
Betriebssysteme (BS)

09. Virtueller Speicher

<https://sys.cs.tu-dortmund.de/de/lehre/ss25/bs>

16.06.2025

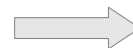
Peter Ulbrich

peter.ulbrich@tu-dortmund.de
bs-problems@ls12.cs.tu-dortmund.de
<https://sys.cs.tu-dortmund.de/de/lehre/kummerkasten>

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

Wiederholung

- 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:
 - **Logische** bzw. **virtuelle Seiten** und **physische Seitenrahmen** (*Kacheln*)
 - Ladestrategie
 - Ersetzungsstrategie



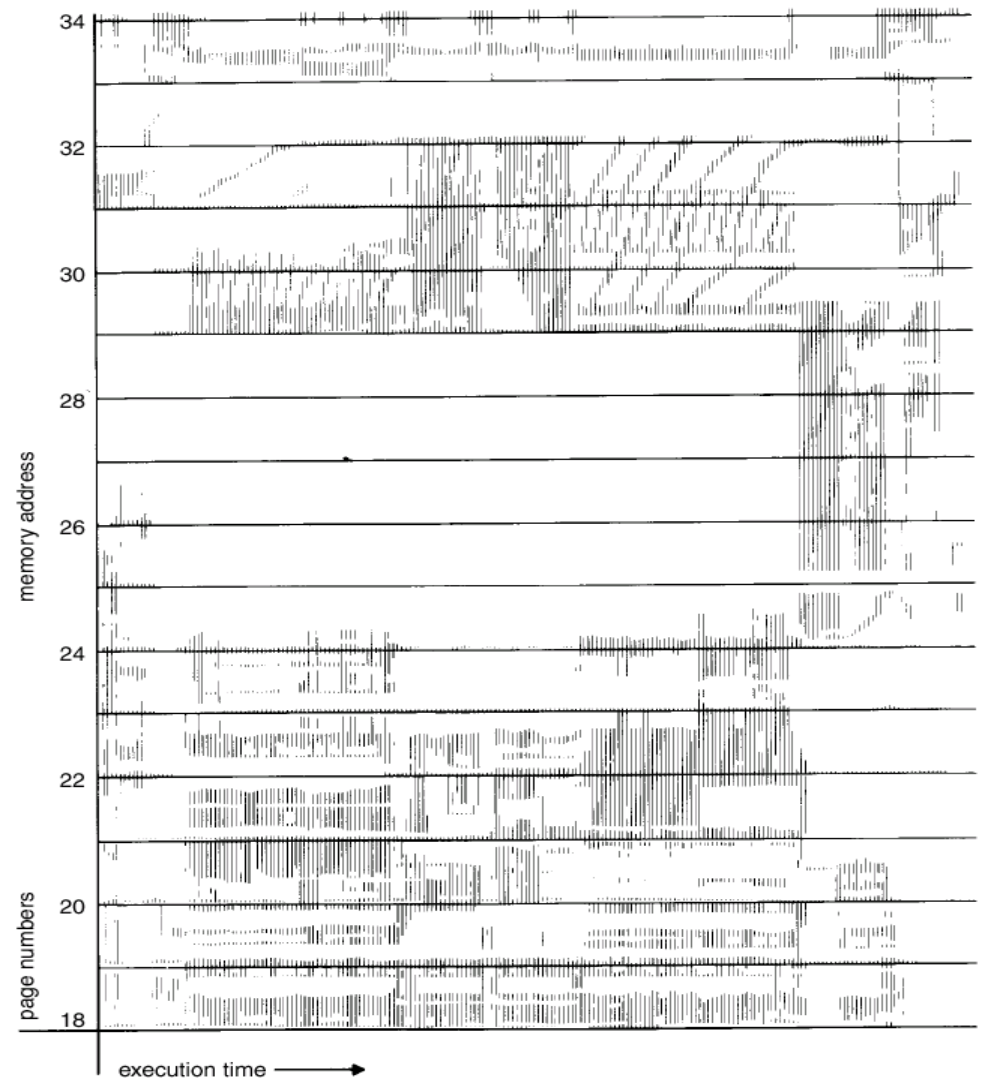
heute mehr dazu

Inhalt

- **Motivation**
- Demand Paging
- Seitenersetzung
- Seitenzuordnung
- Ladestrategie
- Zusammenfassung

Lokalität der Speicherzugriffe

- Einzelne Instruktionen benötigen nur wenige Speicherseiten.
- Auch über längere Zeiträume zeigt sich starke Lokalität.
 - Instruktionen werden z.B. eine nach der anderen ausgeführt.
- Die Lokalität kann ausgenutzt werden, wenn der Speicher nicht reicht.
 - z.B. „Overlay-Technik“



Quelle: Silberschatz, „Operating System Concepts“

Die Idee des „Virtuellen Speichers“

- Entkoppelung des Speicherbedarfs vom verfügbaren Hauptspeicher
 - Prozesse benötigen nicht alle Speicherstellen gleich häufig:
 - bestimmte Befehle werden selten oder gar nicht benutzt (z.B. Fehlerbehandlungen)
 - bestimmte Datenstrukturen werden nicht voll belegt
 - Prozesse benötigen evtl. mehr Speicher als Hauptspeicher vorhanden
- Idee:
 - **Vortäuschen** eines größeren **Arbeitsspeichers**
 - **Einblenden** aktuell benötigter Speicherbereiche
 - **Auslagern** nicht benötigter Bereiche
 - Abfangen von Zugriffen auf nicht eingeblendete Bereiche, **einlagern** der benötigten Bereiche auf Anforderung

Inhalt

- Motivation
- **Demand Paging**
- Seitenersetzung
- Seitenzuordnung
- Ladestrategie
- Zusammenfassung

Inhalt

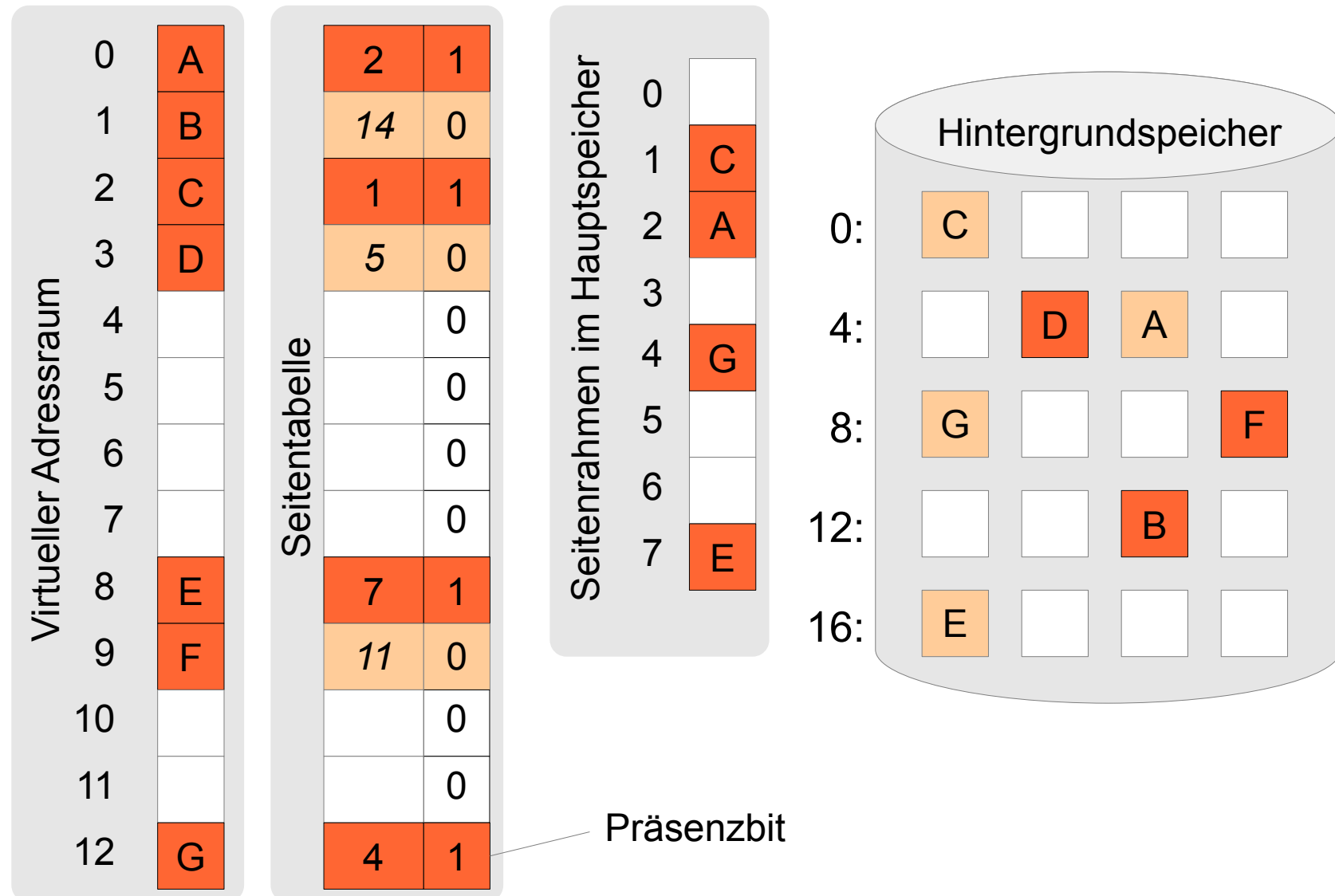
- Motivation
- **Demand Paging**
- Seitenersetzung
- Seitenzuordnung
- Ladestrategie
- Zusammenfassung

Tanenbaum
3: Speicherverwaltung

Silberschatz
9: Virtual Memory

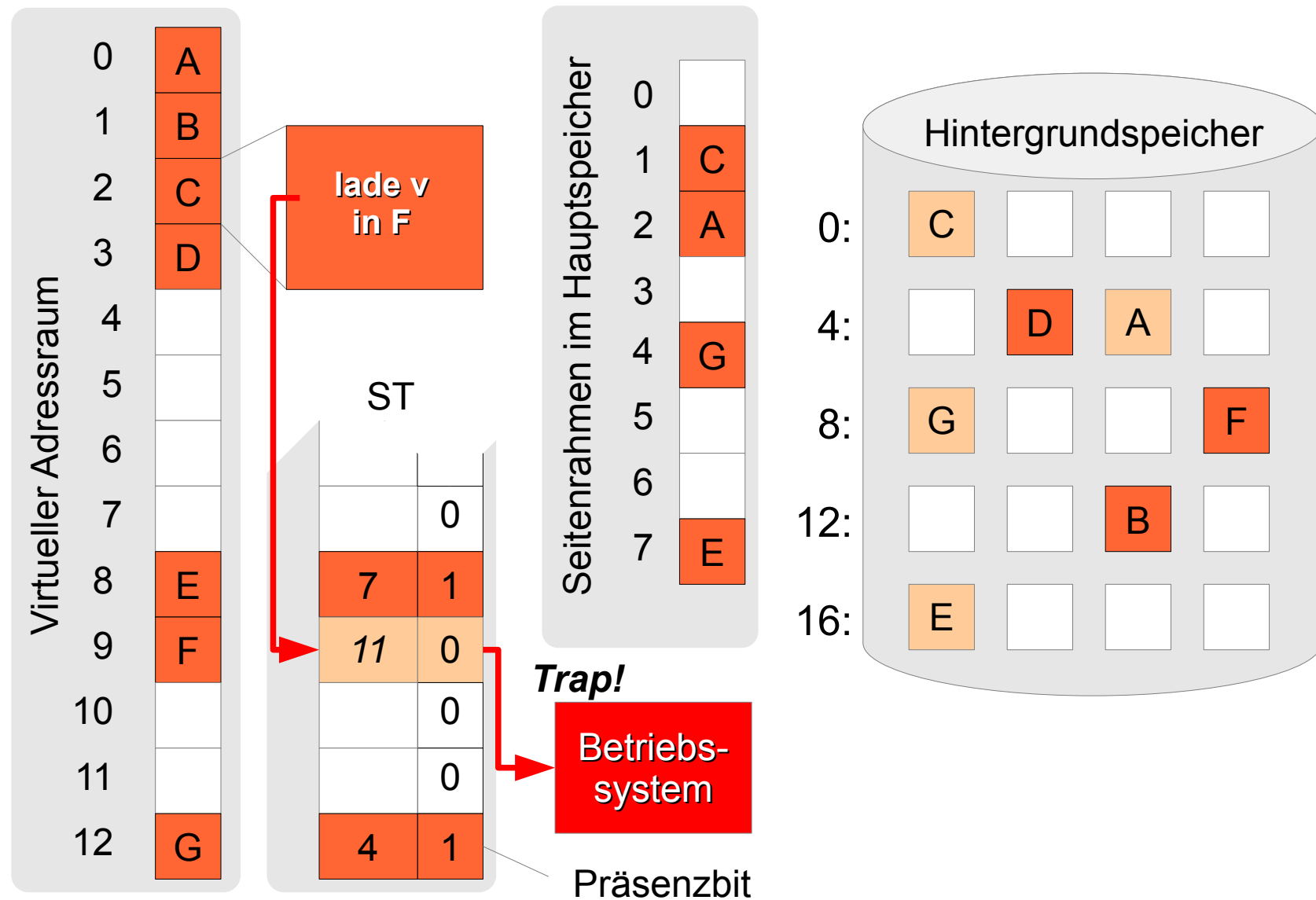
Demand Paging (Seitenumlagerung)

- Bereitstellung von Seiten auf Anforderung



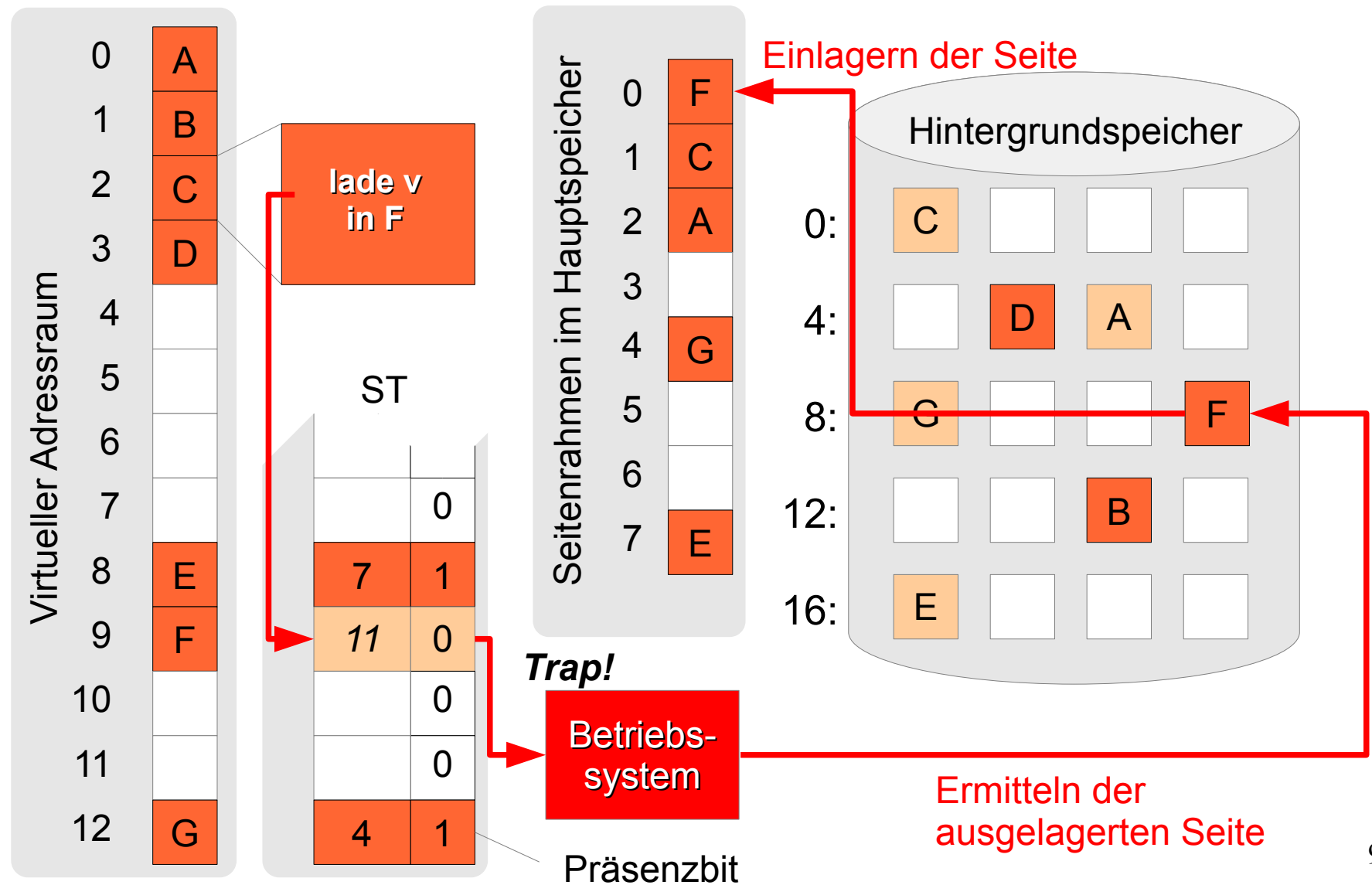
Demand Paging (Seitenfehler)

- Reaktion auf Seitenfehler (*page fault*)



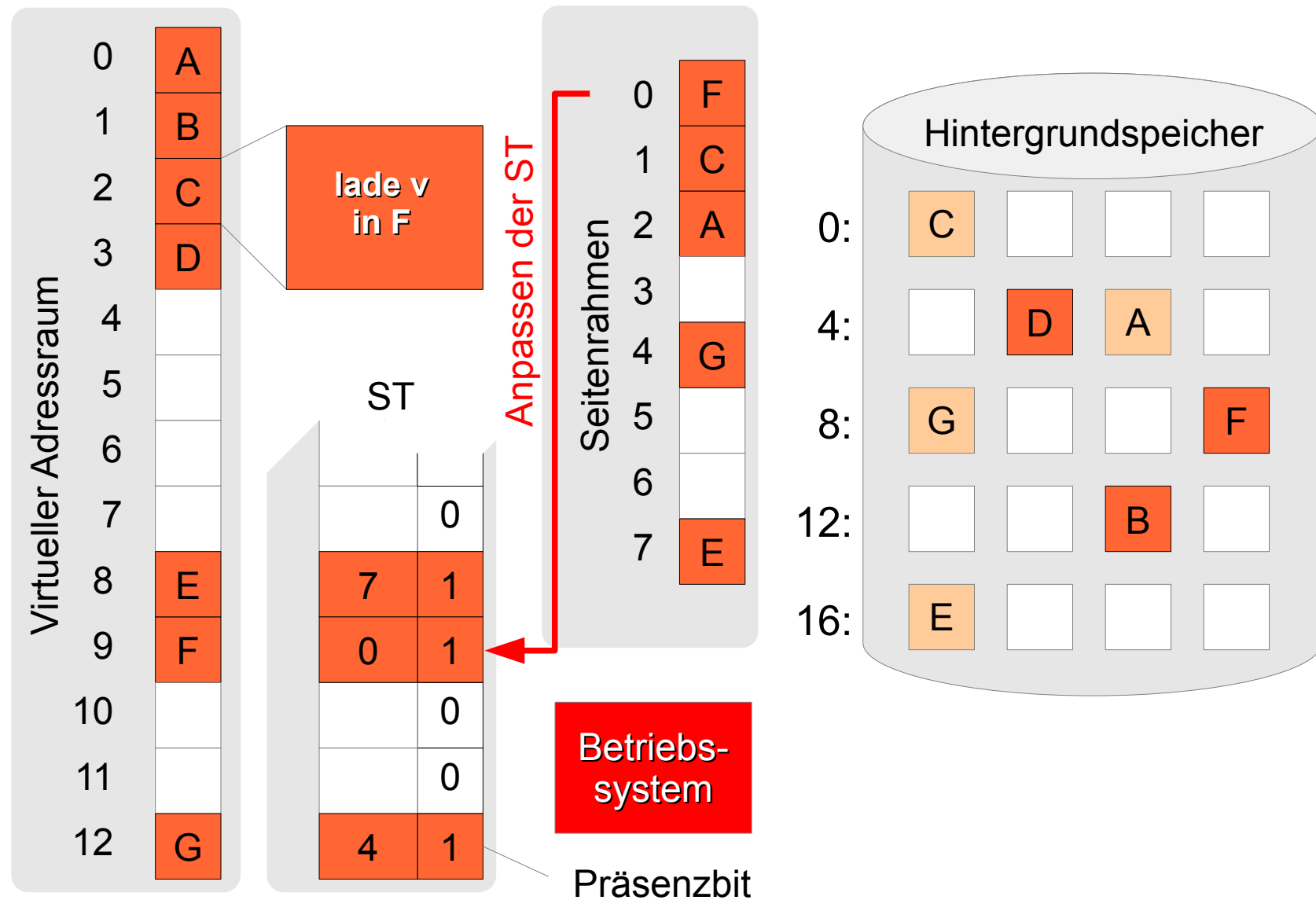
Demand Paging (Seitenfehler)

- Reaktion auf Seitenfehler (*page fault*)



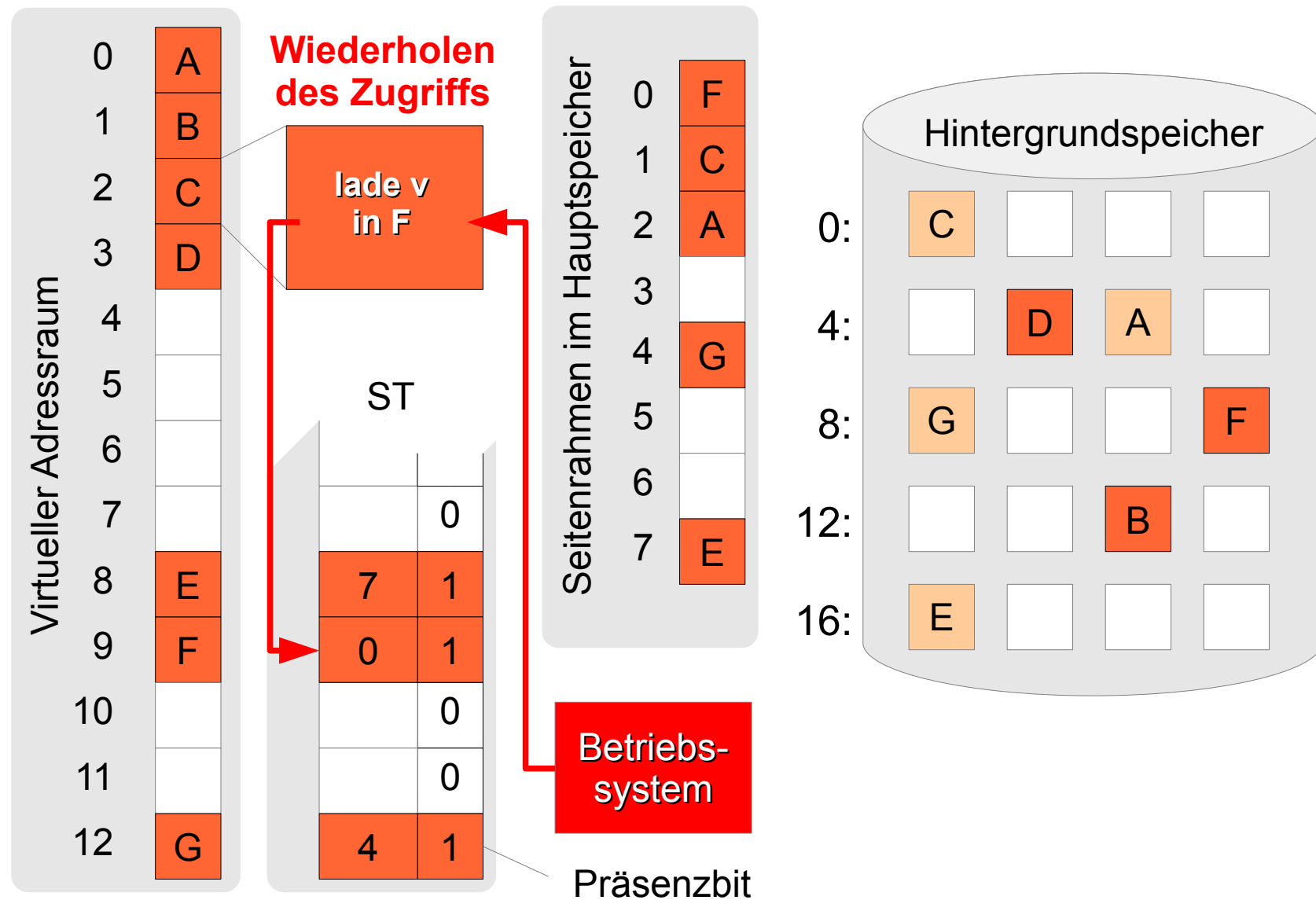
Demand Paging (Seitenfehler)

- Reaktion auf Seitenfehler (*page fault*)



Demand Paging (Seitenfehler)

- Reaktion auf Seitenfehler (*page fault*)



Diskussion: Kosten der Seitenumlagerung

- Performanz von Demand Paging
 - **ohne Seitenfehler:**
 - Effektive Zugriffszeit zwischen 10 und 200 Nanosekunden

Diskussion: Kosten der Seitenumlagerung

■ Performanz von Demand Paging

– ohne Seitenfehler:

- Effektive Zugriffszeit zwischen 10 und 200 Nanosekunden

– mit Seitenfehler:

- p sei Wahrscheinlichkeit für Seitenfehler
- Annahme:
Zeit zum Einlagern einer Seite vom Hintergrundspeicher entspricht 25 Millisekunden
(8 ms Latenz, 15 ms Positionierzeit, 1 ms Übertragungszeit)
- Annahme: normale Zugriffszeit 100 ns
- Effektive Zugriffszeit:
 $(1 - p) \cdot 100 + p \cdot 25000000 = 100 + 24999900 \cdot p$

Diskussion: Kosten der Seitenumlagerung

■ Performanz von Demand Paging

– ohne Seitenfehler:

- Effektive Zugriffszeit zwischen 10 und 200 Nanosekunden

– mit Seitenfehler:

- p sei Wahrscheinlichkeit für Seitenfehler
- Annahme:
Zeit zum Einlagern einer Seite vom Hintergrundspeicher entspricht 25 Millisekunden
(8 ms Latenz, 15 ms Positionierzeit, 1 ms Übertragungszeit)
- Annahme: normale Zugriffszeit 100 ns
- Effektive Zugriffszeit:
 $(1 - p) \cdot 100 + p \cdot 25000000 = 100 + 24999900 \cdot p$

■ Seitenfehlerrate muss extrem niedrig sein

- p nahe Null

Diskussion: Weitere Eigenschaften

■ Prozesserzeugung

– *Copy-on-Write*

- auch bei *Paging* MMU leicht zu realisieren
- feinere Granularität als bei Segmentierung
- Programmausführung und Laden erfolgen verschränkt:
 - Benötigte Seiten werden erst nach und nach geladen.

■ Sperren von Seiten

- notwendig bei Ein-/Ausgabeoperationen

Diskussion: Segmentumlagerung

Prinzipiell möglich, hat aber **Nachteile** ...

- **Grobe Granularität**

- z.B. Code-, Daten-, Stack-Segment

- **Schwierigere Hauptspeicherverwaltung**

- Alle freien Seitenrahmen sind gleich gut für ausgelagerte Seiten.
Bei der Einlagerung von Segmenten ist die Speichersuche schwieriger.

- **Schwierigere Hintergrundspeicherverwaltung**

- Hintergrundspeicher ist wie Seitenrahmen in Blöcke strukturiert
(2er-Potenzen)

→ **In der Praxis hat sich Demand Paging durchgesetzt**

Inhalt

- Motivation
- Demand Paging
- **Seitenersetzung**
- Seitenzuordnung
- Ladestrategie
- Zusammenfassung

Seitenersetzung

- Was tun, wenn **kein freier Seitenrahmen** vorhanden?
 - Eine **Seite muss verdrängt** werden, um Platz für neue Seite zu schaffen!
 - Auswahl von Seiten, die nicht geändert wurden (*dirty bit* in der ST)
 - Verdrängung erfordert **Auslagerung, falls Seite geändert** wurde
- **Vorgang:**
 - Seitenfehler (*page fault*): Trap in das Betriebssystem
 - Auslagern einer Seite, falls kein freier Seitenrahmen verfügbar
 - Einlagern der benötigten Seite
 - Wiederholung des Zugriffs
- **Problem:**
 - Welche Seite soll ausgewählt werden (das „Opfer“)?

Ersetzungsstrategien

- Betrachtung von Ersetzungsstrategien und deren **Wirkung auf Referenzfolgen**
- **Referenzfolge:**
 - **Speicherzugriffsverhalten** eines Prozesses → Folge von Seitennummern
 - Ermittlung von Referenzfolgen z.B. durch Aufzeichnung der zugriffenen Adressen
 - Reduktion der aufgezeichneten Sequenz auf Seitennummern
 - Zusammenfassung von unmittelbar folgenden Zugriffen auf die gleiche Seite
 - Beispiel für eine **Referenzfolge: 1, 2, 3, 4, 1, 2, 5, 1, 2, 3, 4, 5**

First-In, First-Out

- **Älteste Seite wird ersetzt**
- **Notwendige Zustände:**
 - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jeden Seitenrahmen
- **Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)**

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1												
	Rahmen 2												
	Rahmen 3												
Kontrollzustände (Alter pro Rahmen)	Rahmen 1												
	Rahmen 2												
	Rahmen 3												

First-In, First-Out

- **Älteste Seite wird ersetzt**
- **Notwendige Zustände:**
 - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jeden Seitenrahmen
- **Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)**

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1											
	Rahmen 2												
	Rahmen 3												
Kontrollzustände (Alter pro Rahmen)	Rahmen 1												
	Rahmen 2												
	Rahmen 3												

First-In, First-Out

- **Älteste Seite wird ersetzt**
- **Notwendige Zustände:**
 - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jeden Seitenrahmen
- **Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)**

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1											
	Rahmen 2												
	Rahmen 3												
Kontrollzustände (Alter pro Rahmen)	Rahmen 1	0											
	Rahmen 2	>											
	Rahmen 3	>											

First-In, First-Out

- **Älteste Seite wird ersetzt**
- Notwendige Zustände:
 - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jeden Seitenrahmen
- Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1	1										
	Rahmen 2		2										
	Rahmen 3												
Kontrollzustände (Alter pro Rahmen)	Rahmen 1	0											
	Rahmen 2	>											
	Rahmen 3	>											

First-In, First-Out

- **Älteste Seite wird ersetzt**
- **Notwendige Zustände:**
 - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jeden Seitenrahmen
- **Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)**

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1	1										
	Rahmen 2		2										
	Rahmen 3												
Kontrollzustände (Alter pro Rahmen)	Rahmen 1	0	1										
	Rahmen 2	>	0										
	Rahmen 3	>	>										

First-In, First-Out

- **Älteste Seite wird ersetzt**
- **Notwendige Zustände:**
 - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jeden Seitenrahmen
- **Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)**

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1	1	1									
	Rahmen 2		2	2									
	Rahmen 3			3									
Kontrollzustände (Alter pro Rahmen)	Rahmen 1	0	1	2									
	Rahmen 2	>	0	1									
	Rahmen 3	>	>	0									

First-In, First-Out

- **Älteste Seite wird ersetzt**
- **Notwendige Zustände:**
 - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jeden Seitenrahmen
- **Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)**

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1	1	1	4								
	Rahmen 2		2	2	2								
	Rahmen 3			3	3								
Kontrollzustände (Alter pro Rahmen)	Rahmen 1	0	1	2	0								
	Rahmen 2	>	0	1	2								
	Rahmen 3	>	>	0	1								

First-In, First-Out

- **Älteste Seite wird ersetzt**
- **Notwendige Zustände:**
 - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jeden Seitenrahmen
- **Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)**

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1	1	1	4	4							
	Rahmen 2		2	2	2	1							
	Rahmen 3			3	3	3							
Kontrollzustände (Alter pro Rahmen)	Rahmen 1	0	1	2	0	1							
	Rahmen 2	>	0	1	2	0							
	Rahmen 3	>	>	0	1	2							

First-In, First-Out

- **Älteste Seite wird ersetzt**
- **Notwendige Zustände:**
 - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jeden Seitenrahmen
- **Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)**

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1	1	1	4	4	4						
	Rahmen 2		2	2	2	1	1						
	Rahmen 3			3	3	3	2						
Kontrollzustände (Alter pro Rahmen)	Rahmen 1	0	1	2	0	1	2						
	Rahmen 2	>	0	1	2	0	1						
	Rahmen 3	>	>	0	1	2	0						

First-In, First-Out

- **Älteste Seite wird ersetzt**
- **Notwendige Zustände:**
 - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jeden Seitenrahmen
- **Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)**

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1	1	1	4	4	4	5					
	Rahmen 2		2	2	2	1	1	1					
	Rahmen 3			3	3	3	2	2					
Kontrollzustände (Alter pro Rahmen)	Rahmen 1	0	1	2	0	1	2	0					
	Rahmen 2	>	0	1	2	0	1	2					
	Rahmen 3	>	>	0	1	2	0	1					

First-In, First-Out

- **Älteste Seite wird ersetzt**
- **Notwendige Zustände:**
 - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jeden Seitenrahmen
- **Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)**

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1	1	1	4	4	4	5	5	5	5	5	5
	Rahmen 2		2	2	2	1	1	1	1	1	3	3	3
	Rahmen 3			3	3	3	2	2	2	2	2	4	4
Kontrollzustände (Alter pro Rahmen)	Rahmen 1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	3	4	5
	Rahmen 2	>	0	1	2	0	1	2	3	4	0	1	2
	Rahmen 3	>	>	0	1	2	0	1	2	3	4	0	1

First-In, First-Out

- **Älteste Seite wird ersetzt**
- Notwendige Zustände:
 - Alter bzw. Einlagerungszeitpunkt für jeden Seitenrahmen
- Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1	1	1	4	4	4	5	5	5	5	5	5
	Rahmen 2		2	2	2	1	1	1	1	1	3	3	3
	Rahmen 3			3	3	3	2	2	2	2	2	4	4
Kontrollzustände (Alter pro Rahmen)	Rahmen 1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	3	4	5
	Rahmen 2	>	0	1	2	0	1	2	3	4	0	1	2
	Rahmen 3	>	>	0	1	2	0	1	2	3	4	0	1

First-In, First-Out

- Größerer Hauptspeicher mit 4 Seitenrahmen (10 Einlagerungen!)
- FIFO-Anomalie (Béládys Anomalie, 1969)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	5	4	4
	Rahmen 2		2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	5
	Rahmen 3			3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
	Rahmen 4				4	4	4	4	4	4	3	3	3
Kontrollzustände (Alter pro Rahmen)	Rahmen 1	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	0	1
	Rahmen 2	>	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	0
	Rahmen 3	>	>	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3
	Rahmen 4	>	>	>	0	1	2	3	4	5	0	1	2

First-In, First-Out

- Größerer Hauptspeicher mit 4 Seitenrahmen (10 Einlagerungen!)
- FIFO-Anomalie (Béládys Anomalie, 1969)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	5	4	4
	Rahmen 2		2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	5
	Rahmen 3			3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
	Rahmen 4				4	4	4	4	4	4	3	3	3
Kontrollzustände (Alter pro Rahmen)	Rahmen 1	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	0	1
	Rahmen 2	>	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	0
	Rahmen 3	>	>	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3
	Rahmen 4	>	>	>	0	1	2	3	4	5	0	1	2

Optimale Seitenersetzungsstrategie

■ Vorwärtsabstand

- Ersetze die Seite die am längsten nicht referenziert **wird**

■ Strategie OPT (oder MIN) ist optimal (bei fester Seitenrahmenzahl):

➔ Minimale Anzahl von Umlagerungen (hier 7)

- Wähle die Seite mit dem größten Vorwärtsabstand

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	4	4
	Rahmen 2		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Rahmen 3			3	4	4	4	5	5	5	5	5	5
Kontrollzustände (Vorwärtsabstand)	Rahmen 1	4	3	2	1	3	2	1	>	>	>	>	>
	Rahmen 2	>	4	3	2	1	3	2	1	>	>	>	>
	Rahmen 3	>	>	7	7	6	5	5	4	3	2	1	>

Optimale Seitenersetzungsstrategie

- Vergrößerung des Hauptspeichers (4 Seitenrahmen)

→ 6 Einlagerungen

- keine Anomalie

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	4
	Rahmen 2		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Rahmen 3			3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Rahmen 4				4	4	4	5	5	5	5	5	5
Kontrollzustände (Vorwärtsabstand)	Rahmen 1	4	3	2	1	3	2	1	>	>	>	>	>
	Rahmen 2	>	4	3	2	1	3	2	1	>	>	>	>
	Rahmen 3	>	>	7	6	5	4	3	2	1	>	>	>
	Rahmen 4	>	>	>	7	6	5	5	4	3	2	1	>

Diskussion: Optimale Seitenersetzungsstrategie

- Implementierung von OPT leider **praktisch unmöglich**
 - Referenzfolge müsste vorher bekannt sein
 - OPT ist nur zum Vergleich von Strategien brauchbar

Diskussion: Optimale Seitenersetzungsstrategie

- Implementierung von OPT leider **praktisch unmöglich**
 - Referenzfolge müsste vorher bekannt sein
 - OPT ist nur zum Vergleich von Strategien brauchbar

- ➔ Suche nach Strategien, die möglichst nahe an OPT kommen
 - z.B. **Least Recently Used (LRU)**

Least Recently Used (LRU)

■ Rückwärtsabstand

- Zeitdauer, seit dem letzten Zugriff auf die Seite

■ LRU-Strategie (10 Einlagerungen)

- Wähle den Seitenrahmen mit dem größten Rückwärtsabstand

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1	1	1	4	4	4	5	5	5	3	3	3
	Rahmen 2		2	2	2	1	1	1	1	1	1	4	4
	Rahmen 3			3	3	3	2	2	2	2	2	2	5
Kontrollzustände (Rückwärts- abstand)	Rahmen 1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2
	Rahmen 2	>	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1
	Rahmen 3	>	>	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0

Least Recently Used (LRU)

- Vergrößerung des Hauptspeichers (4 Seitenrahmen):
8 Einlagerungen

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5
	Rahmen 2		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Rahmen 3			3	3	3	3	5	5	5	5	4	4
	Rahmen 4				4	4	4	4	4	4	3	3	3
Kontrollzustände (Rückwärts- abstand)	Rahmen 1	0	1	2	3	0	1	2	0	1	2	3	0
	Rahmen 2	>	0	1	2	3	0	1	2	0	1	2	3
	Rahmen 3	>	>	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1
	Rahmen 4	>	>	>	0	1	2	3	4	5	0	1	2

Diskussion: Least Recently Used (LRU)

■ Keine Anomalie

- Allgemein gilt: Es gibt eine Klasse von Algorithmen (*Stack-Algorithmen*), bei denen keine Anomalie auftritt:
 - Bei Stack-Algorithmen ist bei k Rahmen zu jedem Zeitpunkt eine Teilmenge der Seiten eingelagert, die bei $k+1$ Rahmen zum gleichen Zeitpunkt eingelagert wären!
 - **LRU:** Es sind immer die letzten k benutzten Seiten eingelagert.
 - **OPT:** Es sind die k bereits benutzten Seiten eingelagert, die als nächstes zugegriffen werden.

Diskussion: Least Recently Used (LRU)

■ Keine Anomalie

- Allgemein gilt: Es gibt eine Klasse von Algorithmen (*Stack-Algorithmen*), bei denen keine Anomalie auftritt:
 - Bei Stack-Algorithmen ist bei k Rahmen zu jedem Zeitpunkt eine Teilmenge der Seiten eingelagert, die bei $k+1$ Rahmen zum gleichen Zeitpunkt eingelagert wären!
 - **LRU**: Es sind immer die letzten k benutzten Seiten eingelagert.
 - **OPT**: Es sind die k bereits benutzten Seiten eingelagert, die als nächstes zugriffen werden.

■ Problem:

- Implementierung von LRU nicht ohne **Hardwareunterstützung** möglich.
- Es muss jeder Speicherzugriff berücksichtigt werden.

Least Recently Used – Hardwareunterstützung

■ Naive Idee: Hardwareunterstützung durch Zähler

- CPU besitzt einen Zähler, der bei jedem Speicherzugriff erhöht wird (inkrementiert wird)
- bei jedem Zugriff wird der aktuelle Zählerwert in den jeweiligen Seitendeskriptor geschrieben
- Auswahl der Seite mit dem kleinsten Zählerstand (Suche!)

■ Aufwändige Implementierung:

- viele zusätzliche Speicherzugriffe
- hoher Speicherplatzbedarf
- Minimum-Suche in der Seitenfehler-Behandlung

Second Chance (Clock)

■ So wird's gemacht: **Einsatz von Referenzbits**

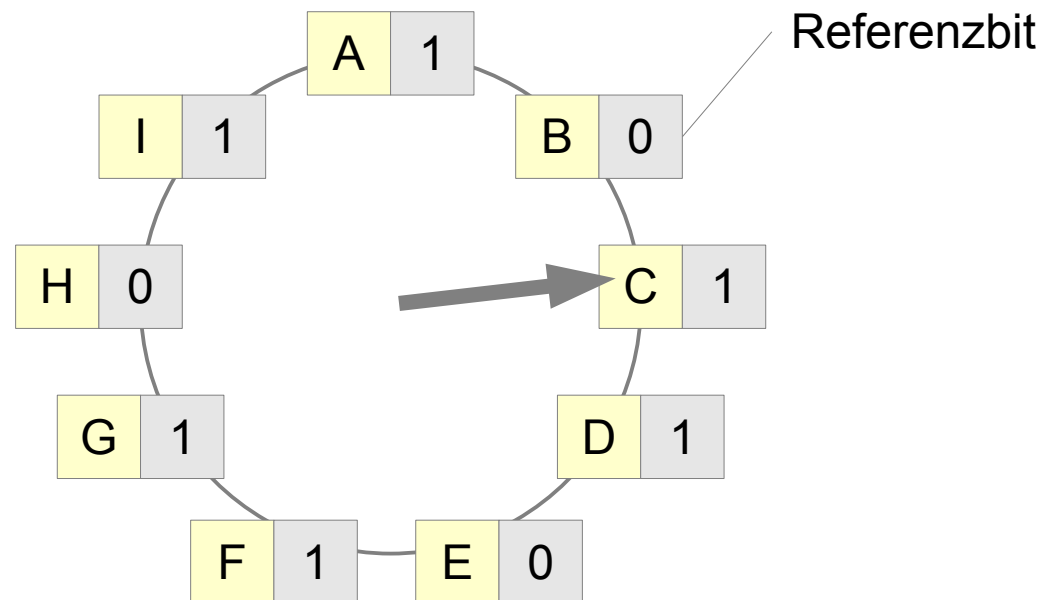
- Referenzbit im Seitendeskriptor wird automatisch durch Hardware gesetzt, wenn die Seite zugegriffen wird
 - einfacher zu implementieren
 - weniger zusätzliche Speicherzugriffe
 - moderne Prozessoren bzw. MMUs unterstützen Referenzbits (z.B. x86: access bit)

■ Ziel: Annäherung von LRU

- bei einer frisch eingelagerten Seite wird das **Referenzbit** zunächst auf 1 gesetzt
- wird eine Opferseite gesucht, so werden die Seitenrahmen reihum inspiziert
 - ist das Referenzbit 1, so wird es auf 0 gesetzt (zweite Chance)
 - ist das Referenzbit 0, so wird die Seite ersetzt

Second Chance (Clock)

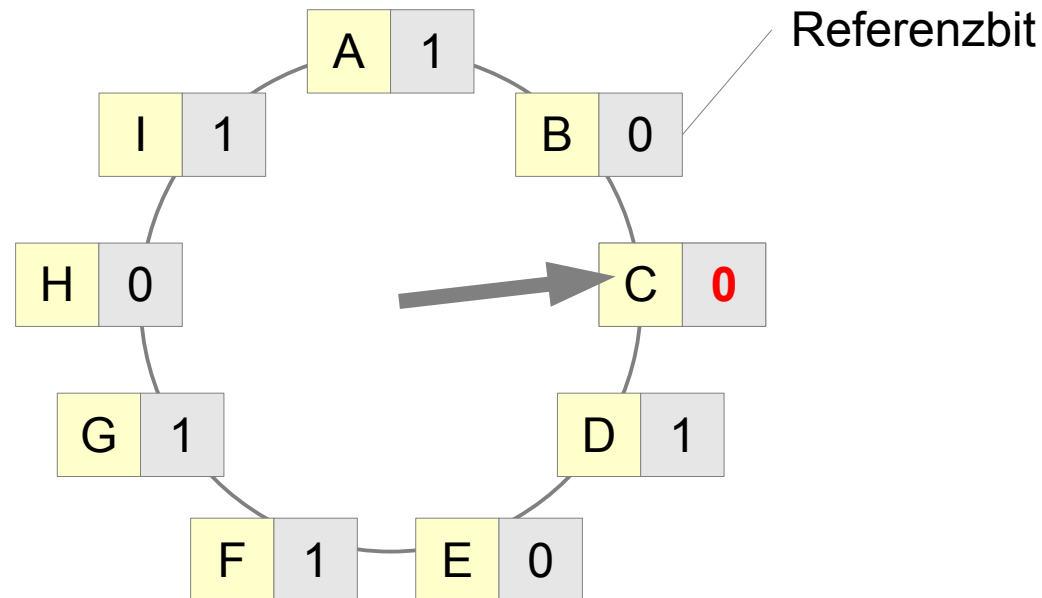
- Implementierung mit **umlaufendem Zeiger (Clock)**



- an der Zeigerposition wird Referenzbit getestet
 - falls Referenzbit 1, wird Bit gelöscht
 - falls Referenzbit gleich 0, wurde ersetzbare Seite gefunden
 - Zeiger wird weitergestellt; falls keine Seite gefunden: Wiederholung
- falls alle Referenzbits auf 1 stehen, wird *Second Chance* zu FIFO

Second Chance (Clock)

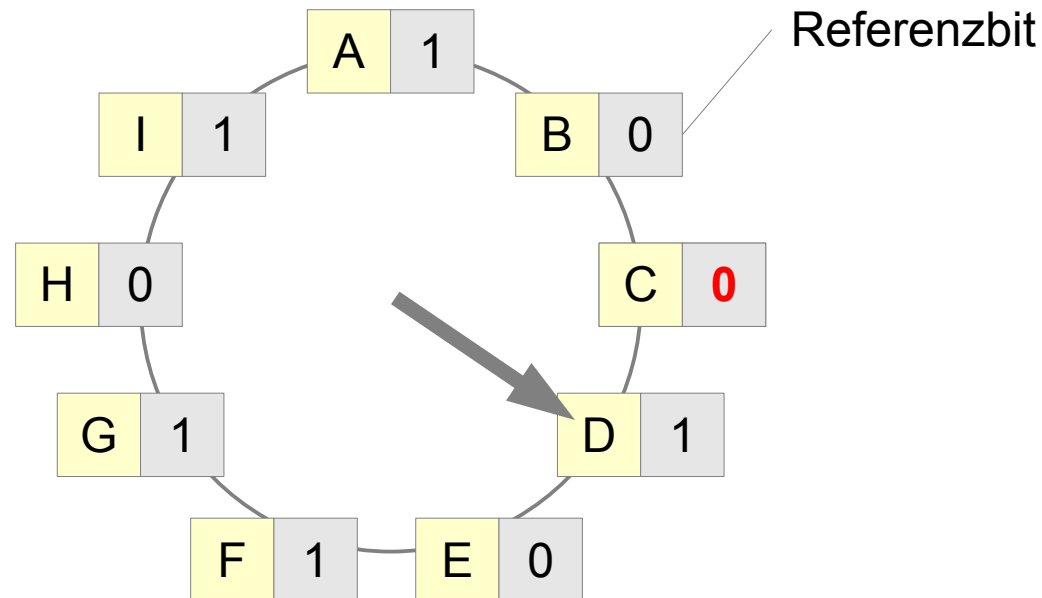
- Implementierung mit **umlaufendem Zeiger (Clock)**



- an der Zeigerposition wird Referenzbit getestet
 - falls Referenzbit 1, wird Bit gelöscht
 - falls Referenzbit gleich 0, wurde ersetzbare Seite gefunden
 - Zeiger wird weitergestellt; falls keine Seite gefunden: Wiederholung
- falls alle Referenzbits auf 1 stehen, wird *Second Chance* zu FIFO

Second Chance (Clock)

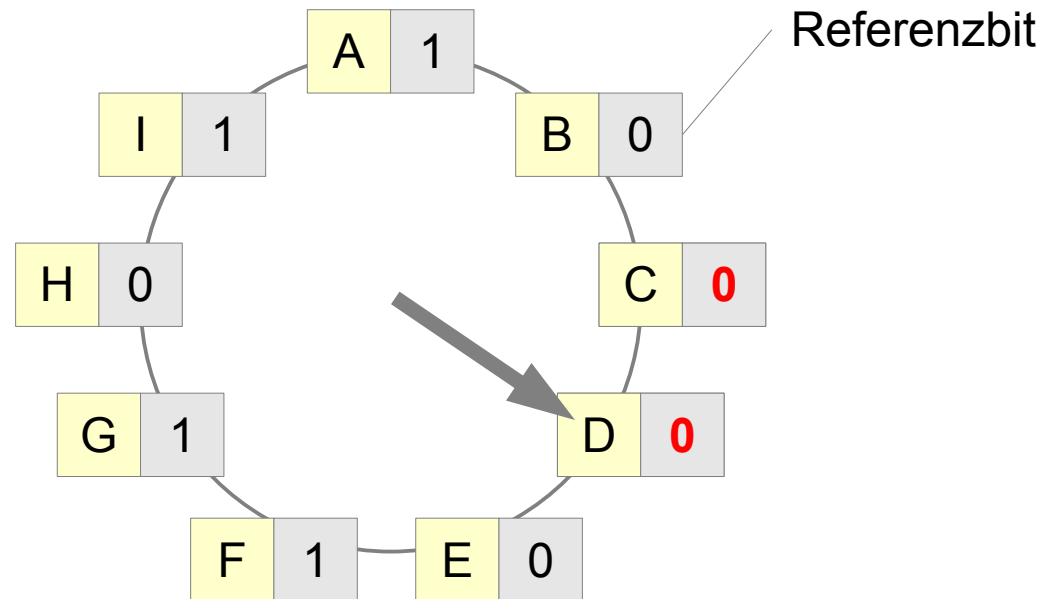
- Implementierung mit **umlaufendem Zeiger (Clock)**



- an der Zeigerposition wird Referenzbit getestet
 - falls Referenzbit 1, wird Bit gelöscht
 - falls Referenzbit gleich 0, wurde ersetzbare Seite gefunden
 - Zeiger wird weitergestellt; falls keine Seite gefunden: Wiederholung
- falls alle Referenzbits auf 1 stehen, wird *Second Chance* zu FIFO

Second Chance (Clock)

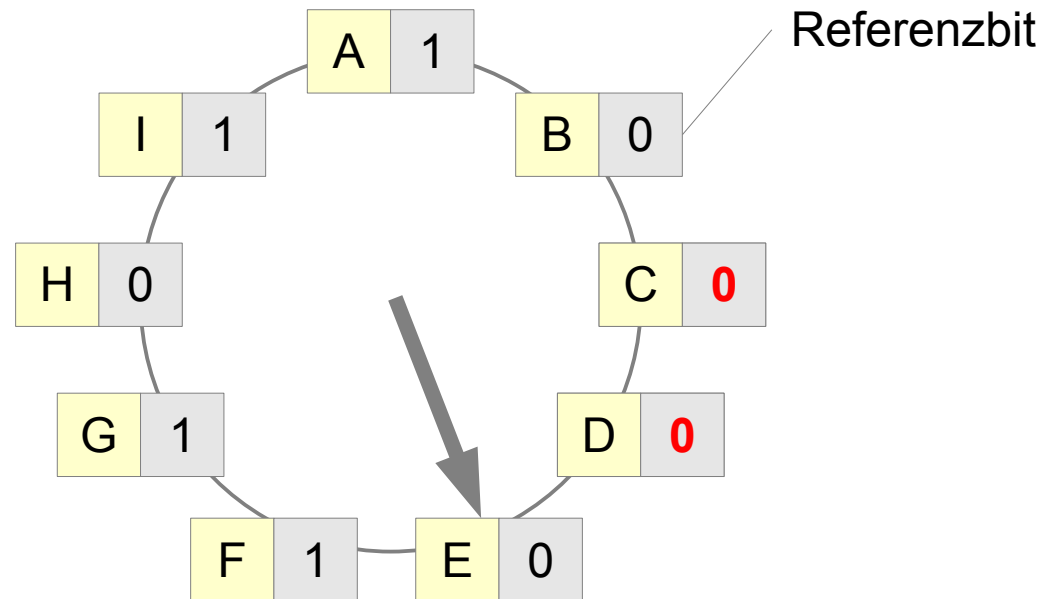
- Implementierung mit **umlaufendem Zeiger (Clock)**



- an der Zeigerposition wird Referenzbit getestet
 - falls Referenzbit 1, wird Bit gelöscht
 - falls Referenzbit gleich 0, wurde ersetzbare Seite gefunden
 - Zeiger wird weitergestellt; falls keine Seite gefunden: Wiederholung
- falls alle Referenzbits auf 1 stehen, wird *Second Chance* zu FIFO

Second Chance (Clock)

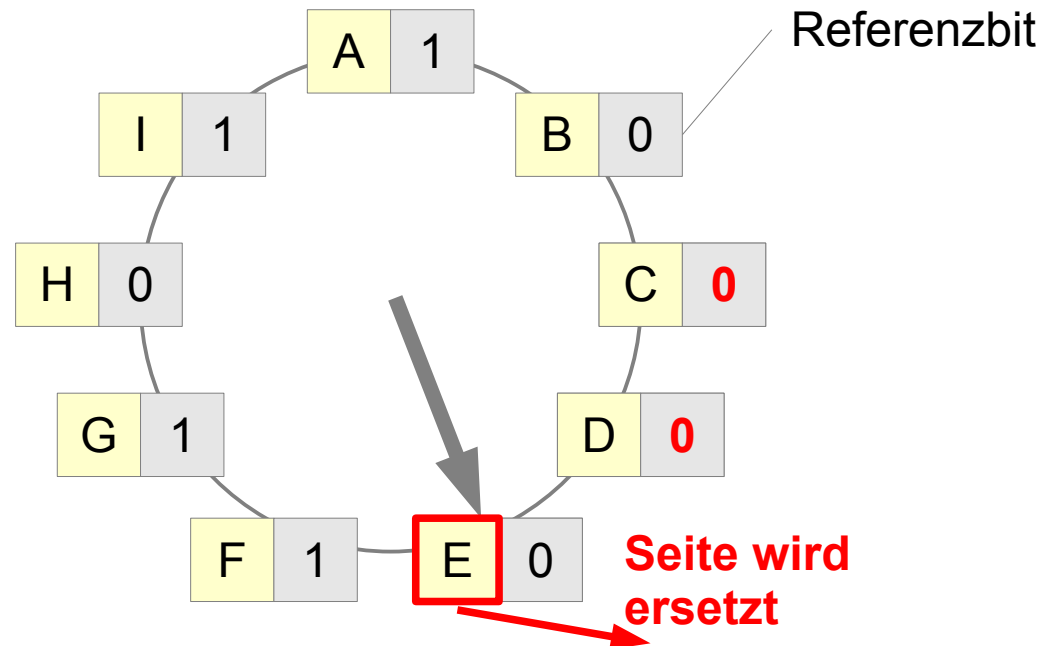
- Implementierung mit **umlaufendem Zeiger (Clock)**



- an der Zeigerposition wird Referenzbit getestet
 - falls Referenzbit 1, wird Bit gelöscht
 - falls Referenzbit gleich 0, wurde ersetzbare Seite gefunden
 - Zeiger wird weitergestellt; falls keine Seite gefunden: Wiederholung
- falls alle Referenzbits auf 1 stehen, wird *Second Chance* zu FIFO

Second Chance (Clock)

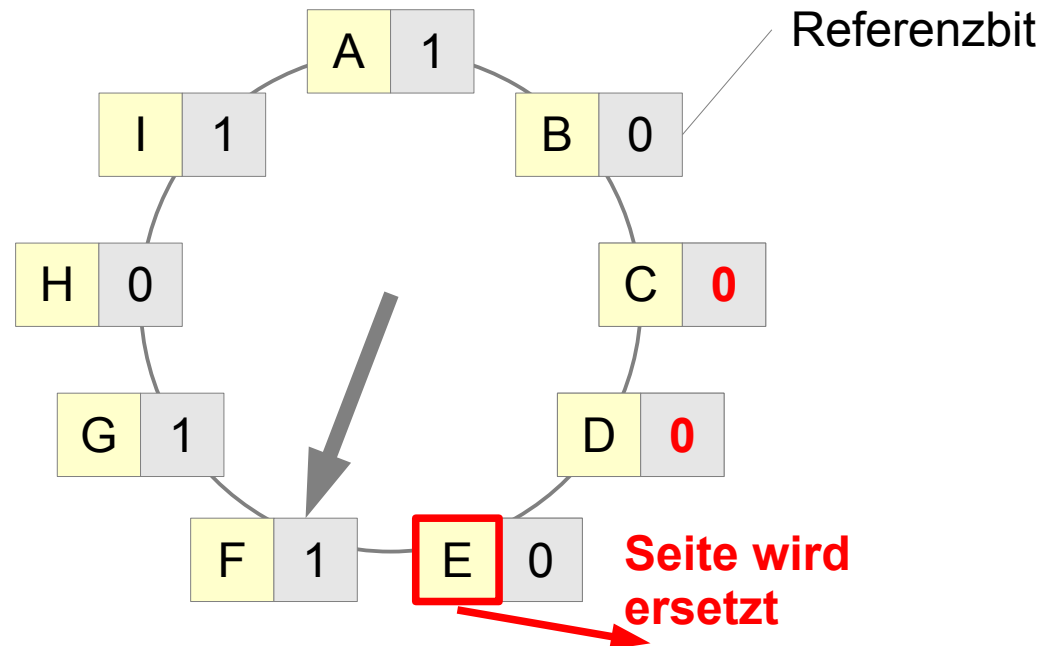
- Implementierung mit **umlaufendem Zeiger** (Clock)



- an der Zeigerposition wird Referenzbit getestet
 - falls Referenzbit 1, wird Bit gelöscht
 - falls Referenzbit gleich 0, wurde ersetzbare Seite gefunden
 - Zeiger wird weitergestellt; falls keine Seite gefunden: Wiederholung
- falls alle Referenzbits auf 1 stehen, wird *Second Chance* zu FIFO

Second Chance (Clock)

- Implementierung mit **umlaufendem Zeiger (Clock)**



- an der Zeigerposition wird Referenzbit getestet
 - falls Referenzbit 1, wird Bit gelöscht
 - falls Referenzbit gleich 0, wurde ersetzbare Seite gefunden
 - Zeiger wird weitergestellt; falls keine Seite gefunden: Wiederholung
- falls alle Referenzbits auf 1 stehen, wird *Second Chance* zu FIFO

Second Chance (Clock)

- Ablauf bei drei Seitenrahmen (9 Einlagerungen)

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1	1	1	4	4	4	5	5	5	5	5	5
	Rahmen 2		2	2	2	1	1	1	1	1	3	3	3
	Rahmen 3			3	3	3	2	2	2	2	2	4	4
Kontrollzustände (Referenzbits)	Rahmen 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
	Rahmen 2	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
	Rahmen 3	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1
	Umlaufzeiger	2	3	1	2	3	1	2	2	2	3	1	1

Second Chance (Clock)

- Vergrößerung des Hauptspeichers (4 Seitenrahmen):
10 Einlagerungen

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Hauptspeicher	Rahmen 1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	5	4	4
	Rahmen 2		2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	5
	Rahmen 3			3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
	Rahmen 4				4	4	4	4	4	4	3	3	3
Kontrollzustände (Referenzbits)	Rahmen 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Rahmen 2	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
	Rahmen 3	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
	Rahmen 4	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0
	Umlaufzeiger	2	3	4	1	1	1	2	3	4	1	2	3

Second Chance (Clock)

- Bei **Second Chance** kann es auch zur **FIFO-Anomalie** kommen:
 - Wenn alle Referenzbits gleich 1, wird nach FIFO entschieden.
- Im Normalfall kommt man aber LRU nahe.
- Erweiterung:
 - **Modifikationsbit** kann zusätzlich berücksichtigt werden (Dirty Bit)
 - Drei Klassen: (0,0), (1,0) und (1,1) mit (Referenzbit, Modifikationsbit)
 - Suche nach der niedrigsten Klasse (Einsatz im MacOS)

Diskussion: Freiseitenpuffer

Freiseitenpuffer beschleunigt die Seitenfehlerbehandlung

- Statt eine Seite zu ersetzen, wird permanent eine Menge freier Seiten gehalten
 - **Auslagerung geschieht im Voraus**
 - Effizienter: Ersetzungszeit besteht im Wesentlichen nur aus Einlagerungszeit
- Behalten der Seitenzuordnung auch nach der Auslagerung
 - Wird die Seite doch noch benutzt, bevor sie durch eine andere ersetzt wird, kann sie mit hoher Effizienz wiederverwendet werden.
 - Seite wird aus Freiseitenpuffer ausgetragen und wieder dem entsprechenden Prozess zugeordnet.

Inhalt

- Motivation
- Demand Paging
- Seitenersetzung
- **Seitenzuordnung**
- Ladestrategie
- Zusammenfassung

Zuordnung von Seitenrahmen zu Prozessen

■ **Problem: Aufteilung der Seitenrahmen auf die Prozesse**

- Wie viele eingelagerte Seiten soll man einem Prozess zugestehen?
 - **Maximum:** begrenzt durch Anzahl der (physischen) Seitenrahmen
 - **Minimum:** abhängig von der Prozessorarchitektur
 - Mindestens die Anzahl von Seiten nötig, die theoretisch bei einem Maschinenbefehl benötigt werden
(z.B. zwei Seiten für den Befehl, vier Seiten für die adressierten Daten)

■ **Gleiche Zuordnung**

- Anzahl der Prozesse bestimmt die Menge, die ein Prozess bekommt

■ **Größenabhängige Zuordnung**

- Größe des Programms fließt in die zugeteilte Menge der Seitenrahmen ein

Zuordnung von Seitenrahmen zu Prozessen

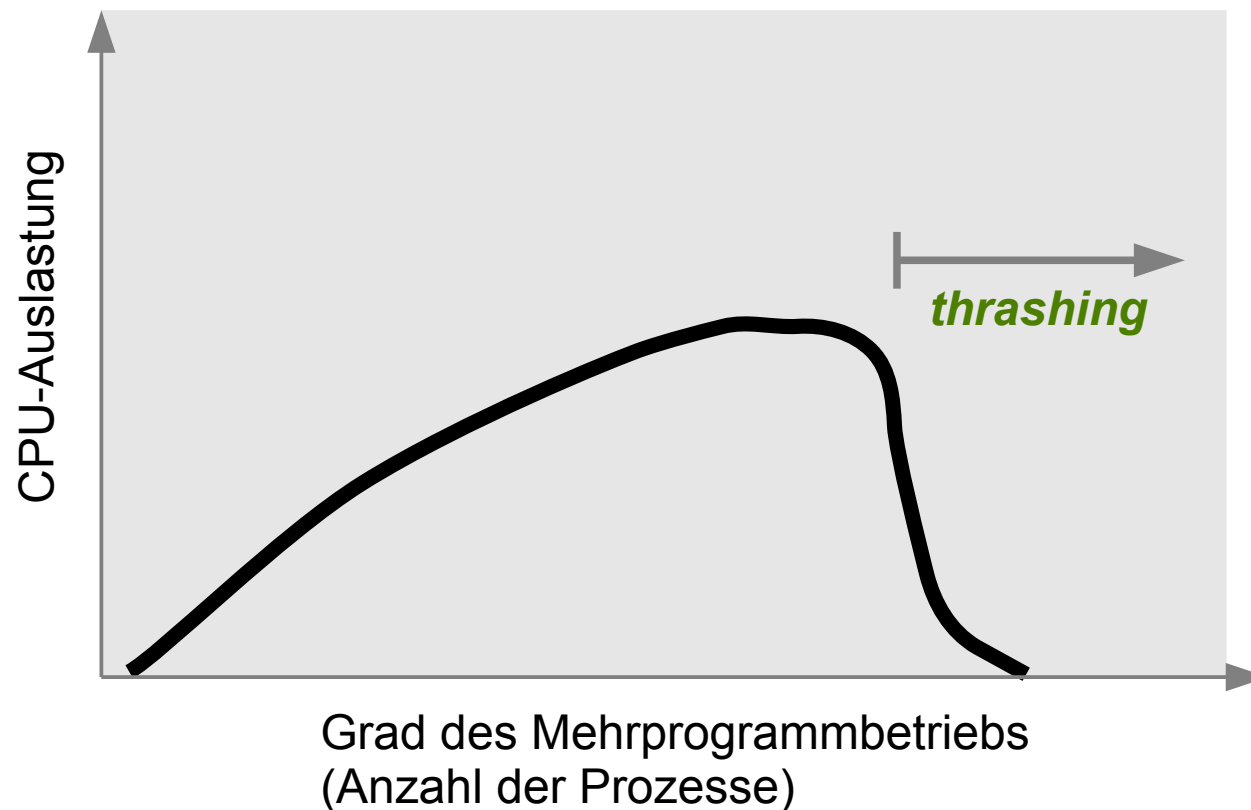
- **Globale und lokale Anforderung von Seiten**

- **Lokal:** Prozess ersetzt nur immer seine eigenen Seiten
 - Seitenfehler-Verhalten liegt nur in der Verantwortung des Prozesses
 - Keine Interferenz zwischen Prozessen
 - Auslagerung unter Umständen unnötig (global ungenutzte Seiten)

- **Global:** Prozess ersetzt auch Seiten anderer Prozesse
 - Ungenutzte Seitenrahmen anderer Prozesse können verwendet werden
 - Interferenz zwischen Prozessen (Seitenfehler-Verhalten)

Seitenflattern (*Thrashing*)

- Ausgelagerte Seite wird gleich wieder angesprochen:
 - Prozess verbringt mehr Zeit mit dem Warten auf das Beheben von Seitenfehlern als mit der eigentlichen Ausführung.



Seitenflattern (*Thrashing*)

■ Ursachen:

- Prozess ist nahe am Seitenminimum
- Zu viele Prozesse gleichzeitig im System
- Schlechte Ersetzungsstrategie

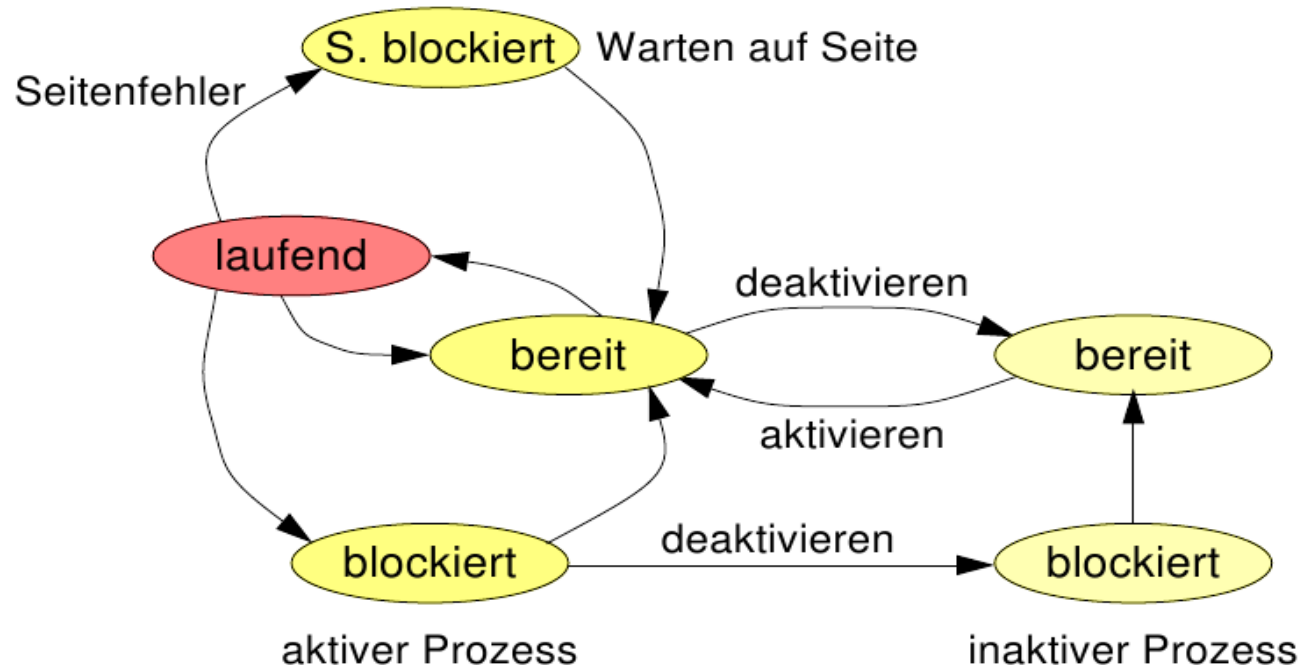
→ **Lokale Seitenanforderung** behebt *Thrashing* zwischen Prozessen

→ Zuteilung einer genügend großen Zahl von Rahmen behebt Prozess-lokales *Thrashing*

- **Begrenzung der Prozessanzahl**

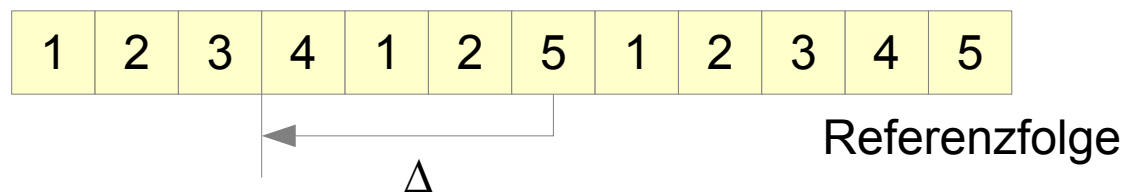
Lösung 1: Auslagerung von Prozessen

- inaktiver Prozess benötigt keine Seitenrahmen
 - Seitenrahmen teilen sich auf weniger Prozesse auf
 - Verbindung mit der Ablaufplanung (*Scheduling*) nötig
 - Verhindern von Aushungerung
 - Erzielen kurzer Reaktionszeiten



Lösung 2: Arbeitsmengenmodell

- Seitenmenge, die ein Prozess wirklich braucht (**Working Set**)
 - Kann nur angenähert werden, da üblicherweise nicht vorhersehbar
- Annäherung durch Betrachten der letzten Δ Seiten, die angesprochen wurden
 - geeignete Wahl von Δ
 - **zu groß**: Überlappung von lokalen Zugriffsmustern
 - **zu klein**: Arbeitsmenge enthält nicht alle nötigen Seiten



- **Hinweis**: $\Delta > \text{Arbeitsmenge}$, da Seiten in der Regel mehrfach hintereinander angesprochen werden

Arbeitsmengenmodell

■ Beispiel: Arbeitsmengen bei verschiedenen Δ

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
$\Delta=3$	Seite 1	X	X	X		X	X	X	X	X	X		
	Seite 2		X	X	X		X	X	X	X	X	X	
	Seite 3			X	X	X					X	X	X
	Seite 4				X	X	X					X	X
	Seite 5							X	X	X			X
$\Delta=4$	Seite 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Seite 2		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Seite 3			X	X	X	X				X	X	X
	Seite 4				X	X	X	X				X	X
	Seite 5							X	X	X	X		X

Arbeitsmengenmodell

■ Beispiel: Arbeitsmengen bei verschiedenen Δ

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
$\Delta=3$	Seite 1	X	X	X		X	X	X	X	X	X		
	Seite 2		X	X	X		X	X	X	X	X	X	
	Seite 3			X	X	X					X	X	X
	Seite 4				X	X	X					X	X
	Seite 5							X	X	X			X
$\Delta=4$	Seite 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Seite 2		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Seite 3			X	X	X	X				X	X	X
	Seite 4				X	X	X	X				X	X
	Seite 5							X	X	X	X		X

Arbeitsmengenmodell

■ Beispiel: Arbeitsmengen bei verschiedenen Δ

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
$\Delta=3$	Seite 1	X	X	X		X	X	X	X	X	X		
	Seite 2		X	X	X		X	X	X	X	X	X	
	Seite 3			X	X	X					X	X	X
	Seite 4				X	X	X					X	X
	Seite 5							X	X	X			X
$\Delta=4$	Seite 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Seite 2		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Seite 3			X	X	X	X				X	X	X
	Seite 4				X	X	X	X				X	X
	Seite 5							X	X	X	X		X

Arbeitsmengenmodell

■ Beispiel: Arbeitsmengen bei verschiedenen Δ

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
$\Delta=3$	Seite 1	X	X	X		X	X	X	X	X	X		
	Seite 2		X	X	X		X	X	X	X	X	X	
	Seite 3			X	X	X					X	X	X
	Seite 4				X	X	X					X	X
	Seite 5							X	X	X			X
$\Delta=4$	Seite 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Seite 2		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Seite 3			X	X	X	X				X	X	X
	Seite 4				X	X	X	X				X	X
	Seite 5							X	X	X	X		X

Arbeitsmengenmodell

■ Beispiel: Arbeitsmengen bei verschiedenen Δ

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
$\Delta=3$	Seite 1	X	X	X		X	X	X	X	X	X		
	Seite 2		X	X	X		X	X	X	X	X	X	
	Seite 3			X	X	X					X	X	X
	Seite 4				X	X	X					X	X
	Seite 5							X	X	X			X
$\Delta=4$	Seite 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Seite 2		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Seite 3			X	X	X	X				X	X	X
	Seite 4				X	X	X	X				X	X
	Seite 5							X	X	X	X		X

Arbeitsmengenmodell

■ Beispiel: Arbeitsmengen bei verschiedenen Δ

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
$\Delta=3$	Seite 1	X	X	X		X	X	X	X	X	X		
	Seite 2		X	X	X		X	X	X	X	X	X	
	Seite 3			X	X	X					X	X	X
	Seite 4				X	X	X					X	X
	Seite 5							X	X	X			X
$\Delta=4$	Seite 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Seite 2		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Seite 3			X	X	X	X				X	X	X
	Seite 4				X	X	X	X				X	X
	Seite 5							X	X	X	X		X

Arbeitsmengenmodell

■ Beispiel: Arbeitsmengen bei verschiedenen Δ

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
$\Delta=3$	Seite 1	X	X	X		X	X	X	X	X	X		
	Seite 2		X	X	X		X	X	X	X	X	X	
	Seite 3			X	X	X					X	X	X
	Seite 4				X	X	X					X	X
	Seite 5							X	X	X			X
$\Delta=4$	Seite 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Seite 2		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Seite 3			X	X	X	X				X	X	X
	Seite 4				X	X	X	X				X	X
	Seite 5							X	X	X	X		X

Arbeitsmengenmodell

■ Beispiel: Arbeitsmengen bei verschiedenen Δ

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
$\Delta=3$	Seite 1	X	X	X		X	X	X	X	X	X		
	Seite 2		X	X	X		X	X	X	X	X	X	
	Seite 3			X	X	X					X	X	X
	Seite 4				X	X	X					X	X
	Seite 5							X	X	X			X
$\Delta=4$	Seite 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Seite 2		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Seite 3			X	X	X	X				X	X	X
	Seite 4				X	X	X	X				X	X
	Seite 5							X	X	X	X		X

Arbeitsmengenmodell

■ Beispiel: Arbeitsmengen bei verschiedenen Δ

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
$\Delta=3$	Seite 1	X	X	X		X	X	X	X	X	X		
	Seite 2		X	X	X		X	X	X	X	X	X	
	Seite 3			X	X	X					X	X	X
	Seite 4				X	X	X					X	X
	Seite 5							X	X	X			X
$\Delta=4$	Seite 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Seite 2		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Seite 3			X	X	X	X				X	X	X
	Seite 4				X	X	X	X				X	X
	Seite 5							X	X	X	X		X

Arbeitsmengenmodell

■ Beispiel: Arbeitsmengen bei verschiedenen Δ

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
$\Delta=3$	Seite 1	X	X	X		X	X	X	X	X	X		
	Seite 2		X	X	X		X	X	X	X	X	X	
	Seite 3			X	X	X					X	X	X
	Seite 4				X	X	X					X	X
	Seite 5							X	X	X			X
$\Delta=4$	Seite 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Seite 2		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Seite 3			X	X	X	X				X	X	X
	Seite 4				X	X	X	X				X	X
	Seite 5							X	X	X	X		X

Arbeitsmengenmodell

■ Beispiel: Arbeitsmengen bei verschiedenen Δ

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
$\Delta=3$	Seite 1	X	X	X		X	X	X	X	X	X		
	Seite 2		X	X	X		X	X	X	X	X	X	
	Seite 3			X	X	X					X	X	X
	Seite 4				X	X	X					X	X
	Seite 5							X	X	X			X
$\Delta=4$	Seite 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Seite 2		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Seite 3			X	X	X	X				X	X	X
	Seite 4				X	X	X	X				X	X
	Seite 5							X	X	X	X		X

Arbeitsmengenmodell

■ Beispiel: Arbeitsmengen bei verschiedenen Δ

Referenzfolge		1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
$\Delta=3$	Seite 1	X	X	X		X	X	X	X	X	X		
	Seite 2		X	X	X		X	X	X	X	X	X	
	Seite 3			X	X	X					X	X	X
	Seite 4				X	X	X					X	X
	Seite 5							X	X	X			X
$\Delta=4$	Seite 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Seite 2		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Seite 3			X	X	X	X				X	X	X
	Seite 4				X	X	X	X				X	X
	Seite 5							X	X	X	X		X

Diskussion: Arbeitsmengenmodell

- Annäherung der Zugriffe durch die Zeit
 - Bestimmtes Zeitintervall ist ungefähr proportional zu Anzahl von Speicherzugriffen
- Virtuelle Zeit des Prozesses muss gemessen werden
 - Nur die Zeit relevant, in der der Prozess im Zustand RUNNING ist
 - Verwalten virtueller Uhren pro Prozess

Arbeitsmengenbestimmung mit Zeitgeber

■ Annäherung der Arbeitsmenge mit

- Referenzbit
- Altersangabe pro Seite (Zeitintervall ohne Benutzung)
- Timer-Interrupt (durch Zeitgeber)

■ Algorithmus:

- durch regelmäßigen Interrupt wird mittels Referenzbit die Altersangabe fortgeschrieben:
 - ist Referenzbit gesetzt (Seite wurde benutzt), wird das Alter auf Null gesetzt;
 - ansonsten wird Altersangabe erhöht.
 - Es werden nur die Seiten des gerade laufenden Prozesses „gealtert“.
- Seiten mit Alter $> \Delta$ sind nicht mehr in der Arbeitsmenge des jeweiligen Prozesses.

Arbeitsmengenbestimmung mit Zeitgeber

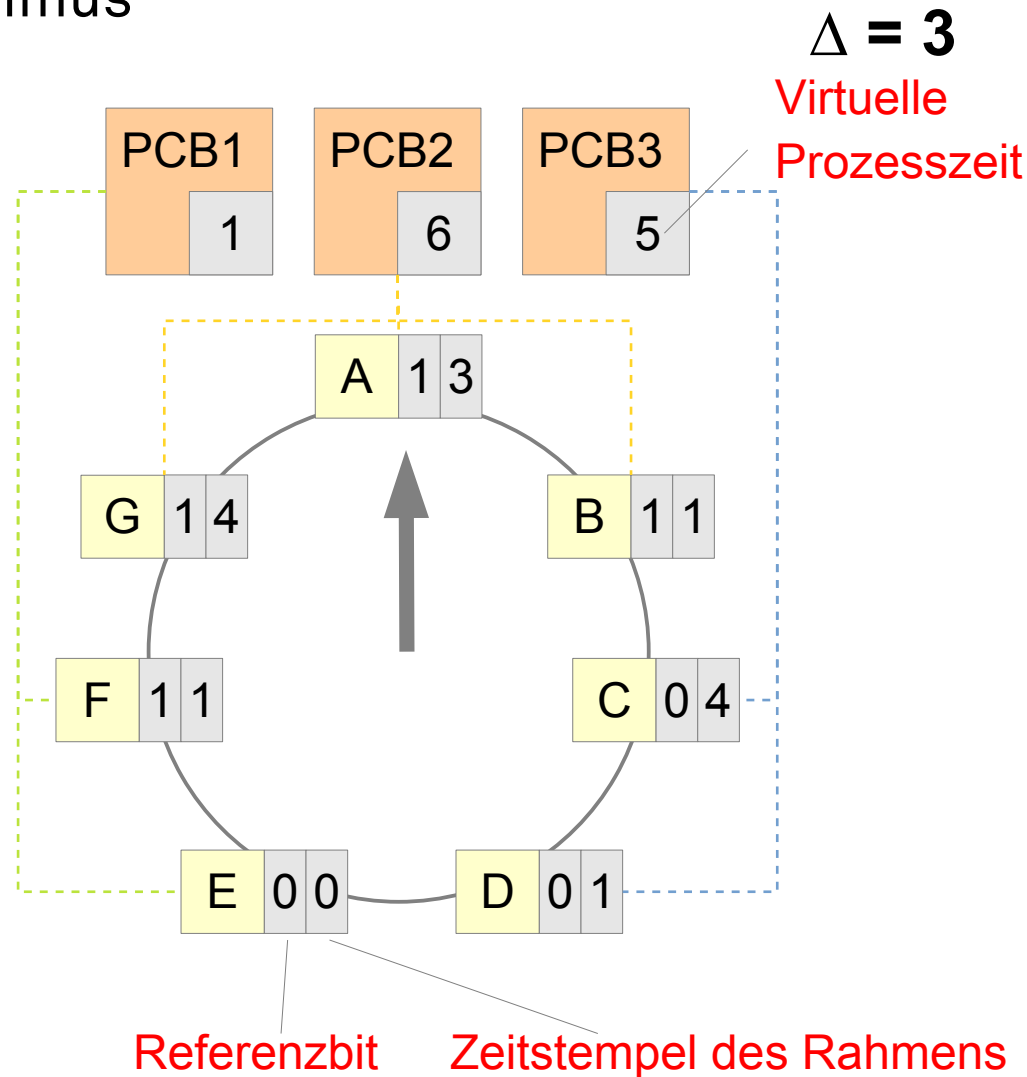
- **ungenau**
 - System ist aber nicht empfindlich auf diese Ungenauigkeit
 - Verringerung der Zeitintervalle: höherer Aufwand, genauere Messung
- **ineffizient**
 - große Menge von Seiten zu betrachten

Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock

- Algorithmus WSClock (working set clock)
 - Arbeitet wie Clock
 - Seite wird nur dann ersetzt, wenn sie **nicht zur Arbeitsmenge ihres Prozesses gehört** oder der Prozess deaktiviert ist.
- Bei Zurücksetzen des Referenzbits wird die virtuelle Zeit des jeweiligen Prozesses eingetragen, die z.B. im PCB gehalten und fortgeschrieben wird.
- Bestimmung der Arbeitsmenge erfolgt durch **Differenzbildung** von virtueller Zeit des Prozesses und Zeitstempel in dem Seitenrahmen.

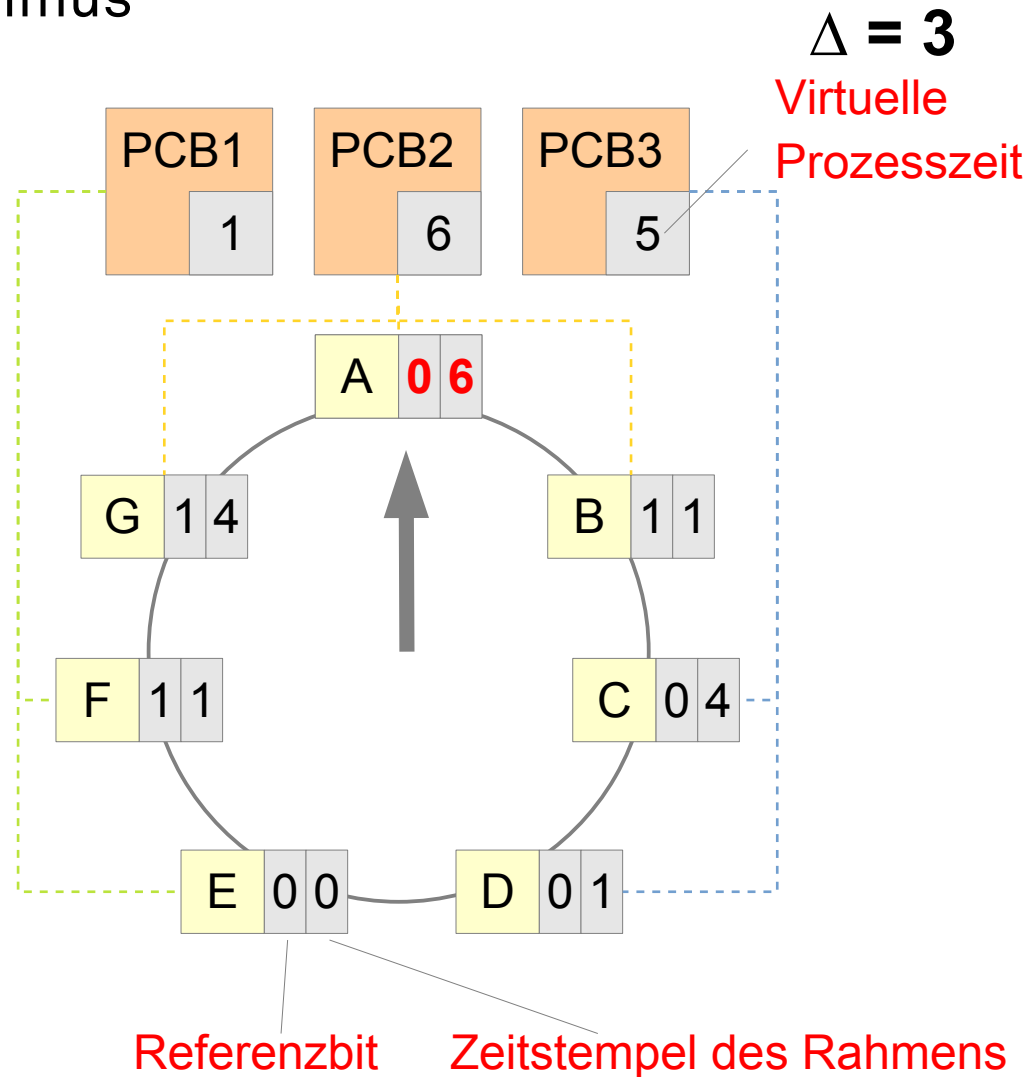
Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock

■ WSClock-Algorithmus



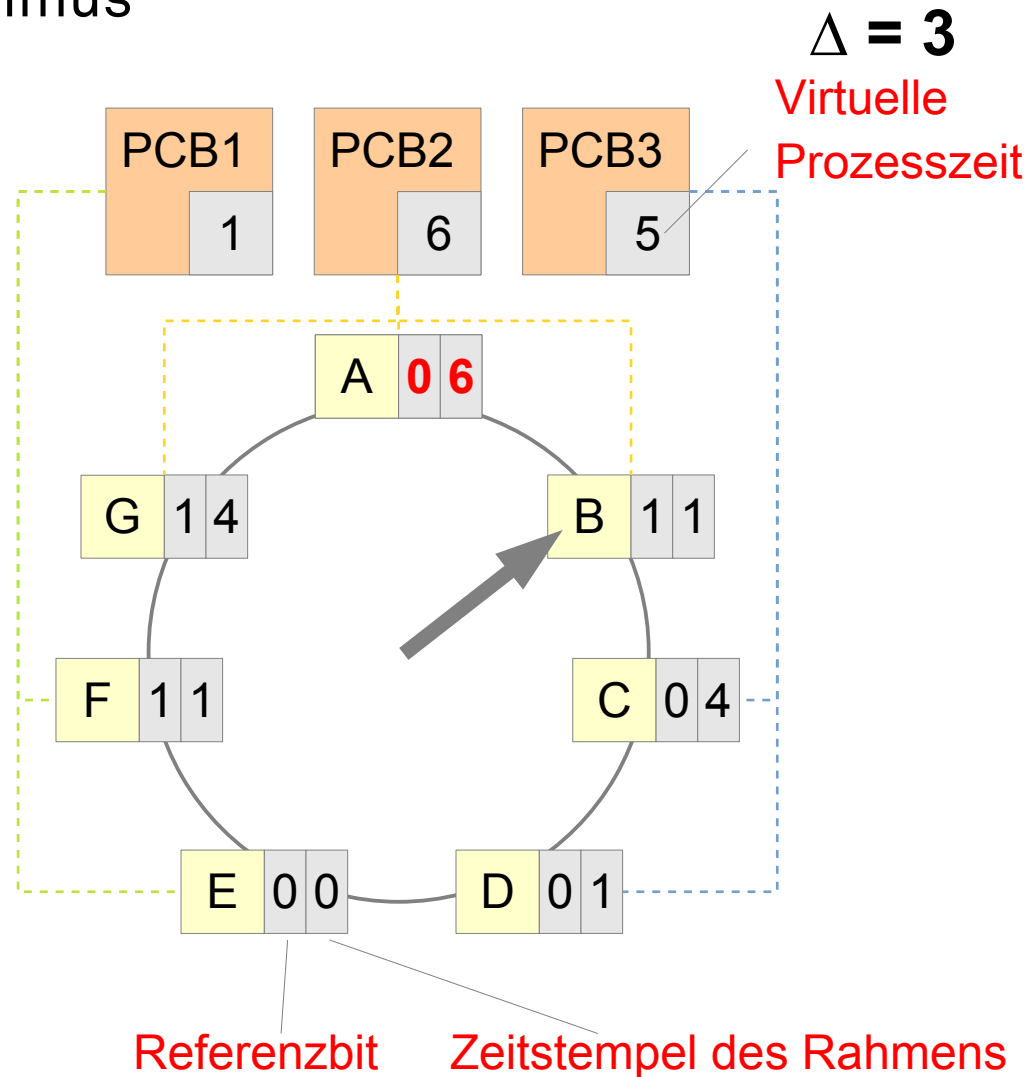
Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock

■ WSClock-Algorithmus



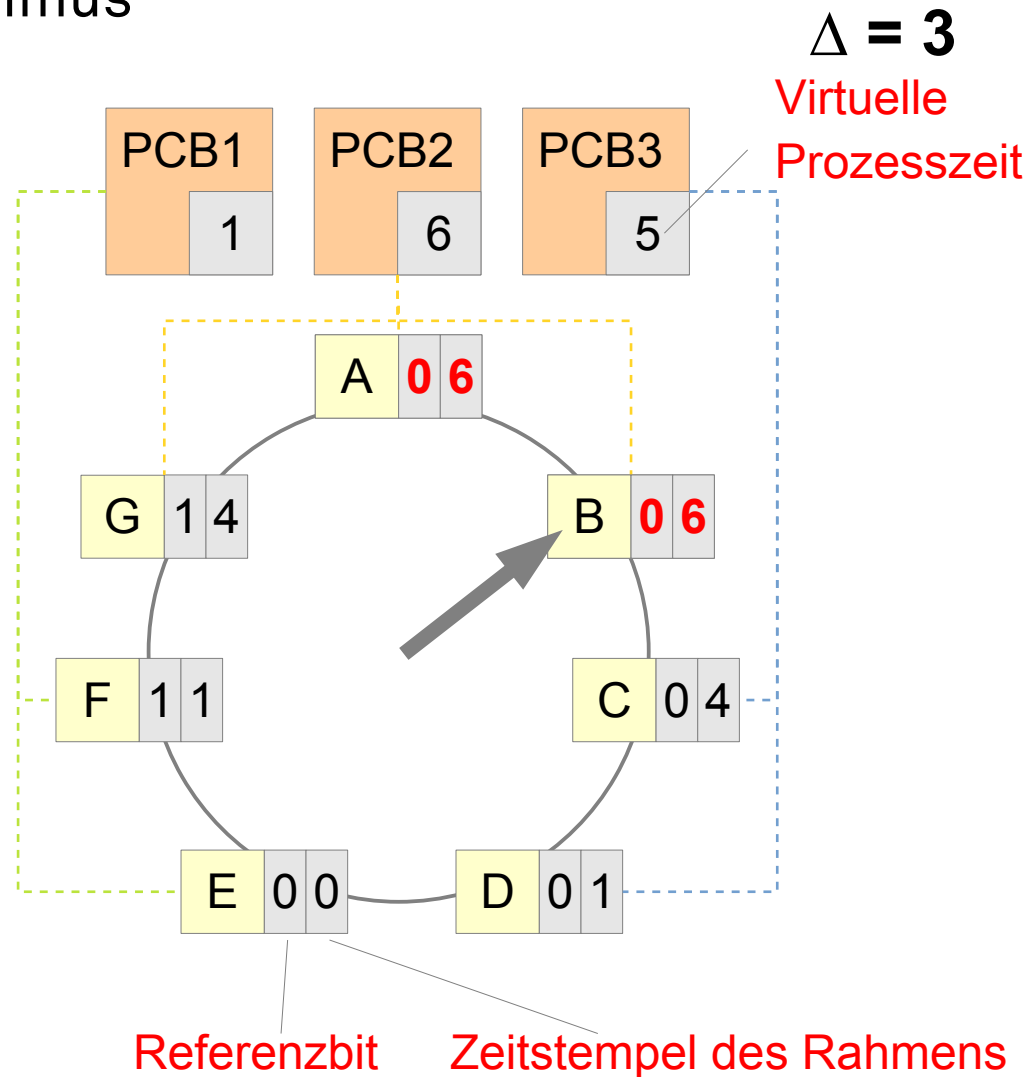
Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock

■ WSClock-Algorithmus



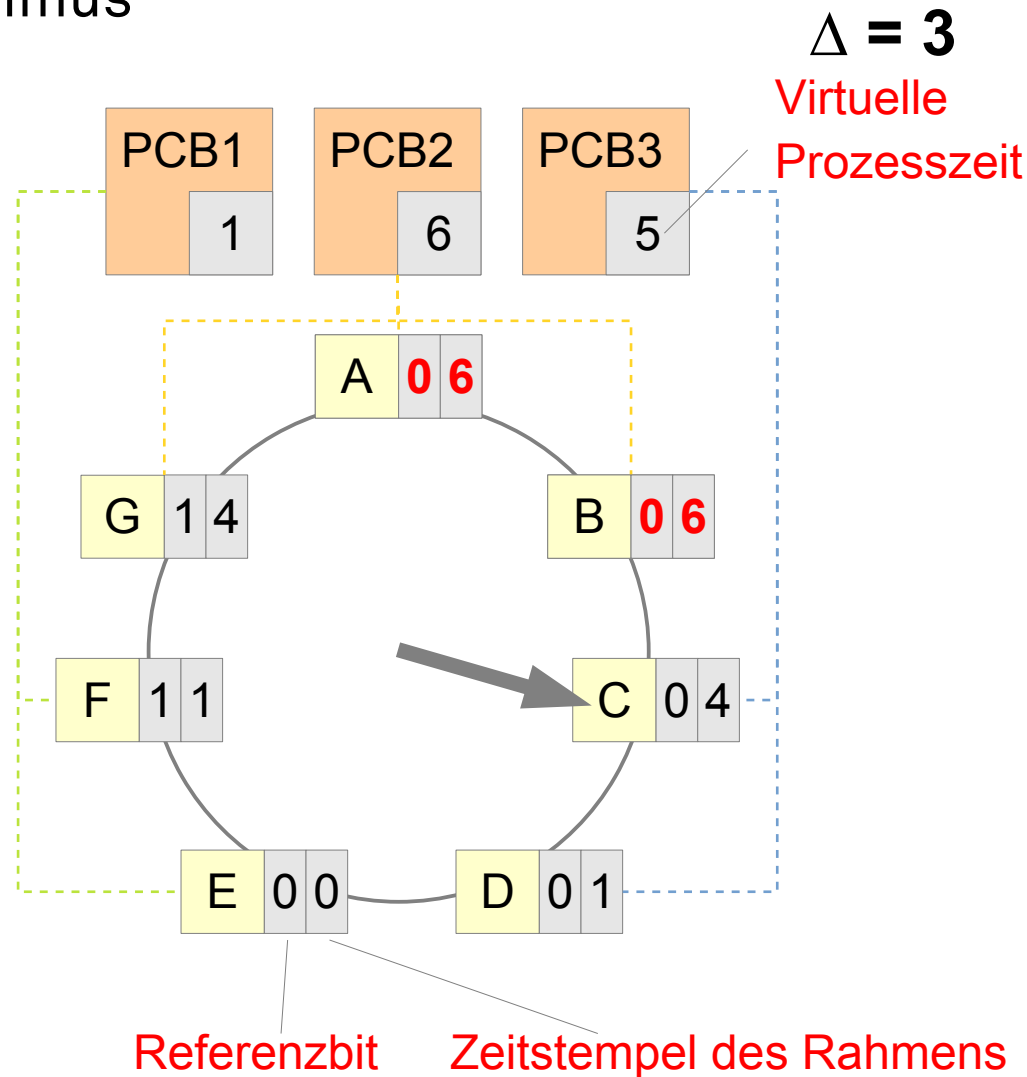
Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock

■ WSClock-Algorithmus



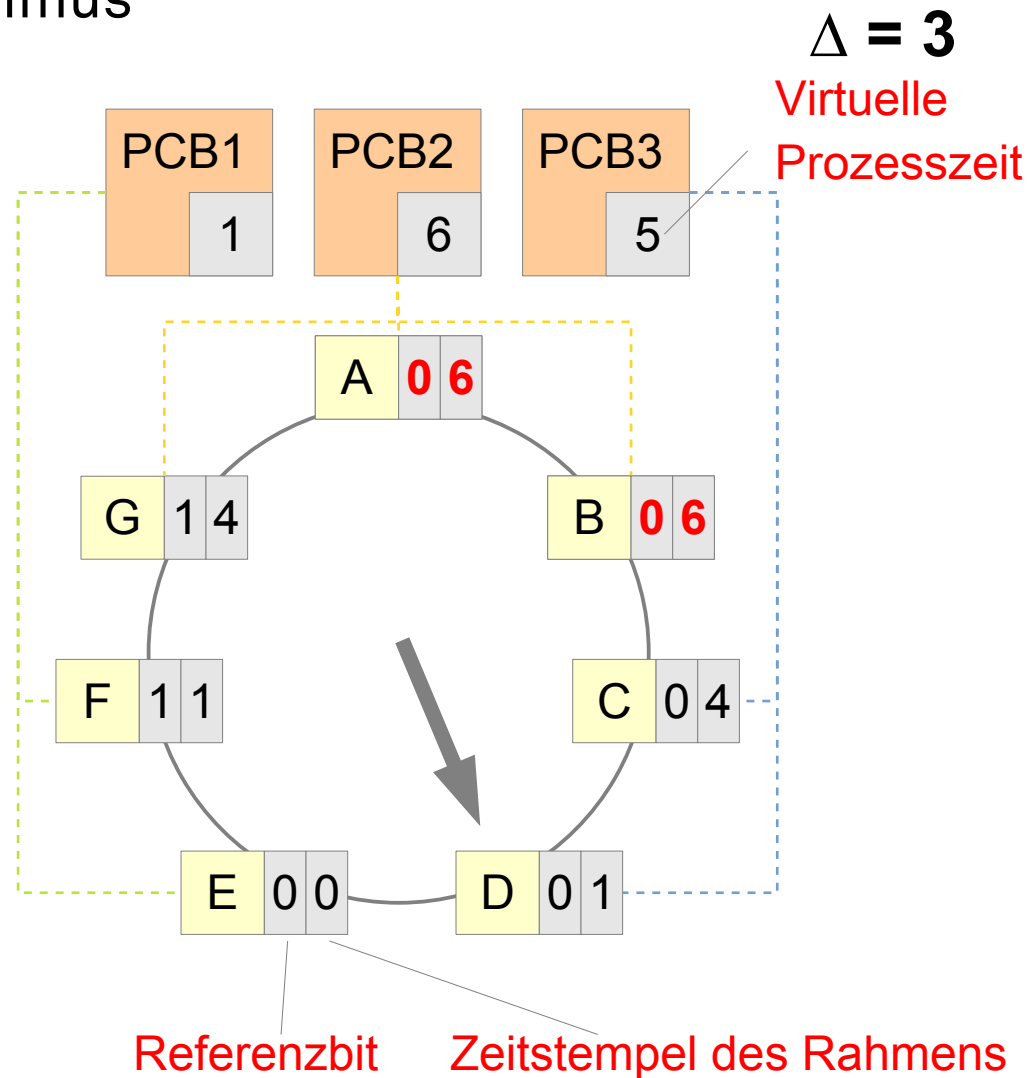
Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock

■ WSClock-Algorithmus



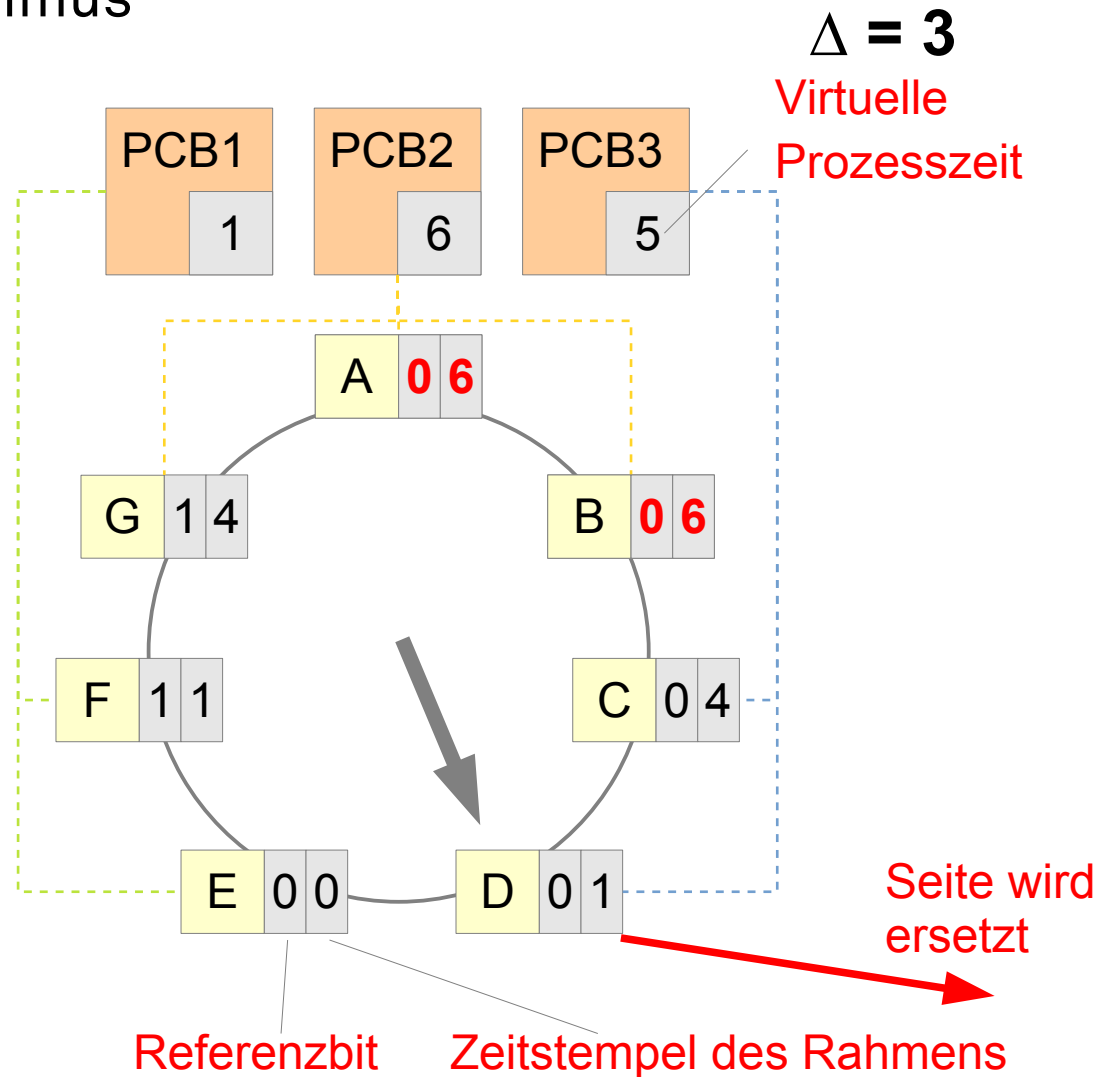
Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock

■ WSClock-Algorithmus



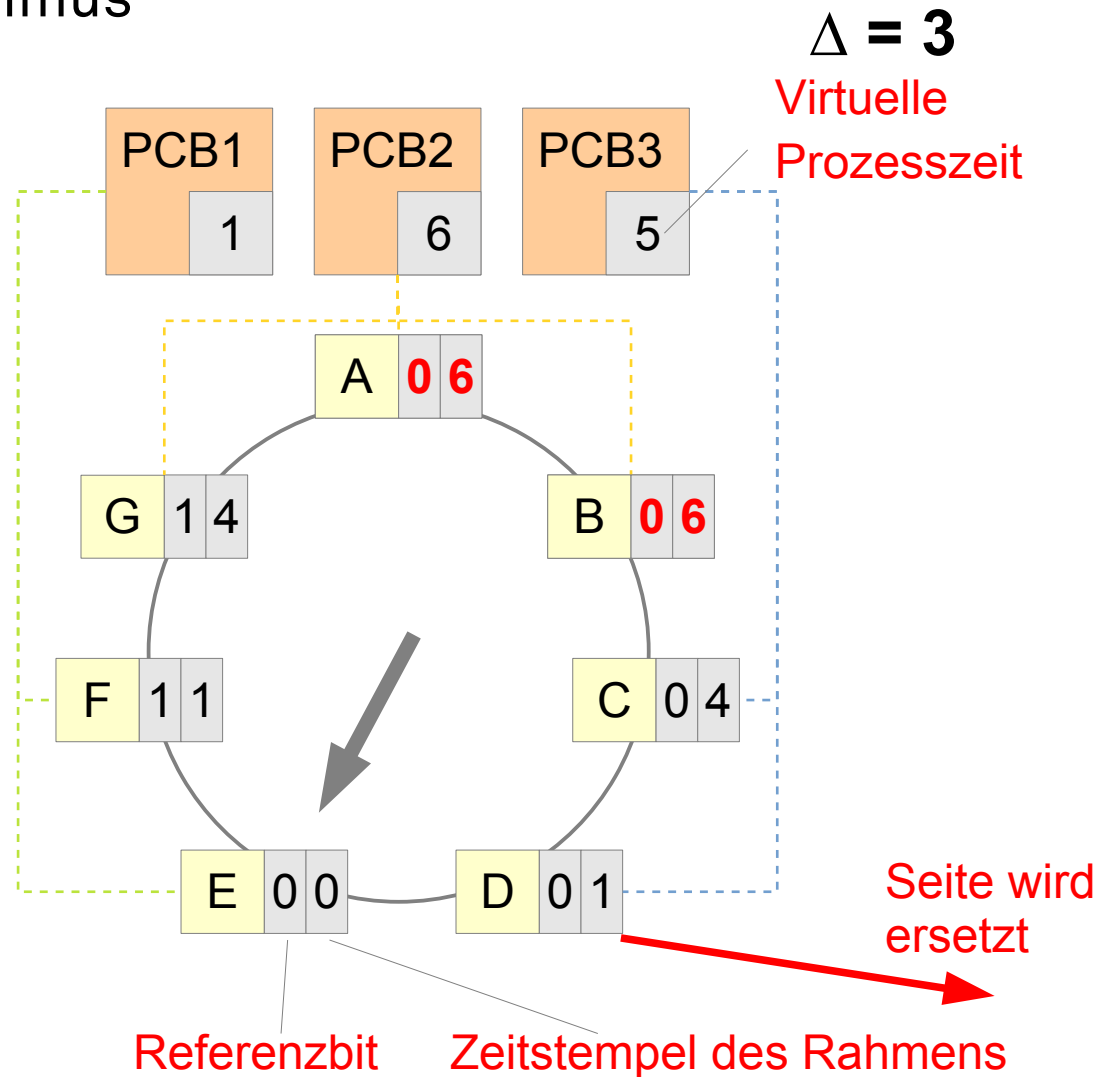
Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock

■ WSClock-Algorithmus



Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock

■ WSClock-Algorithmus



Diskussion: Arbeitsmengenprobleme

- **Speicherplatzbedarf** für Zeitstempel
- Zuordnung zu einem Prozess nicht immer möglich
 - gemeinsam genutzte Seiten in modernen Betriebssystemen eher die Regel als die Ausnahme
 - Shared Libraries
 - Gemeinsame Seiten im Datensegment (Shared Memory)

Diskussion: Arbeitsmengenprobleme

- **Speicherplatzbedarf** für Zeitstempel
- Zuordnung zu einem Prozess nicht immer möglich
 - gemeinsam genutzte Seiten in modernen Betriebssystemen eher die Regel als die Ausnahme
 - Shared Libraries
 - Gemeinsame Seiten im Datensegment (Shared Memory)
- **Lösung 3: Thrashing kann durch direkte Steuerung der Seitenfehlerrate leichter vermieden werden**
 - Messung pro Prozess
 - **Rate < Schwellwert**: Menge der Seitenrahmen verkleinern
 - **Rate > Schwellwert**: Menge der Seitenrahmen vergrößern

Inhalt

- Motivation
- Demand Paging
- Seitenersetzung
- Seitenzuordnung
- **Ladestrategie**
- Zusammenfassung

Ladestrategie

■ Auf Anforderung laden

- Damit ist man auf der sicheren Seite

■ Im Voraus laden

- **Schwierig:** Ausgelagerte Seiten werden eigentlich nicht gebraucht.
- Oftmals löst eine Maschineninstruktion mehrere Seitenfehler aus.
 - Durch Interpretation des Befehls beim ersten Seitenfehler können die benötigten anderen Seiten im Voraus eingelagert werden.
 - Weitere Seitenfehler werden verhindert.
- Komplettes Working Set bei Prozesseinlagerung im Voraus laden
- Sequentielle Zugriffsmuster erkennen und Folgeseiten vorab laden

Inhalt

- Motivation
- Demand Paging
- Seitenersetzung
- Seitenzuordnung
- Ladestrategie
- **Zusammenfassung**

Zusammenfassung

- Virtueller Speicher ermöglicht die Nutzung großer logischer Adressräume trotz Speicherbeschränkung.
- Komfort hat aber seinen Preis:
 - Aufwand in der Hardware
 - Komplexe Algorithmen im Betriebssystem
 - „Erstaunliche“ Effekte (wie „Thrashing“)
 - Zeitverhalten nicht vorhersagbar
- Einfache (Spezialzweck-)Systeme, die diesen „Luxus“ nicht unbedingt benötigen, sollten besser darauf verzichten.