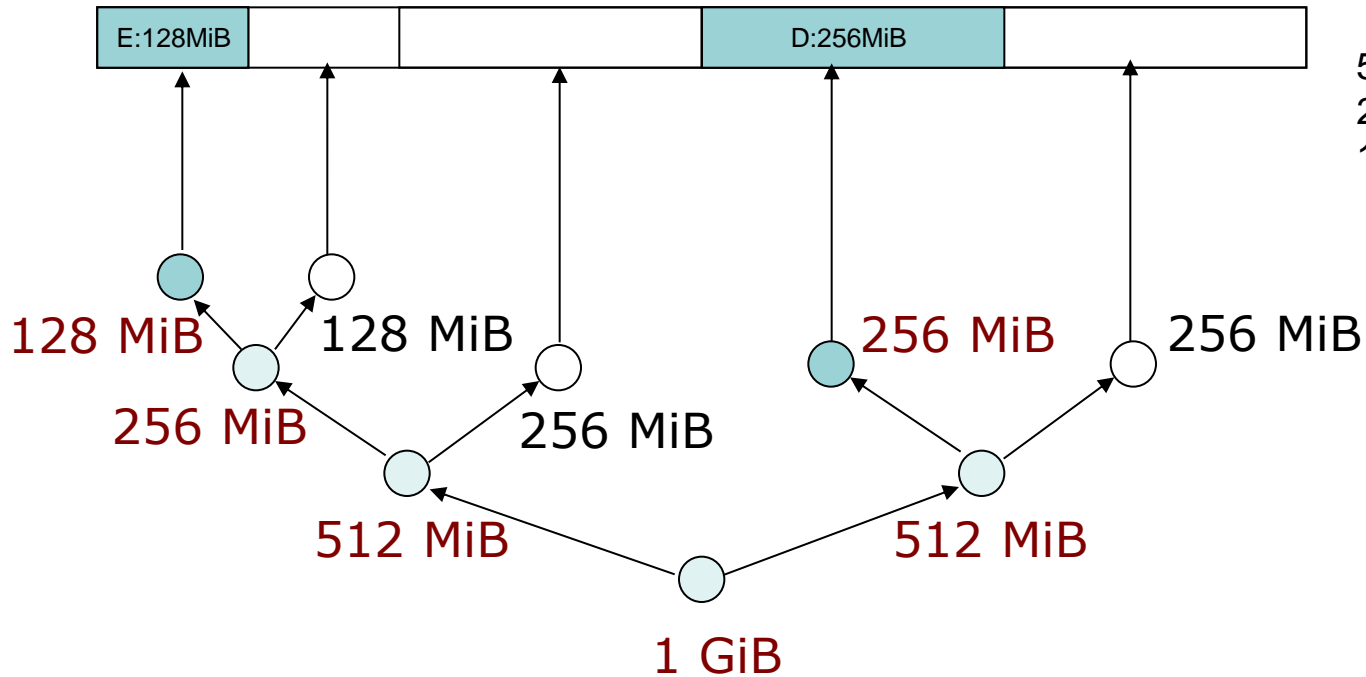
1 GiB: 0
512 MiB: 0
256 MiB: 2
128 MiB: 0
64 MiB: 2

Buddy-System (17)

Nach Freigabe C:

Freie Blöcke:

1 GiB



1 GiB: 0
512 MiB: 0
256 MiB: 2
128 MiB: 1
64 MiB: 0

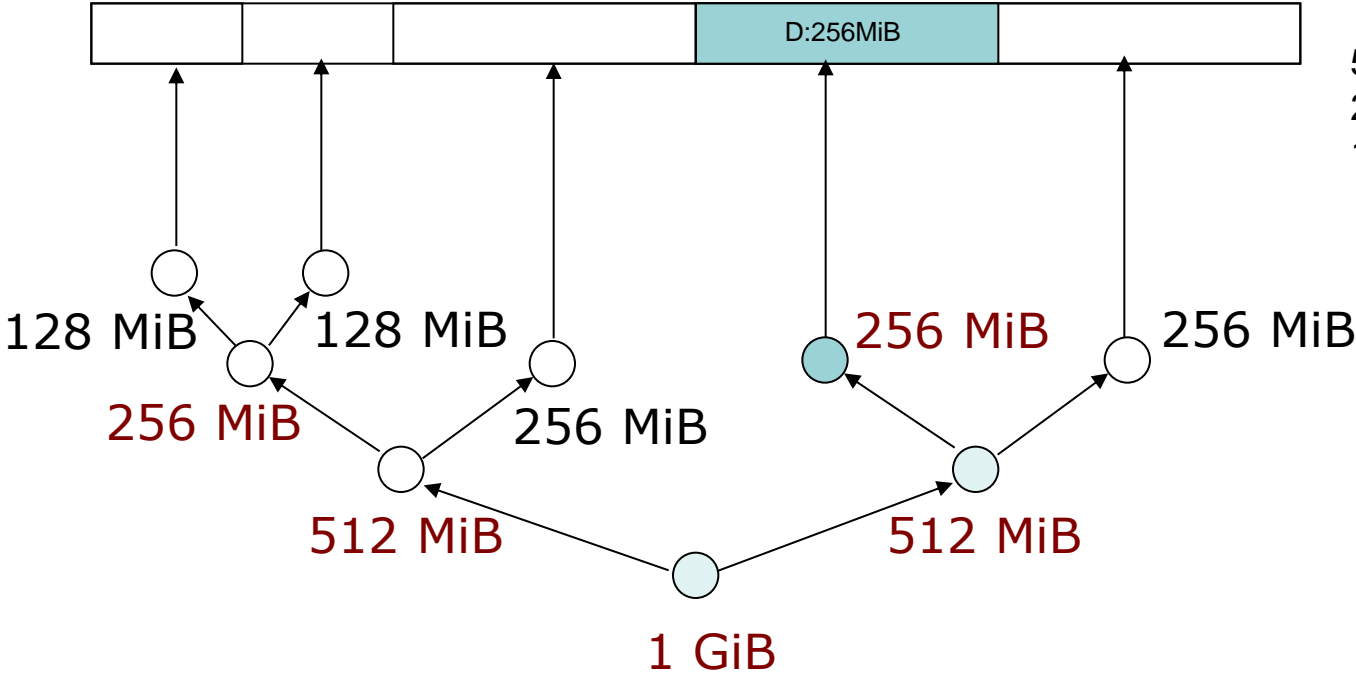
Es folgt Freigabe E

Buddy-System (18)

Bei Freigabe E:

Freie Blöcke:

1 GiB



- 1 GiB: 0
- 512 MiB: 0
- 256 MiB: 2
- 128 MiB: 2
- 64 MiB: 0

Buddy-System (19)

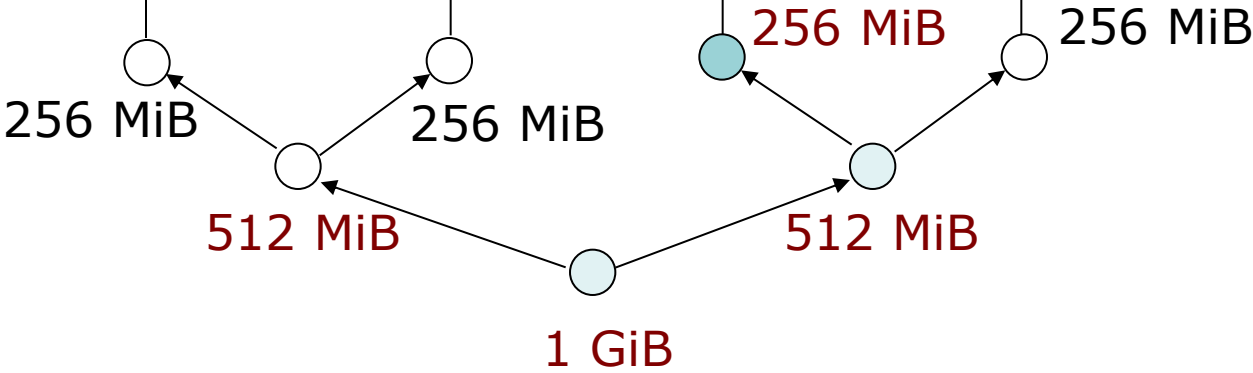
Bei Freigabe E:

Freie Blöcke:

1 GiB



- 1 GiB: 0
- 512 MiB: 0
- 256 MiB: 3
- 128 MiB: 0
- 64 MiB: 0



Buddy-System (20)

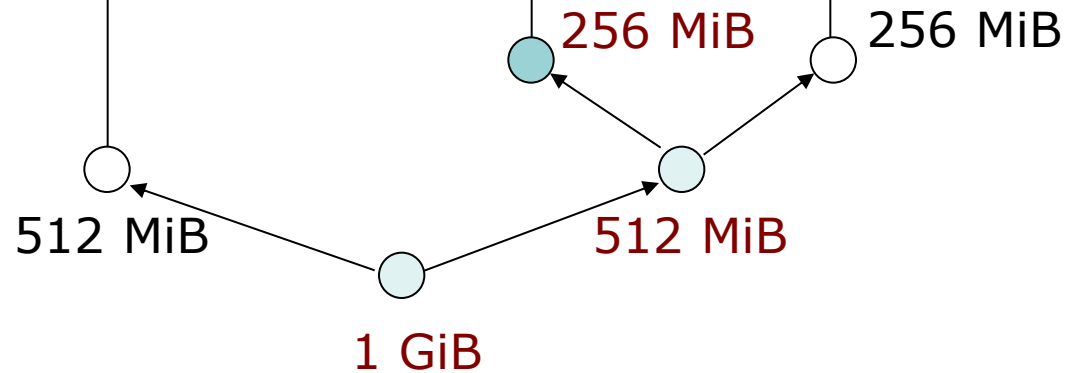
Nach Freigabe E:

1 GiB



Freie Blöcke:

1 GiB: 0
512 MiB: 1
256 MiB: 1
128 MiB: 0
64 MiB: 0



Es folgt Freigabe D

Buddy-System (21)

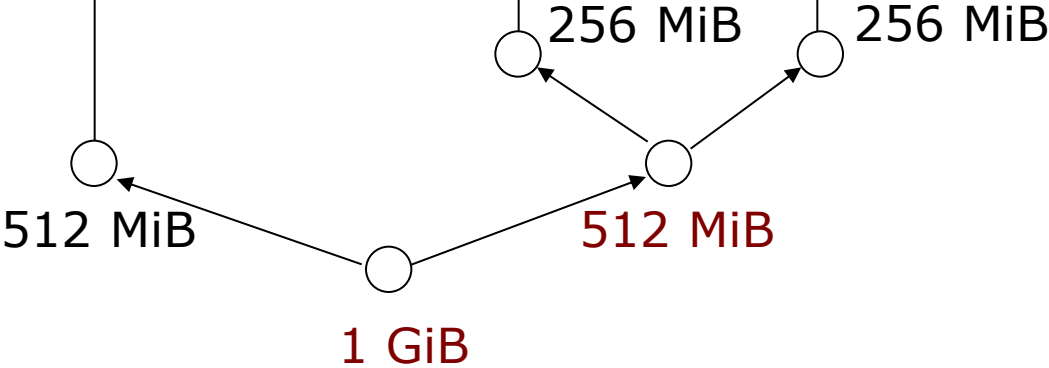
Bei Freigabe D:

Freie Blöcke:

1 GiB



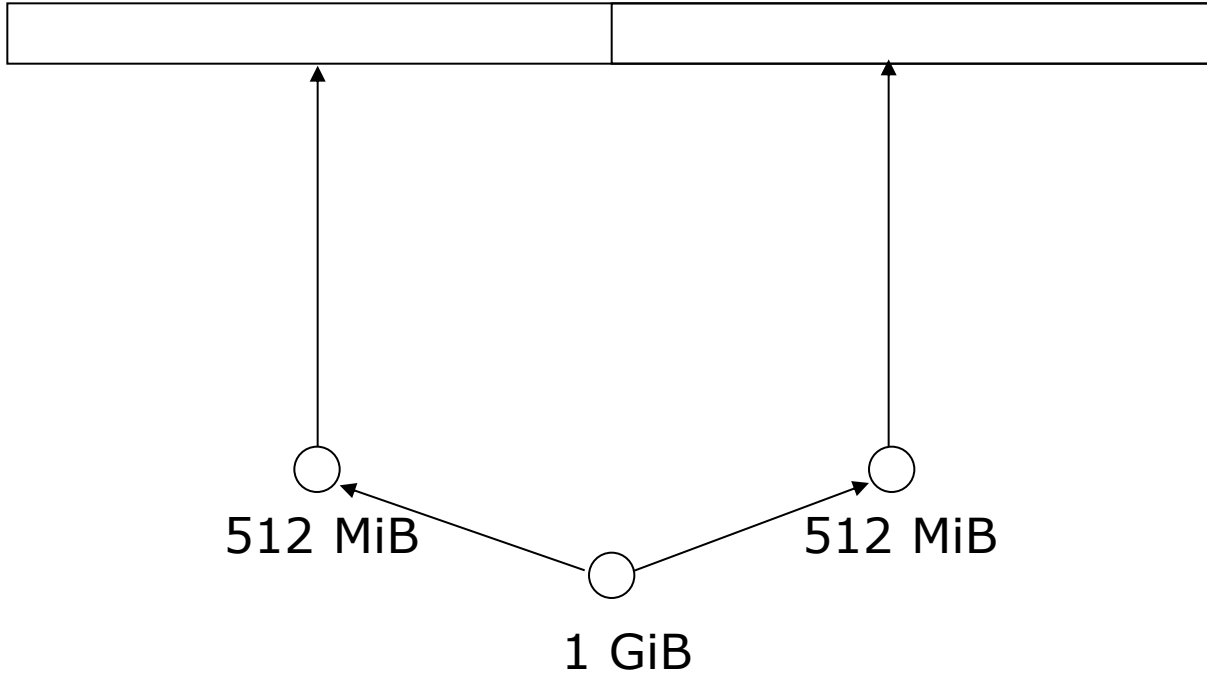
- 1 GiB: 0
- 512 MiB: 1
- 256 MiB: 2
- 128 MiB: 0
- 64 MiB: 0



Buddy-System (22)

Bei Freigabe D:

1 GiB



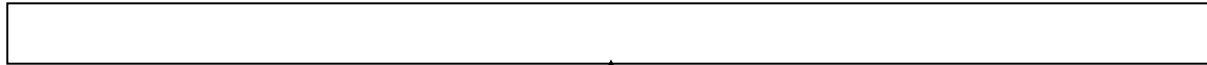
Freie Blöcke:

1 GiB: 0
512 MiB: 2
256 MiB: 0
128 MiB: 0
64 MiB: 0

Buddy-System (23)

Nach Freigabe D:

1 GiB



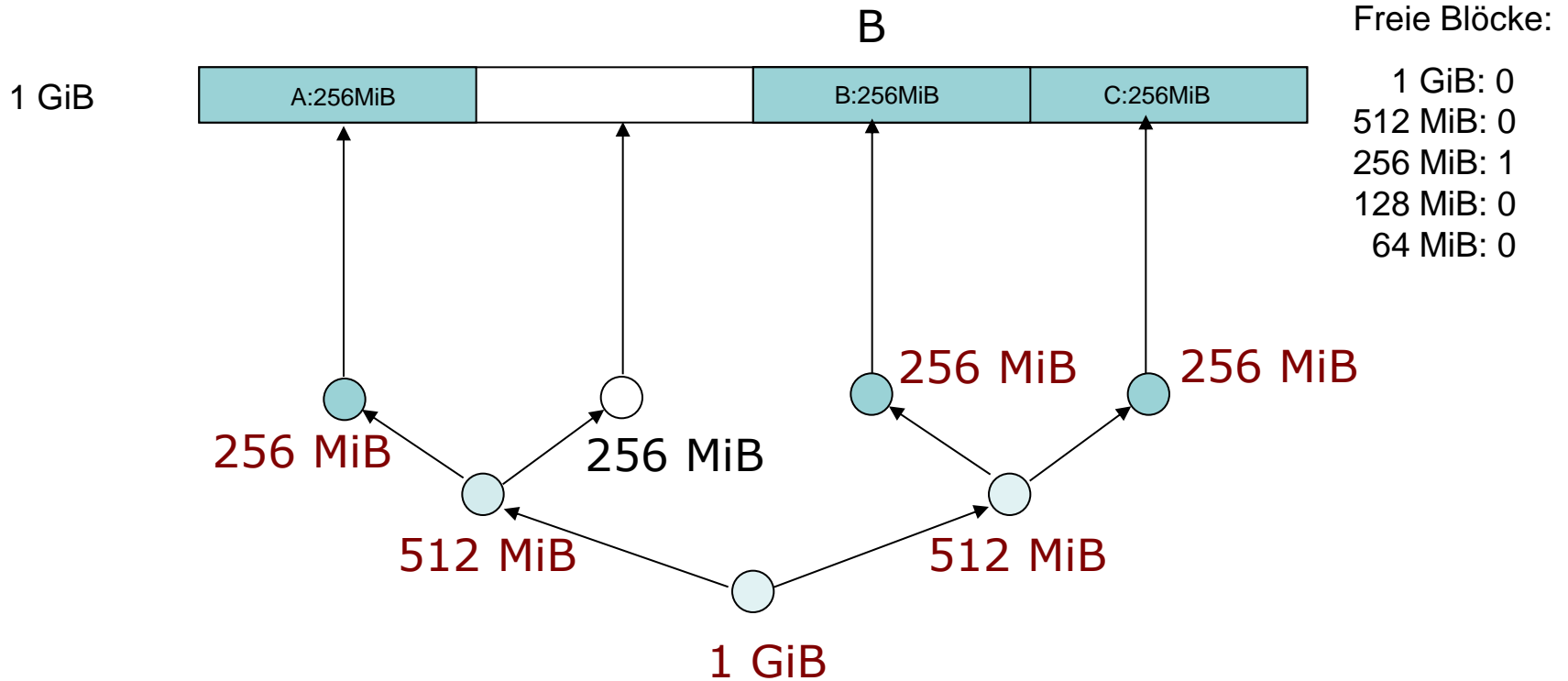
1 GiB

Freie Blöcke:

1 GiB: 1
512 MiB: 0
256 MiB: 0
128 MiB: 0
64 MiB: 0

Gesamter Speicher wieder als 1 Block verfügbar

Buddy-System (24)



Was passiert bei Freigabe von B?

Buddy-System (25)

- Effiziente Suche nach freiem Block
- Dynamische Anzahl nicht-ausgelagerter Prozesse
- Beschränkte interne Fragmentierung: I.d.R. kleiner als die halbe Größe des gewählten freien Blockes
- Wenig externe Fragmentierung, schnelle Zusammenfassung von freien Blöcken

Grundlegende Methoden der Speicherverwaltung

Partitionierung

- Speicheraufteilung zwischen verschiedenen Prozessen (Partitionierung mit festen Grenzen)

Paging

- Einfaches Paging / kombiniert mit Konzept des virtuellen Speichers

Segmentierung

- Einfache Segmentierung / kombiniert mit Konzept des virtuellen Speichers

Einfaches Paging (1)

- Zunächst wie bisher: Prozesse sind entweder ganz im Speicher oder komplett ausgelagert
- Prozessen werden Speicherbereiche zugeordnet, die **nicht** notwendigerweise zusammenhängend sind
- Hauptspeicher ist aufgeteilt in viele **gleichgroße Seitenrahmen**
- Prozesse sind aufgeteilt in **Seiten derselben Größe**

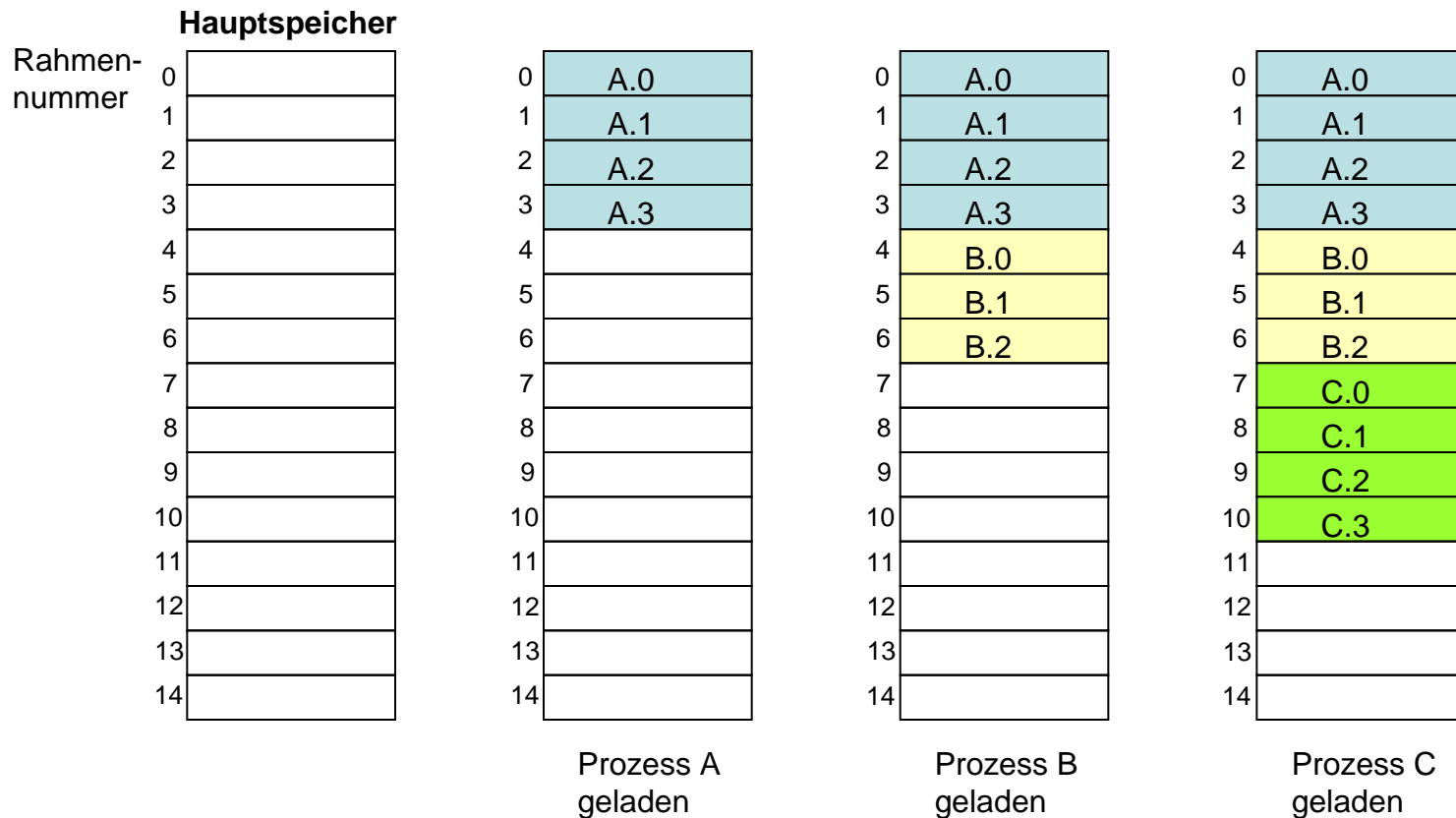
Einfaches Paging (2)

- Betriebssystem verwaltet **Seitentabelle** für jeden Prozess
- Zuordnung von Seiten zu Seitenrahmen bei der Ausführung von Prozessen
- Innerhalb Programm: Logische Adresse der Form „**Seitennummer, Offset**“
- Durch Seitentabelle: Übersetzung der logischen Adressen in physikalische Adressen „**Rahmennummer, Offset**“

Einfaches Paging (3)

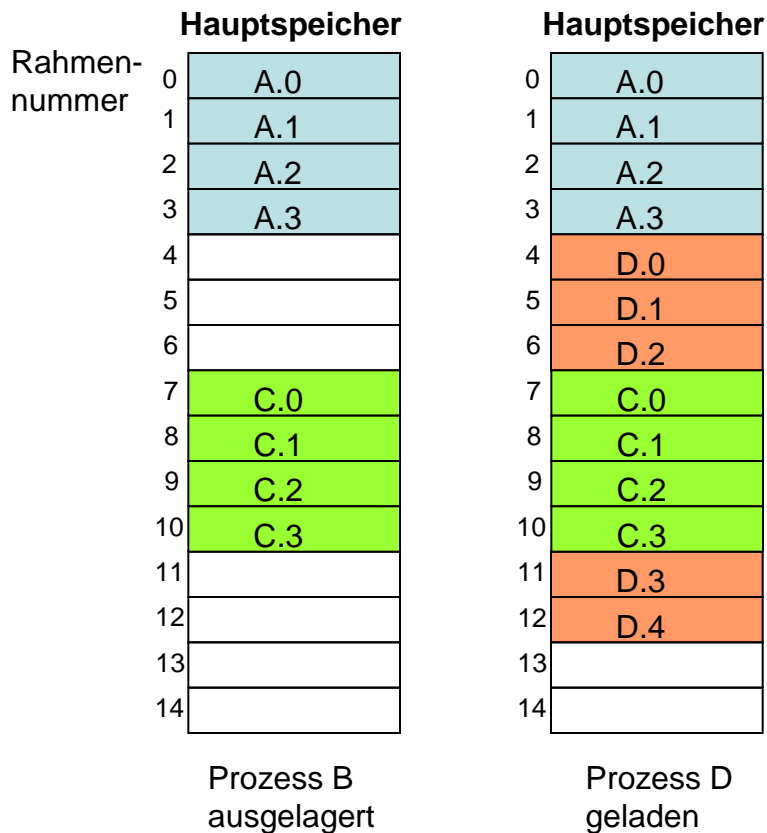
- Prozessorhardware übersetzt logische Adresse in physikalische Adresse
- Interne Fragmentierung nur bei letzter Seite eines Prozesses
- Keine externe Fragmentierung

Einfaches Paging (4)

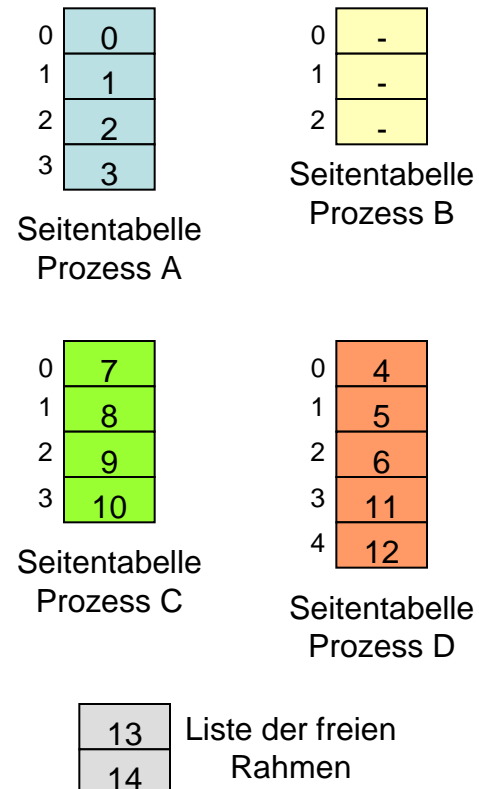


Prozess D
mit 5 Seiten
soll jetzt
geladen
werden!

Einfaches Paging (5)



Datenstrukturen zum aktuellen Zeitpunkt:



Einfaches Paging (6)

- Einfaches Paging ähnlich zum Konzept des statischen Partitionierens
- Aber: Beim Paging sind die Partitionen relativ klein
- Programm kann mehrere Partitionen /Rahmen belegen, die nicht aneinander angrenzen

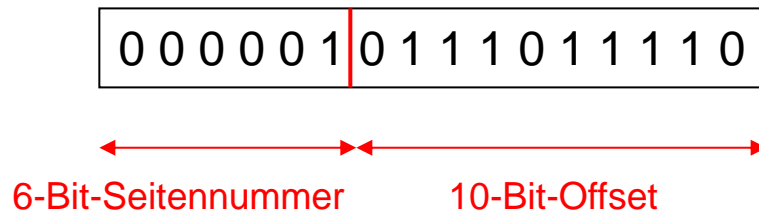
Einfaches Paging (7)

Berechnung von physikalischen Adressen aus logischen Adressen:

- Seitengröße (und Rahmengröße) ist eine Zweierpotenz
- Logische Adresse im Programm besteht aus Seitennummer und Offset
- Physikalische Adresse besteht aus Rahmennummer und Offset

Einfaches Paging (8)

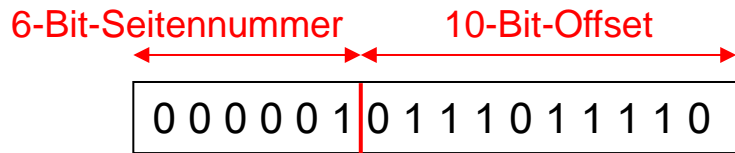
- Beispiel: Logische Adresse der Länge 16 Bit
- Seitengröße 1 KiB = $2^{10} = 1024$ Bytes
- Offset-Feld von 10 Bit wird benötigt, um alle Bytes referenzieren zu können



- Der Prozess kann bis zu $2^6=64$ verschiedene Seiten haben, die über die Seitentabelle des Prozesses auf Seitenrahmen im Hauptspeicher abgebildet werden

Einfaches Paging (9)

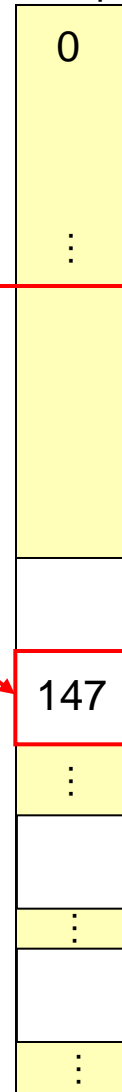
alle Seitenrahmen
des Arbeitsspeichers



0	10010010
1	10010011
2	11011001
3	11111010

Seitentabelle
des Prozesses

Seitenrahmen Nr. 147
(=<10010011>)



Speicherzelle Nr. 478
(= <0111011110>)
innerhalb des
Seitenrahmens

Physikalische Adresse

10010011	0111011110
----------	------------

Rahmennr. * Seitengröße + Offset

Einfaches Paging (10)

- Hauptspeicher wird in viele kleine Rahmen gleicher Größe unterteilt
- Jeder Prozess wird in Seiten geteilt, deren Größe der der Rahmen entspricht
- Seitentabelle enthält Zuordnung von Prozessseiten an Seitenrahmen des Speichers
- Interne Fragmentierung nur bei letzter Seite eines Prozesses

Einfaches Paging (11)

Entfernen eines Prozesses aus dem Speicher:

- Seitentabelle enthält Information, welche Seitenrahmen dem Prozess gehören
- Füge diese Rahmen zur Liste der freien Rahmen hinzu
- Keine zusätzlichen Datenstrukturen des Betriebssystems benötigt

Paging mit virtuellem Speicher (1)

Grundidee:

- Lagere **Teile** von Prozessen ein- bzw. aus anstelle kompletter Prozesse
- Programm kann auch weiter ausgeführt werden, auch wenn **nur die aktuell benötigten** Informationen (Code und Daten) im Speicher sind
- Bei Zugriff auf aktuell ausgelagerte Informationen: Nachladen von Seiten

Paging mit virtuellem Speicher (2)

- Hauptspeicher = realer Speicher
- Hauptspeicher + Hintergrundspeicher =
virtueller Speicher
- Vorteile:
 - Platz für mehr bereite Prozesse
 - Tatsächlicher Speicherplatzbedarf eines Prozesses muss nicht im Voraus feststehen
 - Adressraum eines Prozesses kann größer sein als verfügbarer Hauptspeicher

Paging mit virtuellem Speicher (3)

Nachteile:

- Nachladen von Seiten
- Notwendiges Auslagern von anderen Seiten
- System wird langsamer

Lokalität (1)

Effizienz von virtuellem Speicher

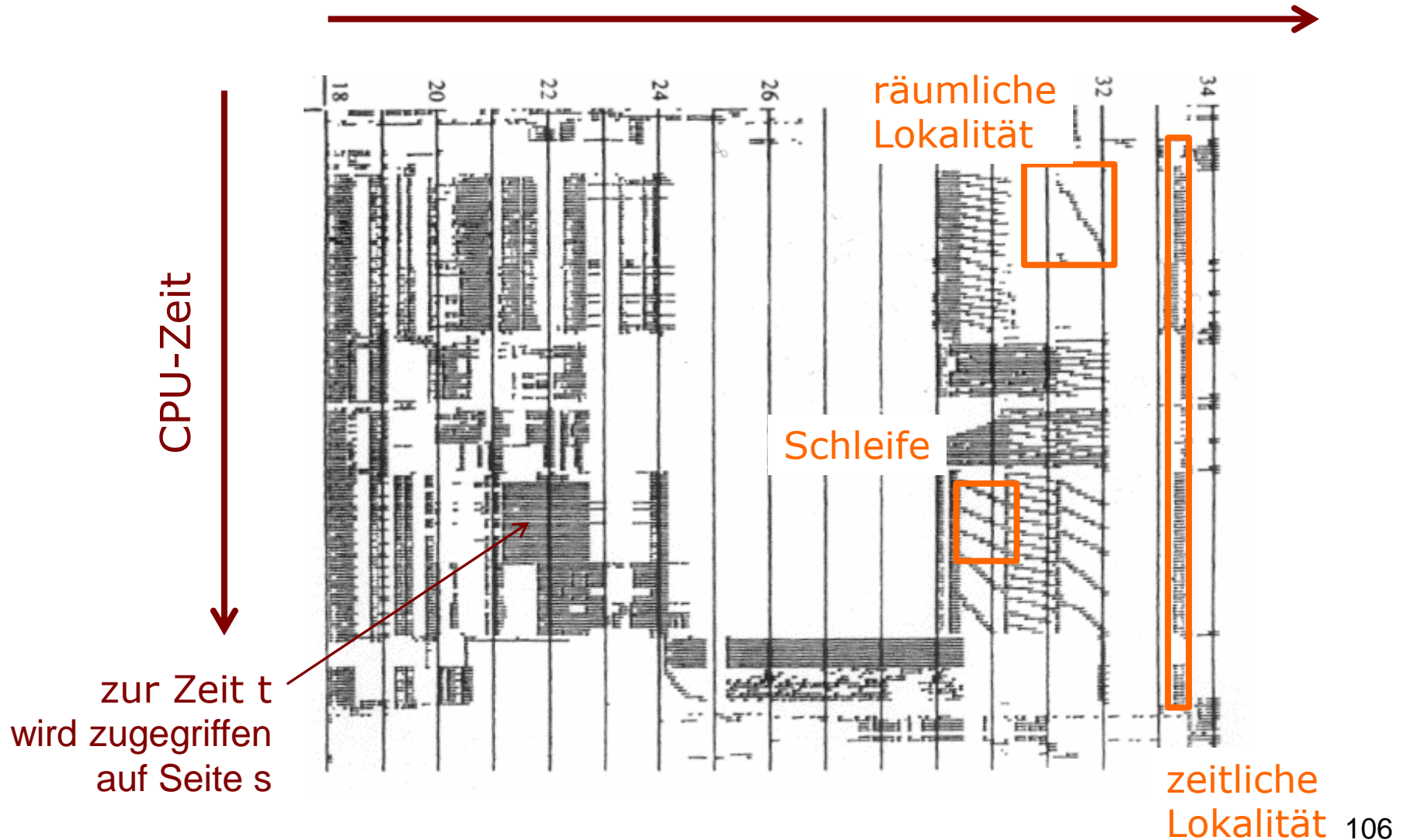
- Typischerweise räumliche und zeitliche Lokalität von Programmen
- **Zeitliche Lokalität:** Nach Zugriff auf eine Speicherzelle ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass in naher Zukunft noch einmal darauf zugegriffen wird
- **Räumliche Lokalität:** Nach Zugriff auf eine bestimmte Speicherzelle gehen die Zugriffe in naher Zukunft auf Speicheradressen in der Nähe

Lokalität (2)

- Die Abarbeitung während kürzerer Zeit bewegt sich häufig in engen Adressbereichen
- Zeitliche Lokalität:
 - Abarbeitung von **Schleifen**
 - In zeitlich engem Abstand Zugriff auf **gleiche Daten**
- Räumliche Lokalität:
 - Sequentielle Abarbeitung von Programmen: Zugriffe auf **benachbarte** Daten
 - Lage von zusammenhängenden Daten

Lokalität (3)

Seitennummern eines Prozesses



Lokalität (4)

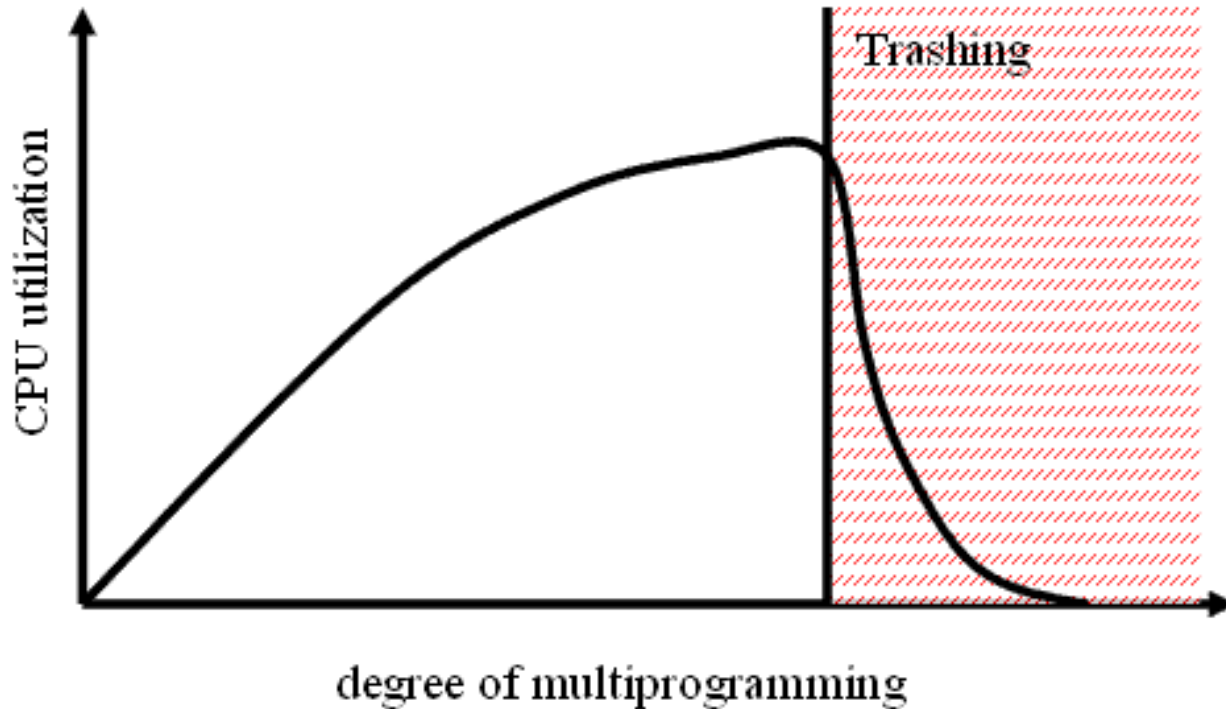
- Paging mit virtuellem Speicher ist nur dann effizient, wenn Lokalität gegeben ist
- Ansonsten Gefahr von „Thrashing“:
 - Ständiges Aus- und Einlagern von Seiten zwischen Hauptspeicher und Festplatte
 - Der Prozessor ist mehr mit Ein- und Auslagern anstatt mit Ausführen von Befehlen beschäftigt

Thrashing (1)

Mögliche Gründe für Thrashing:

1. Zu wenig Speicher
2. Zu viele Prozesse
3. Zu viele speicherintensive Prozesse
4. Schlechte Ausnutzung von Lokalität
5. ...

Thrashing (2)



Um Thrashing zu vermeiden versucht das Betriebssystem vorherzusagen, welche Seiten in naher Zukunft nicht benötigt werden

Thrashing (3)

Es hängt auch vom Programmierer ab:

```
int m[256][256];
for (i=0; i<256; i++)
    for (j=0; j< 256; j++)
        m[i][j] = 0;
```

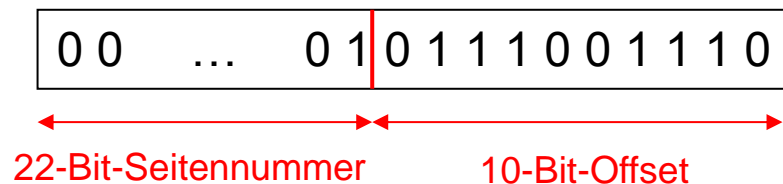
im Vergleich zu:

```
int m[256][256];
for (j=0; j<256; j++)
    for (i=0; i< 256; i++)
        m[i][j] = 0;
```

Während die erste Version die Lokalität ausnutzt, hat die zweite eine deutlich schlechtere Effizienz, weil sie ständig zwischen weiter entfernten Speicherbereichen springt.

Technische Realisierung (1)

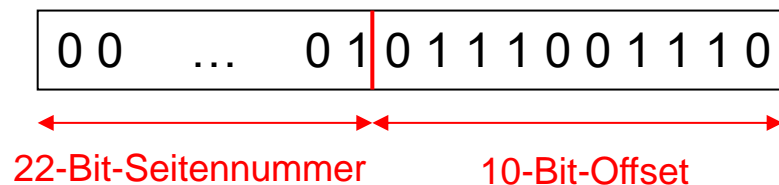
- Einfachstes Modell: Prozess (Daten+Code) befindet sich im Hauptspeicher
- Bei teilweise eingelagerten Prozessen: Zusätzlich Teile im Hintergrundspeicher
- Logische Adressen überdecken **kompletten virtuellen Adressraum**
- Wie bei einfachem Paging: Trennung der logischen Adressen in Seitennummer und Offset



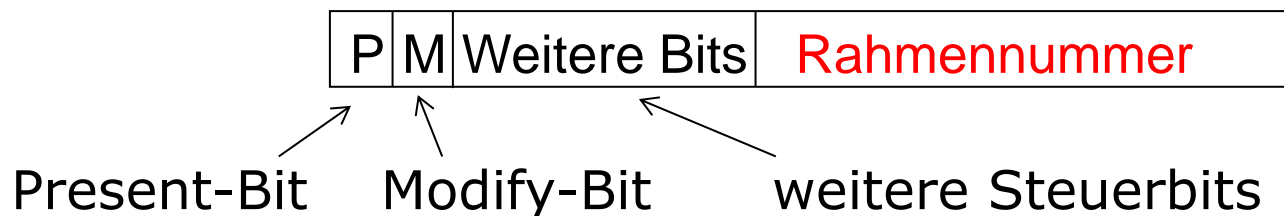
Bsp.: 32-Bit-Adresse
1 KiB Seitengröße

Technische Realisierung (2)

- Zusätzliche Informationen in Seitentabelle:
 - Ist die Seite im Hauptspeicher präsent?
 - Wurde der Inhalt der Seite seit letztem Laden in den Hauptspeicher verändert?
- Logische Adresse:



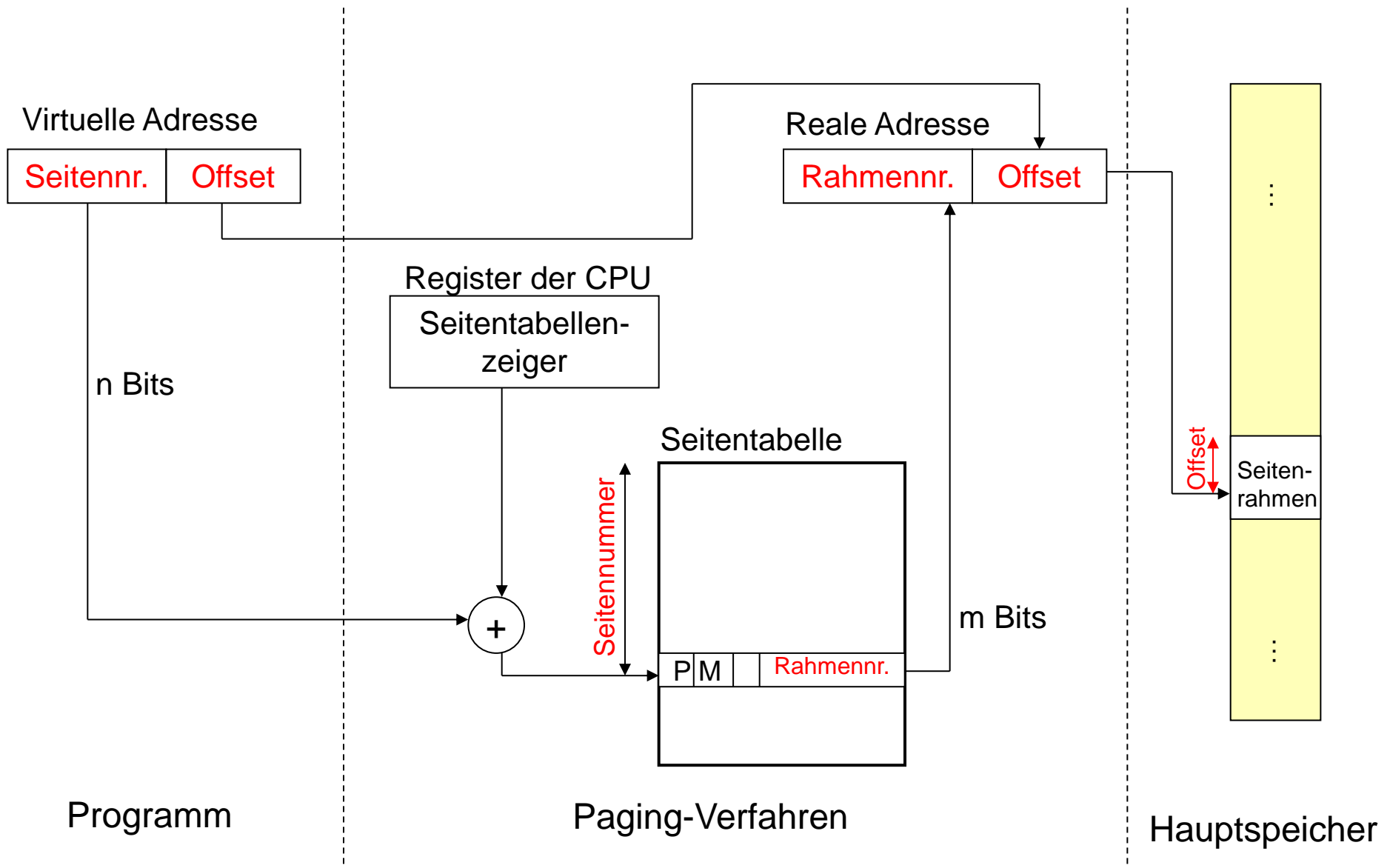
- Seitentabelleneintrag:



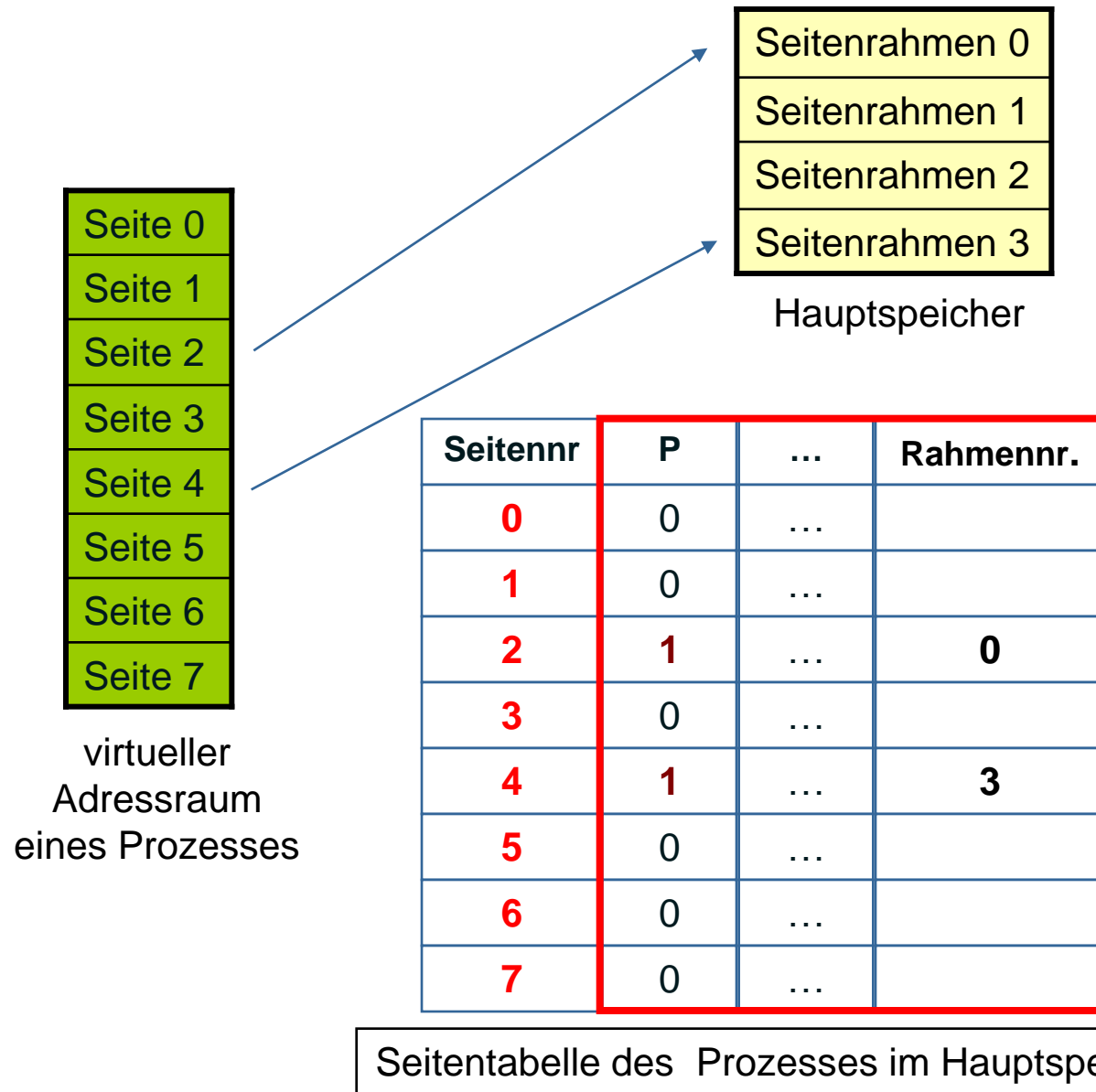
Technische Realisierung (3)

- Seitentabelle liegt im Hauptspeicher
- Umsetzung der virtuellen Adressen in reale Adressen mit Hardwareunterstützung
- Memory Management Unit (MMU) des Prozessors führt Berechnung durch

Adressumsetzung



Seitentabelle



Was passiert z.B. bei Zugriff auf Seite 0?

Seitenfehler (1)

- Zugriff auf Seite, die nicht im Hauptspeicher vorhanden
- Hardware (MMU) hat durch das Present-Bit die Information, dass die angefragte Seite nicht im Hauptspeicher ist
- Das laufende Programm wird unterbrochen und der aktuelle Programmzustand wird gesichert

Seitenfehler (2)

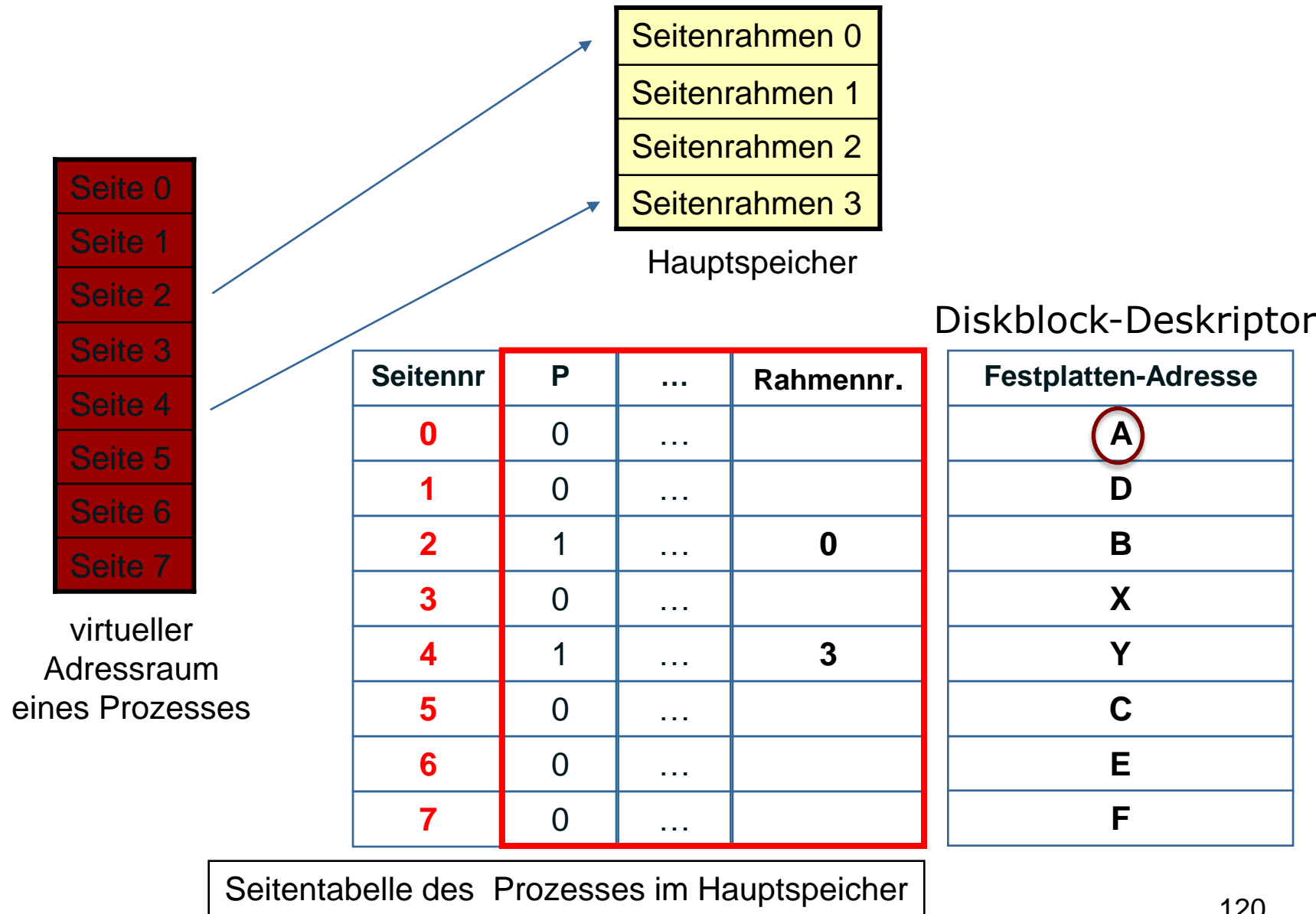
- Betriebssystem lädt die entsprechende Seite von der Festplatte in einen freien Rahmen
- Falls kein Rahmen frei: Vorheriges Verdrängen der Daten eines belegten Rahmens (beachte dabei Modify-Bit)
- Aktualisierung der Seitentabelleneinträge (Present-Bit und Rahmennummer)
- Danach kann unterbrochenes Programm fortgesetzt werden, Prozess ist rechenbereit

Seitenfehler (3)

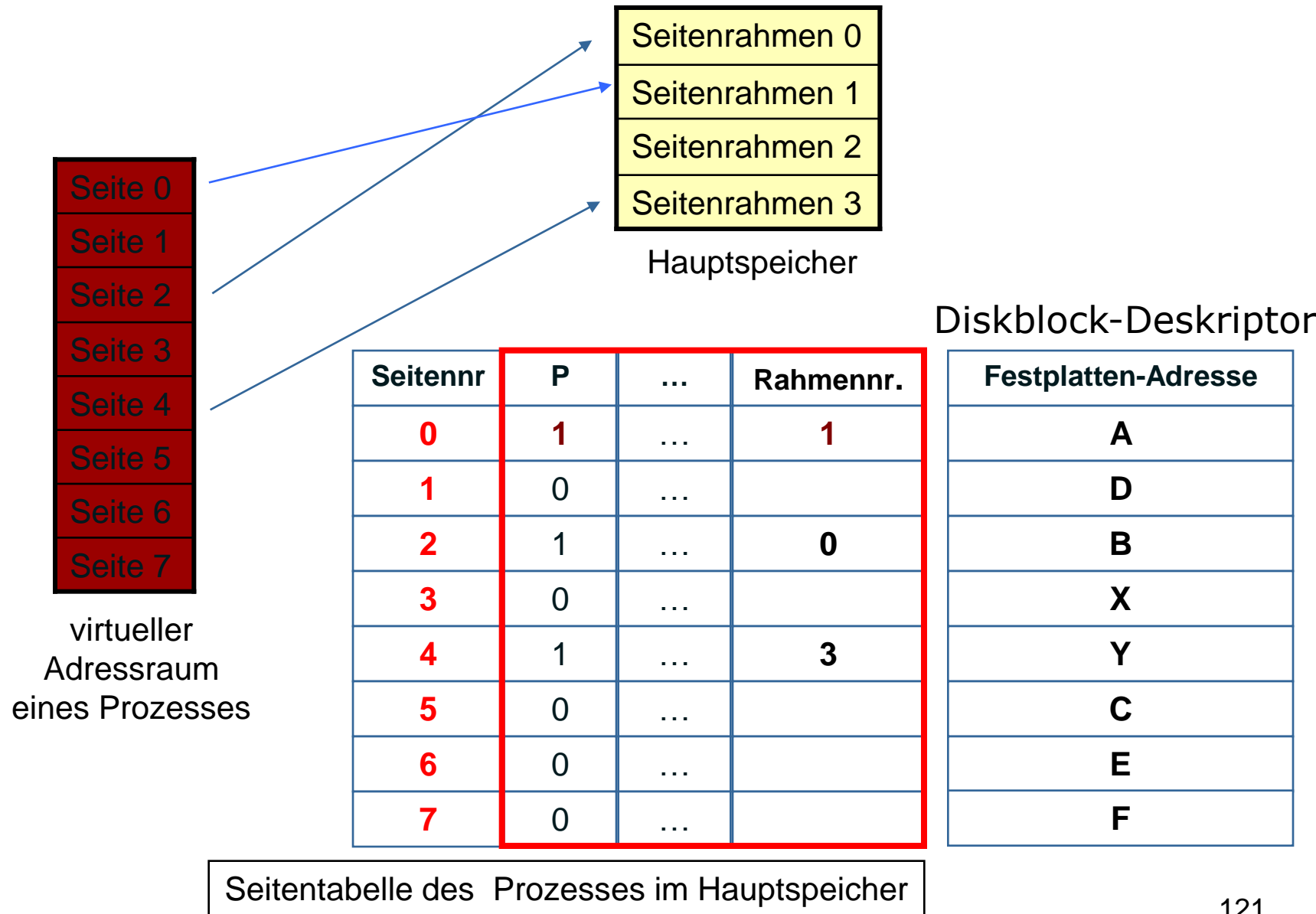
Welche Informationen benötigt das Betriebssystem zum Einlagern von Seiten?

- Abbildung Seitennummer auf Festplattenadresse
- Liste freier Seitenrahmen

Seitenfehler (4)



Seitenfehler (4)



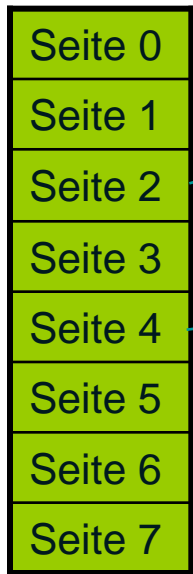
Verdrängung (1)

- Wenn kein freier Rahmen vorhanden:
Verdrängen von Seitenrahmen auf die Festplatte
- Je nach Betriebssystem:
 - Alle Seitenrahmen sind Kandidaten für Verdrängung oder
 - Nur Seitenrahmen des eigenen Prozesses
- Entscheidung unter diesen Kandidaten gemäß Verdrängungsstrategie
- Ziel: Gute Ausnutzung von Lokalität

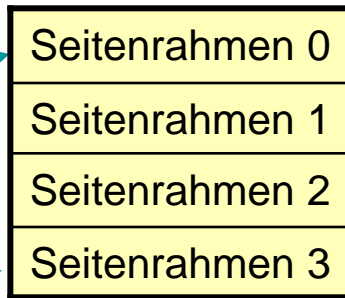
Verdrängung (2)

- Modify-Bit gesetzt: Schreibe Seite im entsprechenden Rahmen auf Festplatte zurück
- Aktualisiere Seitentabelle (P-Bit, Rahmennummer)
- Generell: Suche von bestimmten Seitenrahmen in Seitentabelle von Prozessen ineffizient
- Weitere Tabelle: Abbildung von Seitenrahmennummer auf \langle Prozessnummer, Seitennummer \rangle

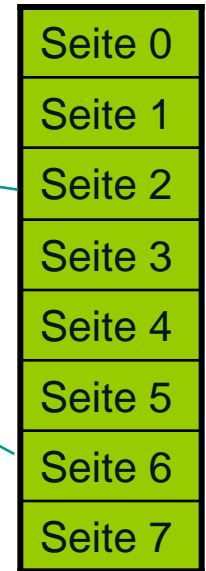
Verdrängung (3)



virtueller Adressraum Prozess 1



Hauptspeicher



virtueller Adressraum Prozess 2

Seite	P	...	Rahmen
0	0	...	
1	0	...	
2	1	...	0
3	0	...	
4	1	...	3
5	0	...	
6	0	...	
7	0	...	

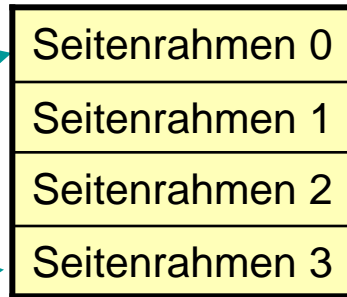
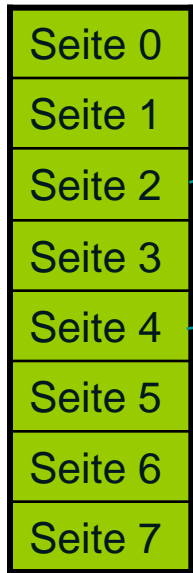
Seitentabelle von Prozess 1

Seite	P	...	Rahmen
0	0	...	
1	0	...	
2	1	...	1
3	0	...	
4	0	...	
5	0	...	
6	1	...	2
7	0	...	

Seitentabelle von Prozess 2

Seite 0 von Prozess 1 soll eingelagert werden

Verdrängung (3)



Seite 2 von Prozess 2 wird ausgelagert



Seite	P	...	Rahmen
0	0	...	
1	0	...	
2	1	...	0
3	0	...	
4	1	...	3
5	0	...	
6	0	...	
7	0	...	

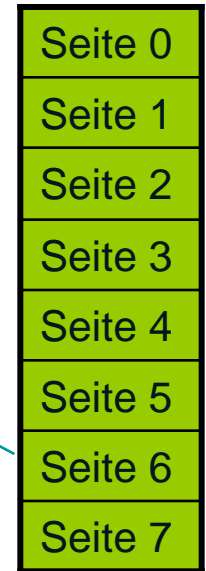
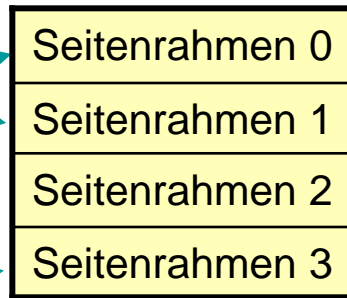
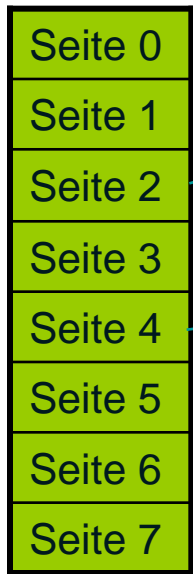
Seitentabelle von Prozess 1

Seite	P	...	Rahmen
0	0	...	
1	0	...	
2	0	...	
3	0	...	
4	0	...	
5	0	...	
6	1	...	2
7	0	...	

Seitentabelle von Prozess 2

Seite 0 von Prozess 1 soll eingelagert werden

Verdrängung (3)



Seite	P	...	Rahmen
0	1	...	1
1	0	...	
2	1	...	0
3	0	...	
4	1	...	3
5	0	...	
6	0	...	
7	0	...	

Seitentabelle von Prozess 1

Seite	P	...	Rahmen
0	0	...	
1	0	...	
2	0	...	
3	0	...	
4	0	...	
5	0	...	
6	1	...	2
7	0	...	

Seitentabelle von Prozess 2

Seite 0 von Prozess 1 wird eingelagert

Verdrängung (4)

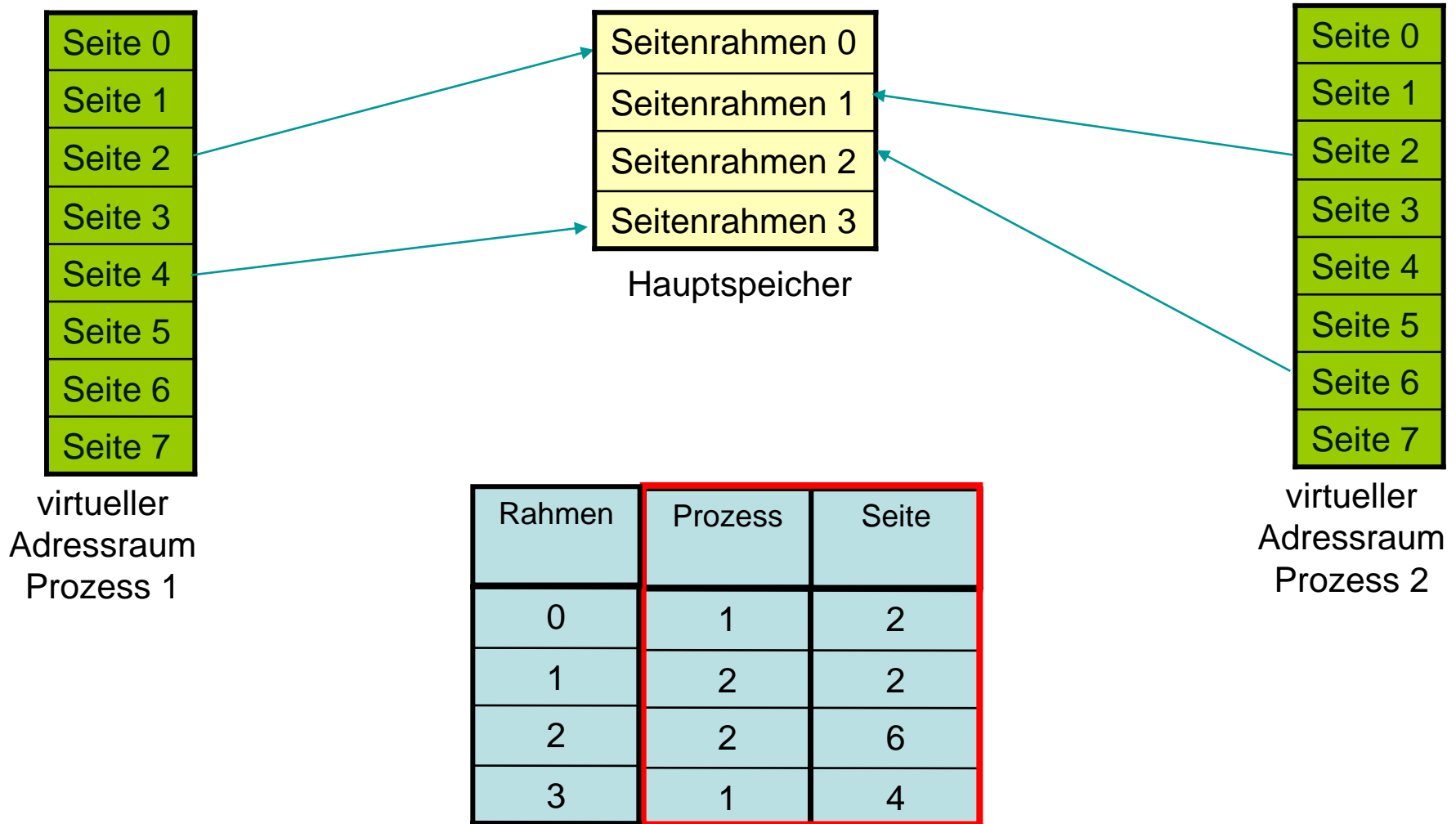


Abbildung Seitenrahmennummer auf <Prozessnummer, Seitennummer>

Größe von Seitentabellen

- Problem: Größe der Seitentabelle bei großem virtuellen Adressraum
- Beispiel: 32-Bit-Adressraum, 4 KiB Seiten für die wir 12 Bit benötigen
 - 20-Bit-Seitennummer, 12-Bit-Offset
 - Also: 2^{20} Seiten der Größe 2^{12} Byte, Seitentabelle mit 2^{20} Zeilen!
 - Annahme: $2^2=4$ Byte pro Zeile
 - Also: $2^{20}2^2=2^{22}$ Byte für Seitentabelle, d.h. $2^{22-12}=2^{10}$ Rahmen für Seitentabelle eines Prozesses im Hauptspeicher benötigt

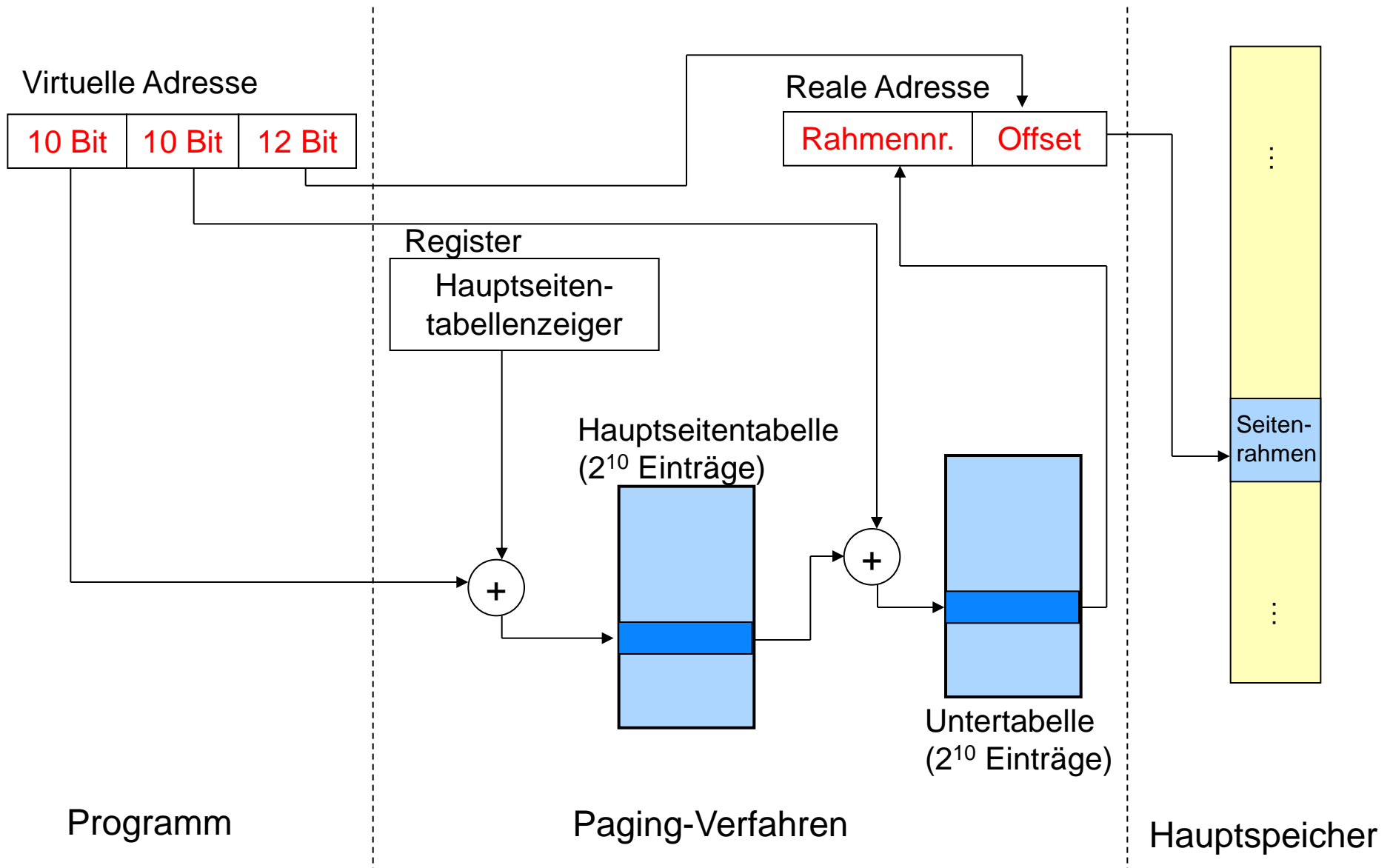
Zweistufige Seitentabellen (1)

- Hierarchische Seitentabelle
- Idee: Speichere auch Seitentabelle im virtuellen Speicher
- Im Beispiel: 2^{20} Seiten müssen angesprochen werden, also werden 2^{10} Rahmen für Seitentabelle benötigt
- Idee: Benutze eine Hauptseitentabelle, die immer im Speicher liegt
- Diese enthält 2^{10} Verweise auf Untertabellen

Zweistufige Seitentabellen (2)

- Erste 10 Bits einer virtuellen 32-Bit-Adresse: Index für die Hauptseite, um die benötigte Untertabelle zu finden
- Wenn entsprechende Seite nicht im Speicher: Lade in freien Seitenrahmen
- Nachfolgende 10 Bit der Adresse: Index von Seitenrahmen in Untertabelle
- Also Referenzen auf 2^{20} Seiten möglich
- Restliche 12 Bit der virtuellen Adresse: wie vorher Offset innerhalb des Seitenrahmens

Adressumsetzung



Invertierte Seitentabellen (1)

- Alternative für noch größere Adressräume
- Viel größere Anzahl von Seiten des virtuellen Adressraumes als zugeordnete Rahmen von Prozessen
- Seitentabellen meist nur sehr dünn besetzt
- Seitentabellen zur Abbildung von Seitennummer auf Rahmennummer verschwenden Speicherplatz

Invertierte Seitentabellen (2)

- Nicht für jede virtuelle Seite einen Eintrag, sondern für jeden **physischen Seitenrahmen**
- Speichere zu Seitenrahmen die zugehörige Seitennummer
- Unabhängig von Gesamtanzahl der Seiten der Prozesse: Ein **fester Teil des realen Speichers** für die Tabellen benötigt

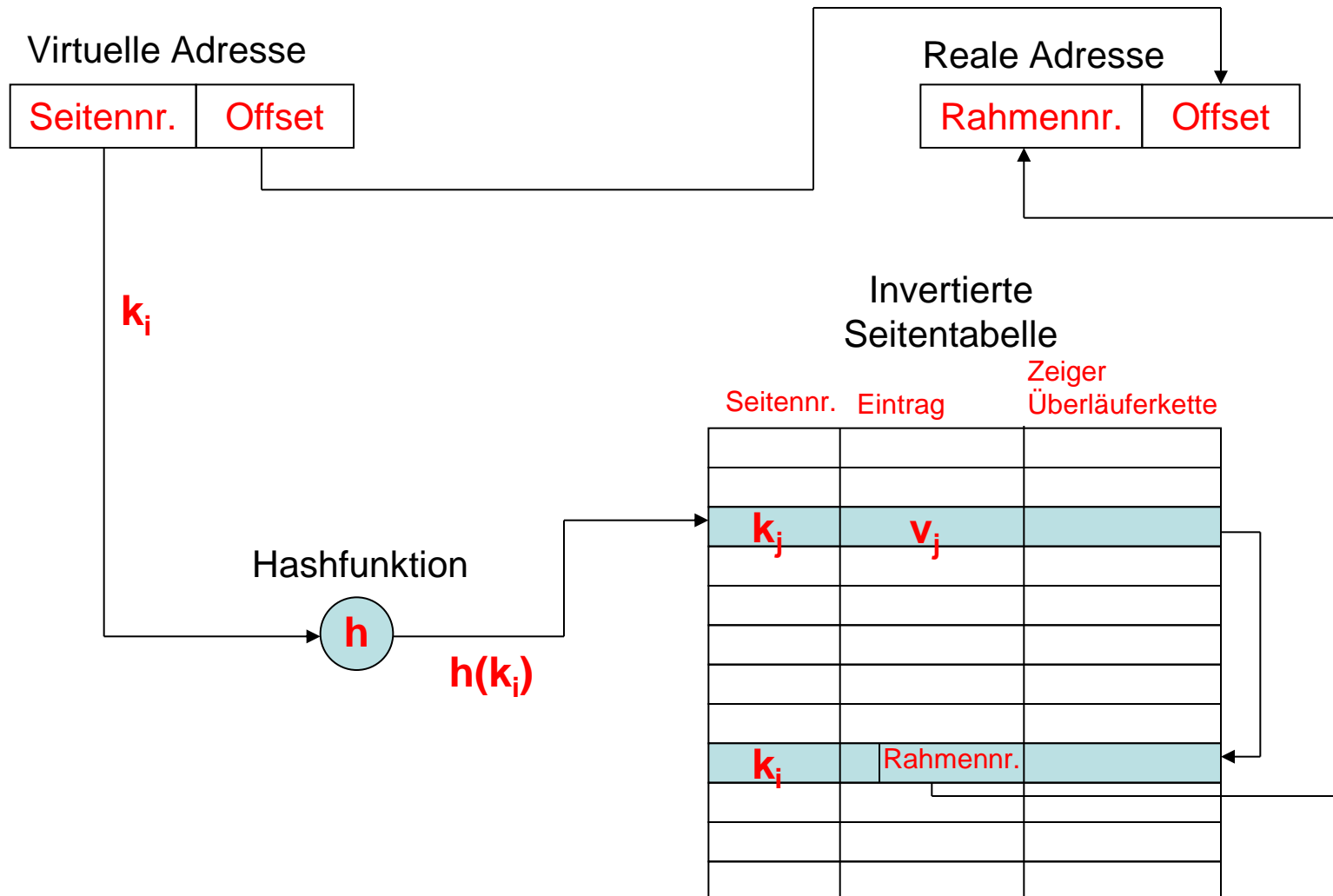
Invertierte Seitentabellen (3)

- Nachteil: Aufwändiger, eine virtuelle Adresse auf eine physische abzubilden
- Benutze eine Hashtabelle um Seitennummern mit Rahmen zu speichern
- $n = \# \text{Seiten}$, $m = \# \text{Rahmen}$, Hashfunktion:
$$h : \{0, \dots, n-1\} \rightarrow \{0, \dots, m-1\}$$
- Sei k_i Seitennummer, einfaches Beispiel:
$$h(k_i) = k_i \bmod m$$
- Bei Vergabe eines neuen Seitenrahmens v_i :
Speichere an Platz $h(k_i)$ das Paar (k_i, v_i) ab

Invertierte Seitentabellen (4)

- Problem: Hashkollisionen (mehr als einer virtuellen Seitennummer wird derselbe Hashwert zugewiesen)
- Verkettete Liste zur Verwaltung des Überlaufs
- Suche mit Schlüssel k_i : Nachschauen an Stelle $h(k_i)$
- Wenn Stelle belegt: Überprüfe, ob Schlüssel k_i übereinstimmt
- Wenn nicht: Verfolge Überläuferkette

Invertierte Seitentabellen (5)



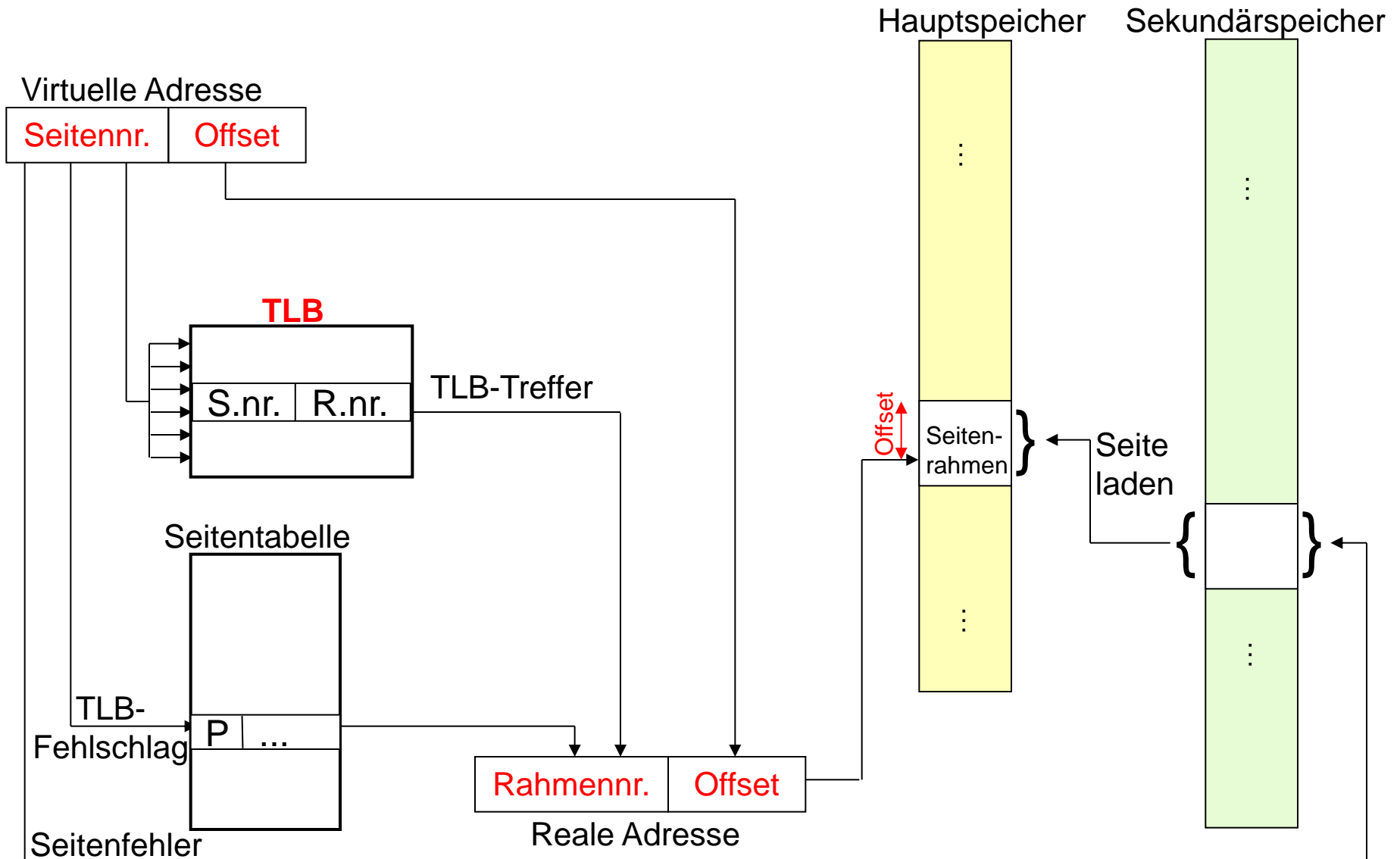
Translation Lookaside Buffer (TLB)

- Bei Speicherzugriff mit Paging: mindestens ein zusätzlicher Zugriff auf die Seitentabelle
- Hardwaremäßige Beschleunigung durch zusätzlichen Cache für Adressübersetzung (Adressumsetzungspuffer, TLB)
- TLB enthält Seitentabelleneinträge, auf die zuletzt zugegriffen wurde (Lokalitätsprinzip)

TLB: Suche nach virtueller Adresse

- Siehe nach, ob Eintrag zu virtueller Adresse in TLB
- Wenn ja: Lies Rahmennummer und bilde reale Adresse
- Sonst:
 - Siehe nach in Seitentabelle, ob P-Bit gesetzt
 - Wenn ja: Aktualisiere TLB durch Einfügen des neuen Seitentabelleneintrags, bilde Adresse
- Wenn Seite nicht im Hauptspeicher: Lade Seite von Festplatte nach und aktualisiere Seitentabelle

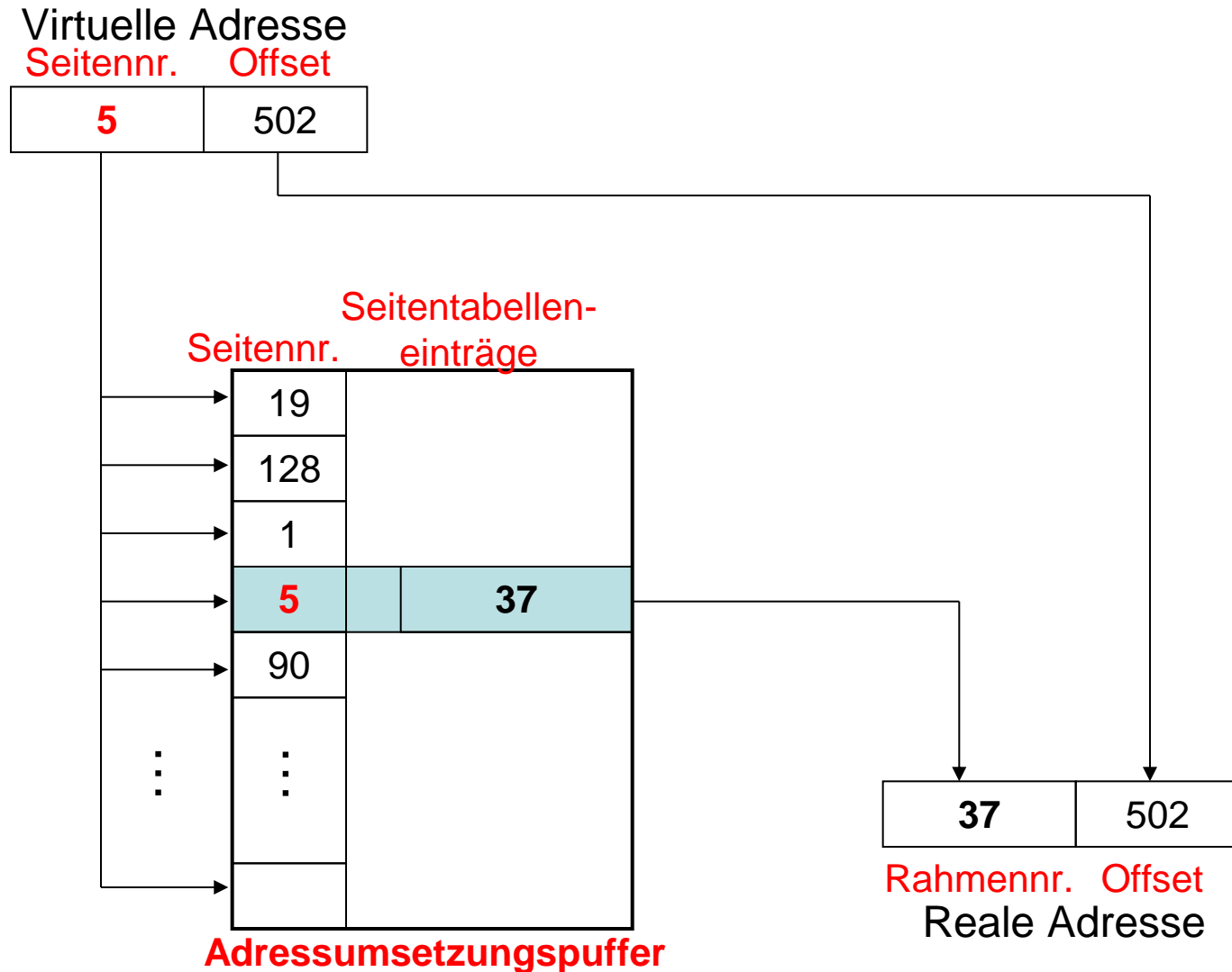
Verwendung des TLB



TLB: Assoziative Zuordnung (1)

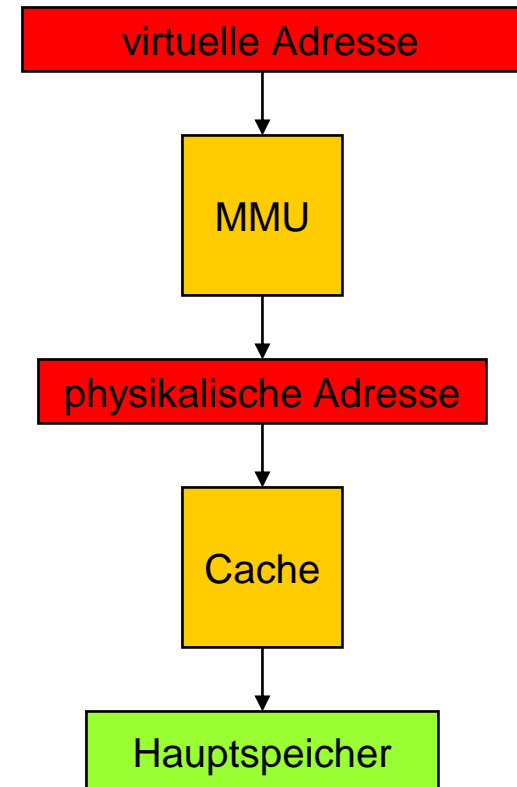
- TLB enthält nur einige Einträge
- Seitennummer kann nicht als Index dienen
- Angefragte Seitennummer wird durch Hardware **parallel** mit allen Einträgen in TLB verglichen
- Bei neuem Eintrag: Verdrängungsstrategie notwendig

TLB: Assoziative Zuordnung (2)



TLB und Caches

- Zusätzlich noch Caches für Programme und Daten
- Verwenden physikalische Adressen



Seitengröße

- Wahl der Seitengröße wichtig für Effizienz
- Kleine Seiten: Wenig Verschnitt (interne Fragmentierung)
- Große Seiten: Kleinere Seitentabellen, weniger Verwaltungsaufwand
- In Realität: Seitengrößen 4 KiB bis 1 GiB

Grundlegende Methoden der Speicherverwaltung

Partitionierung

- Speicheraufteilung zwischen verschiedenen Prozessen (Partitionierung mit festen Grenzen)

Paging

- Einfaches Paging / kombiniert mit Konzept des virtuellen Speichers

Segmentierung

- Einfache Segmentierung / kombiniert mit Konzept des virtuellen Speichers

Segmentierung (1)

- Virtueller Adressraum eines Prozesses aufgeteilt in Segmente mit verschiedener Größe (z.B. Code, Daten)
- Größe der Segmente unterschiedlich und dynamisch, können wachsen
- Nicht notwendigerweise zusammenhängende Speicherbereiche
- Nicht alle Segmente eines Prozesses müssen im Arbeitsspeicher vorhanden sein

Segmentierung (2)

- Keine interne Fragmentierung, aber externe Fragmentierung
- Zuteilungsalgorithmen benötigt (z.B. First Fit oder Best Fit)
- Schutz und gemeinsame Nutzung auf Segmentbasis einfach zu regeln
- Segmenttabelleneintrag:

P	M	Weitere Bits	Länge	Basisadr.
---	---	--------------	-------	-----------

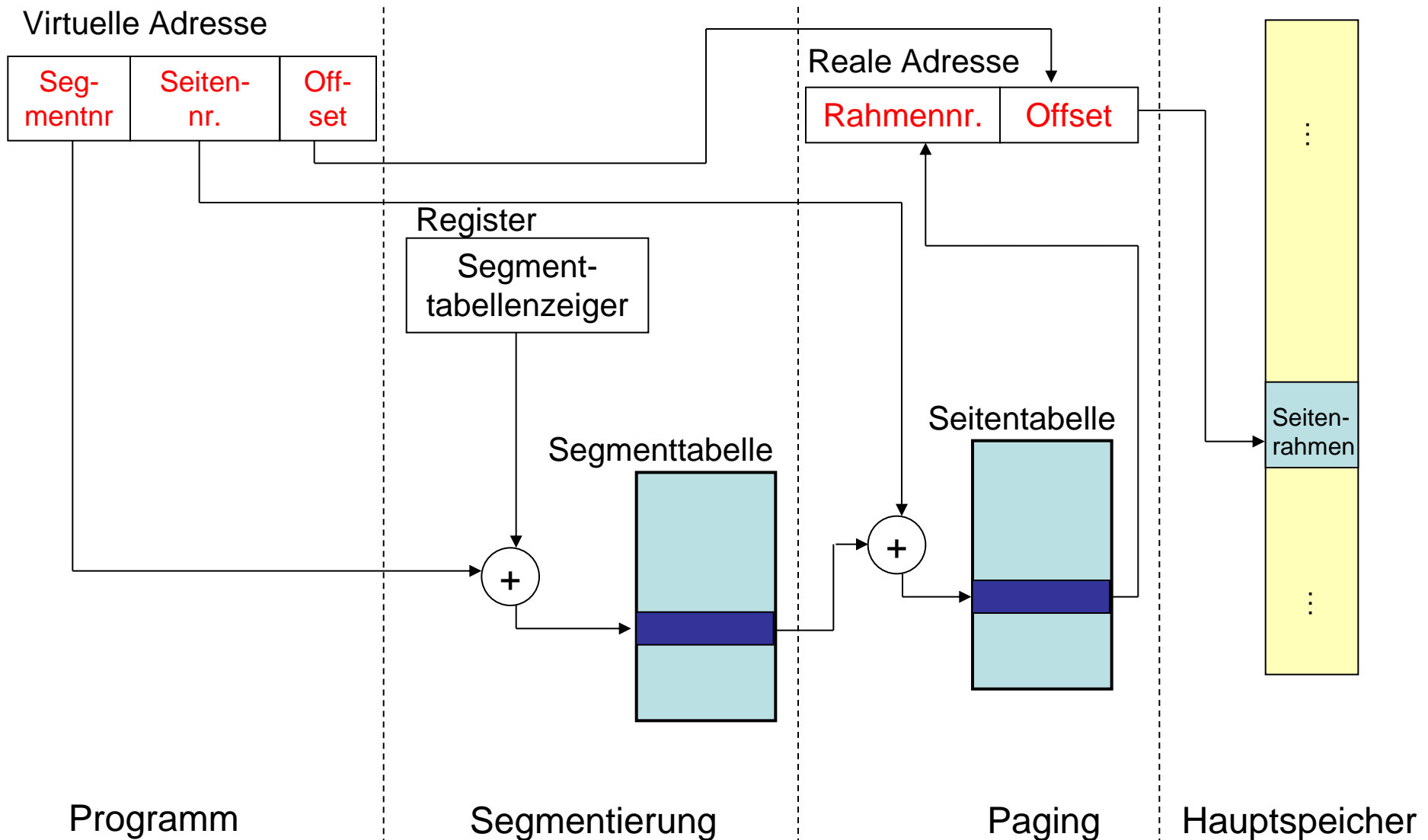
Segmentierung (3)

- Adressumrechnung komplexer: Virtuelle Adresse besteht aus $\langle \text{Segmentnummer}, \text{Offset} \rangle$, reale Adresse: **Basisadresse+Offset**
- Wenn Prozesse wachsen, Anpassung an dynamischen Speicherbedarf
- Segmentvergrößerung:
 - Allokieren von nachfolgendem Speicher oder
 - Verschiebung in einen größeren freien Bereich (kann sehr aufwändig sein)

Segmentierung (4)

- Um große Segmente effizient zu verwalten:
Kombination von Segmentierung und Paging
- Prozesse aufgeteilt in Segmente, **pro Prozess eine Segmenttabelle**
- Segmente aufgeteilt in Seiten fester Größe, **pro Segment eine Seitentabelle**
- Aufbau einer Adresse:
 - Virtuelle Adresse:
 $\langle \text{Segmentnummer}, \text{Offset}_{\text{Segmentierung}} \rangle$
 - $\text{Offset}_{\text{Segmentierung}}$ beim Paging interpretiert als:
 $\langle \text{Seitennummer}, \text{Offset}_{\text{Paging}} \rangle$

Segmentierung und Paging kombiniert: Adressumsetzung



Aspekte der Speicherverwaltung

Wichtige Entscheidungen:

- Wann werden Seiten in den Hauptspeicher geladen?
- Welche Seiten werden ausgelagert?
- Wie viele Rahmen darf ein Prozess belegen?

Abrufstrategie

- **Paging on Demand:**
 - Lade Seite erst in den Hauptspeicher, wenn sie benötigt wird
 - Anfangs: Viele Seitenfehler, danach Verhalten entsprechend Lokalitätsprinzip
- **Prepaging:**
 - Neben einer angeforderten Seite werden noch weitere in der Umgebung geladen
 - Nicht besonders effizient, wenn die meisten Seiten nicht benötigt werden
 - In Praxis nicht eingesetzt

Austauschstrategie (1)

- Auswahl einer Seite, die ausgelagert werden soll, wenn der Speicher voll ist
- Nach Möglichkeit: Seite, auf die in nächster Zeit wahrscheinlich nicht zugegriffen wird
- Vorhersage anhand der vergangenen Speicherreferenzen

Austauschstrategie (2)

- **LRU** (Least Recently Used): Lagere Seite aus, auf die am längsten nicht zugegriffen wurde
- **FIFO** (First In First Out): Lagere Seite aus, die zuerst eingelagert wurde
- **Clock-Algorithmus:**
 - Rahmen/Seiten haben Referenced Bit
 - Setze nach jedem Seitenzugriff auf 1
 - Einlagern einer neuen Seite:
 - Suche im Uhrzeigersinn Seite mit Referenced Bit 0
 - Setze Referenced Bit auf 0 bei überquerten Seiten
 - Geringer Overhead, gute Leistung

Größe des Resident Set (1)

- Entscheidung, wie viel Hauptspeicher einem Prozess beim Laden zur Verfügung gestellt wird
- Je kleiner der Teil ist, der geladen wird, desto mehr Prozesse können sich im Hauptspeicher befinden und
- Desto größer ist aber die Seitenfehlerrate

Größe des Resident Set (2)

- **Feste Zuteilung:**
 - Feste Zahl von Rahmen im Hauptspeicher (abhängig von Art des Prozesses)
 - Bei Seitenfehler: Eine der Seiten dieses Prozesses muss gegen die benötigte Seite ausgetauscht werden
- **Variable Zuteilung:**
 - Anzahl der zugewiesenen Seitenrahmen kann während Lebensdauer variieren
 - Bei ständig hohen Seitenfehlerraten: Zuweisung von zusätzlichen Rahmen
 - Bei niedrigen Seitenfehlerraten: Versuche, Anzahl der zugewiesenen Rahmen zu reduzieren

Cleaning Strategie

- **Demand Cleaning:**
 - Seite wird nur dann in Sekundärspeicher übertragen, wenn sie ersetzt wird
 - Bei Seitenfehlern müssen zwei Seitenübertragungen stattfinden
- **Precleaning:**
 - Seiten werden in den Hauptspeicher geladen, bevor ihre Rahmen benötigt werden
 - Kann ineffizient sein

Multiprogramming-Grad

- Entscheidung, wie viele Prozesse sich im Hauptspeicher befinden sollen
- Zu geringe Anzahl: Häufig alle blockiert, Ein- und Auslagern ganzer Prozesse notwendig
- Zu große Anzahl: Größe des Resident Set nicht mehr ausreichend, häufig Seitenfehler
- Wenn geringe Anzahl Seitenfehler, kann Multiprogramming-Grad erhöht werden

Auslagern von Prozessen

- Reduzierung des Multiprogramming-Grads
- Mögliche Strategien:
 - Prozess mit geringster Priorität
 - Prozess, der Seitenfehler verursacht hat
 - Prozess mit kleinstem Resident Set
 - Prozess mit größtem Resident Set
 - Prozess mit größter verbleibender Ausführungszeit

Zusammenfassung (1)

- Speicherverwaltungsstrategien sind extrem wichtig für die Effizienz des Gesamtsystems
- Paging unterteilt den Speicher in viele gleich große Teile
- Betriebssysteme arbeiten mit virtuellem Speicher
- Lokalität ist die Grundvoraussetzung für das effiziente Funktionieren virtueller Speicher-konzepte

Zusammenfassung (2)

- Komplexe Hardware/Software nötig für einen einfachen Speicherzugriff
- Seitentabelleneintrag kann im TLB, Hauptspeicher oder auch auf Festplatte sein
- Seite kann sich im Cache, im Hauptspeicher, oder auf Festplatte befinden
- Bei Bedarf:
 - Nachladen und Auslagern von Seiten und Aktualisieren von Seitentabelleneinträgen
 - Auslagern kompletter Prozesse