



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

Fakultät Informatik Institut für Systemarchitektur, Professur für Betriebssysteme

BETRIEBSSYSTEME UND SICHERHEIT

Virtueller Speicher

<https://tud.de/inf/os/studium/vorlesungen/bs>

HORST SCHIRMEIER

Inhalt

- Wiederholung
- Motivation
- *Demand Paging*
- Seitenersetzung
- Kachelzuordnung
- Ladestrategie
- Zusammenfassung

Silberschatz, Kap. ...
9: *Virtual Memory*

Tanenbaum, Kap. ...
3: Speicherverwaltung

Inhalt

- **Wiederholung**
- Motivation
- *Demand Paging*
- Seitenersetzung
- Kachelzuordnung
- Ladestrategie
- Zusammenfassung

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:
 - Ladestrategie
 - Ersetzungsstrategie



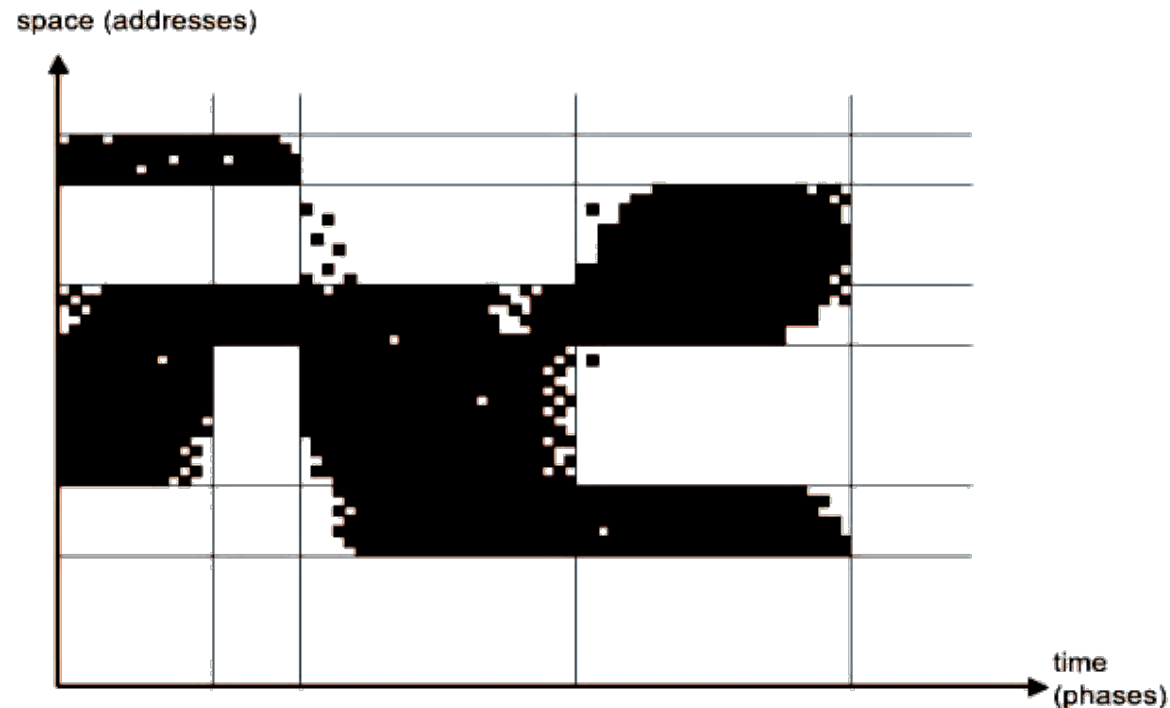
heute mehr dazu

Inhalt

- Wiederholung
- **Motivation**
- *Demand Paging*
- Seitenersetzung
- Kachelzuordnung
- 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: Peter J. Denning, „The Locality Principle“, CACM 2005
(doi: 10.1145/1070838.1070856)

Die Idee des „Virtuellen Speichers“

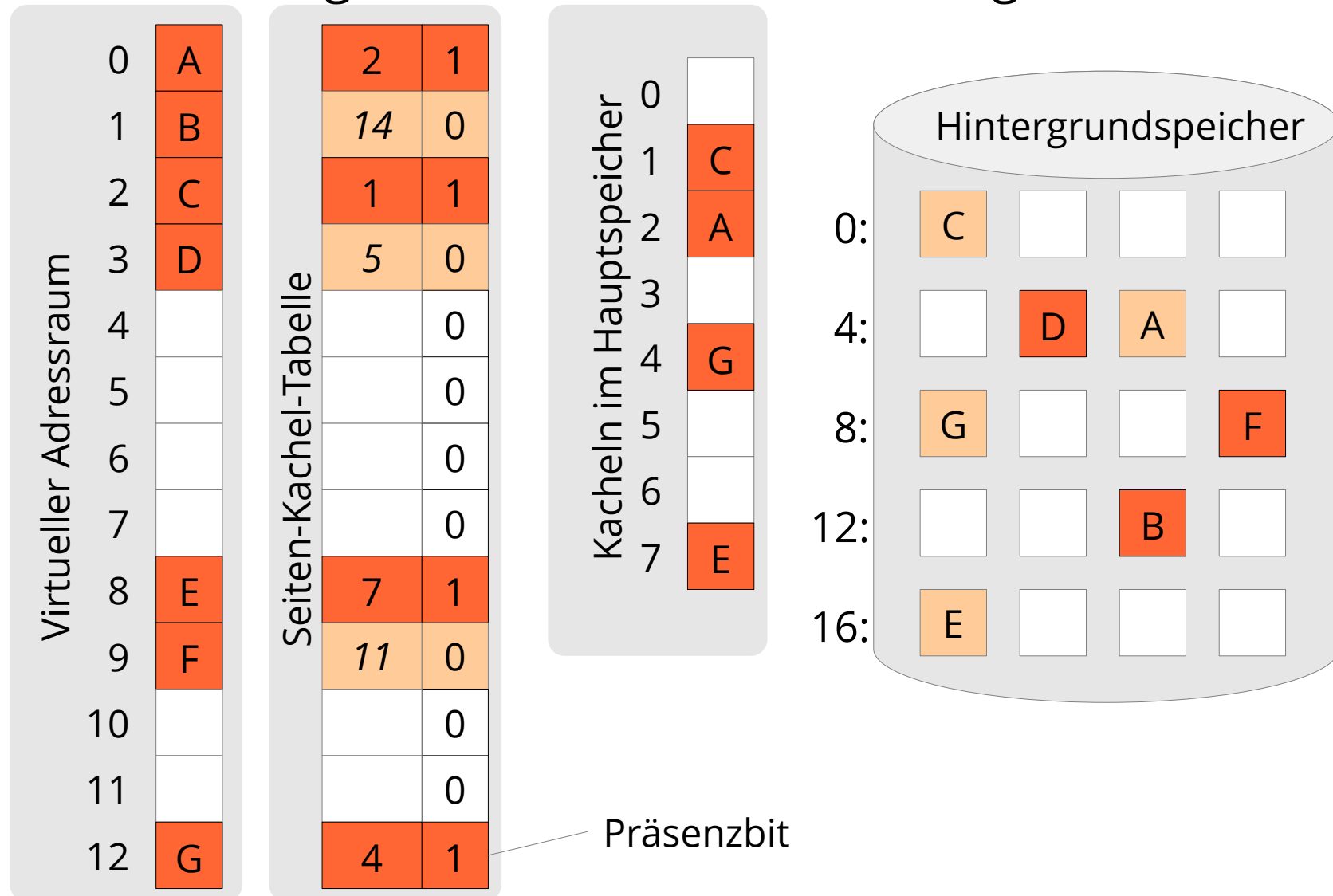
- Entkoppelung des Speicherbedarfs vom verfügbaren Hauptspeicher
 - Prozesse benötigen nicht alle Speicherstellen gleich häufig:
 - bestimmte Befehle werden selten oder gar nicht benutzt (z.B. Fehlerbehandlungen)
 - bestimmte Datenstrukturen werden nicht voll belegt
 - Prozesse benötigen evtl. mehr Speicher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

Inhalt

- Wiederholung
- Motivation
- ***Demand Paging***
- Seitenersetzung
- Kachelzuordnung
- Ladestrategie
- Zusammenfassung

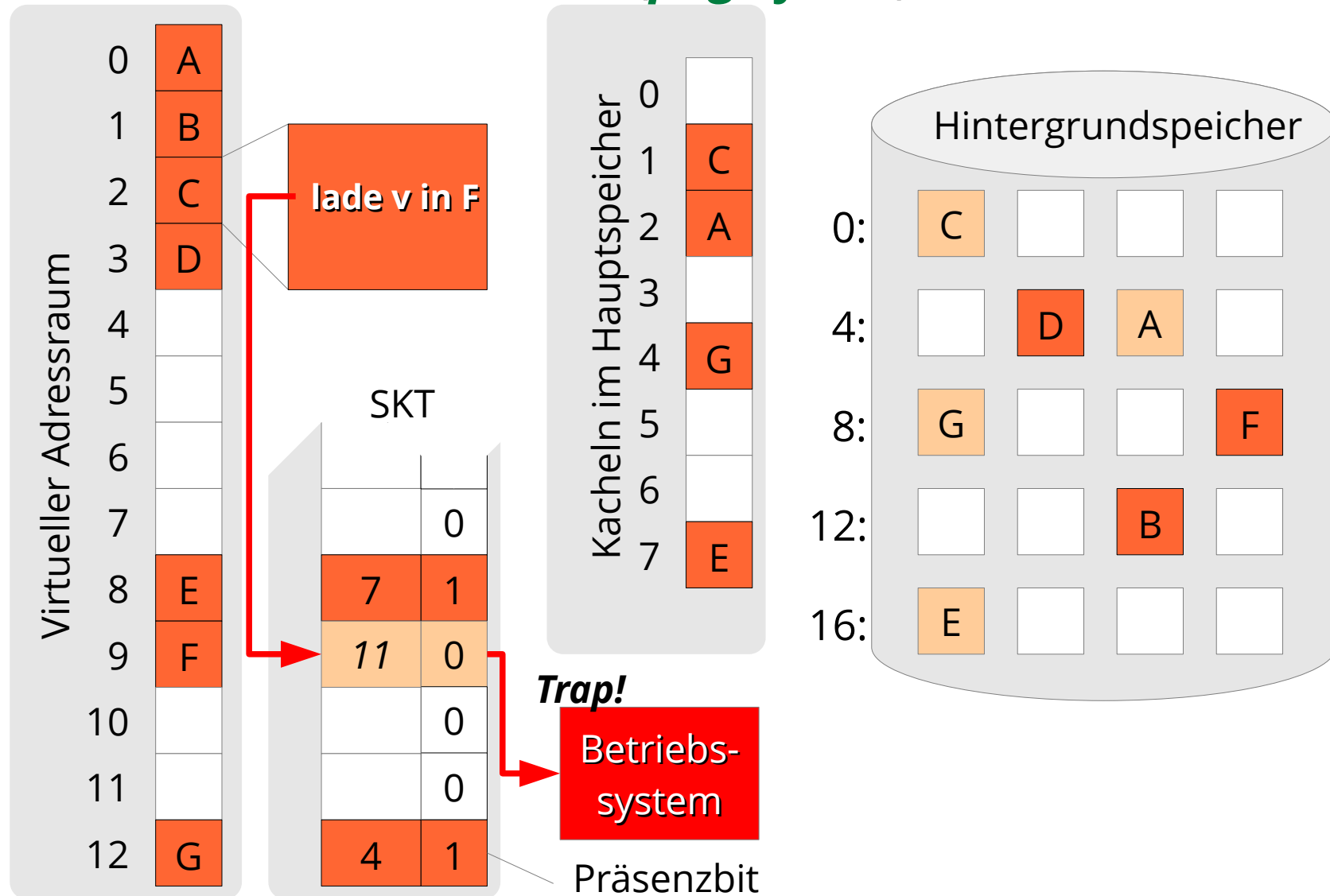
Demand Paging

- Bereitstellung von Seiten auf Anforderung



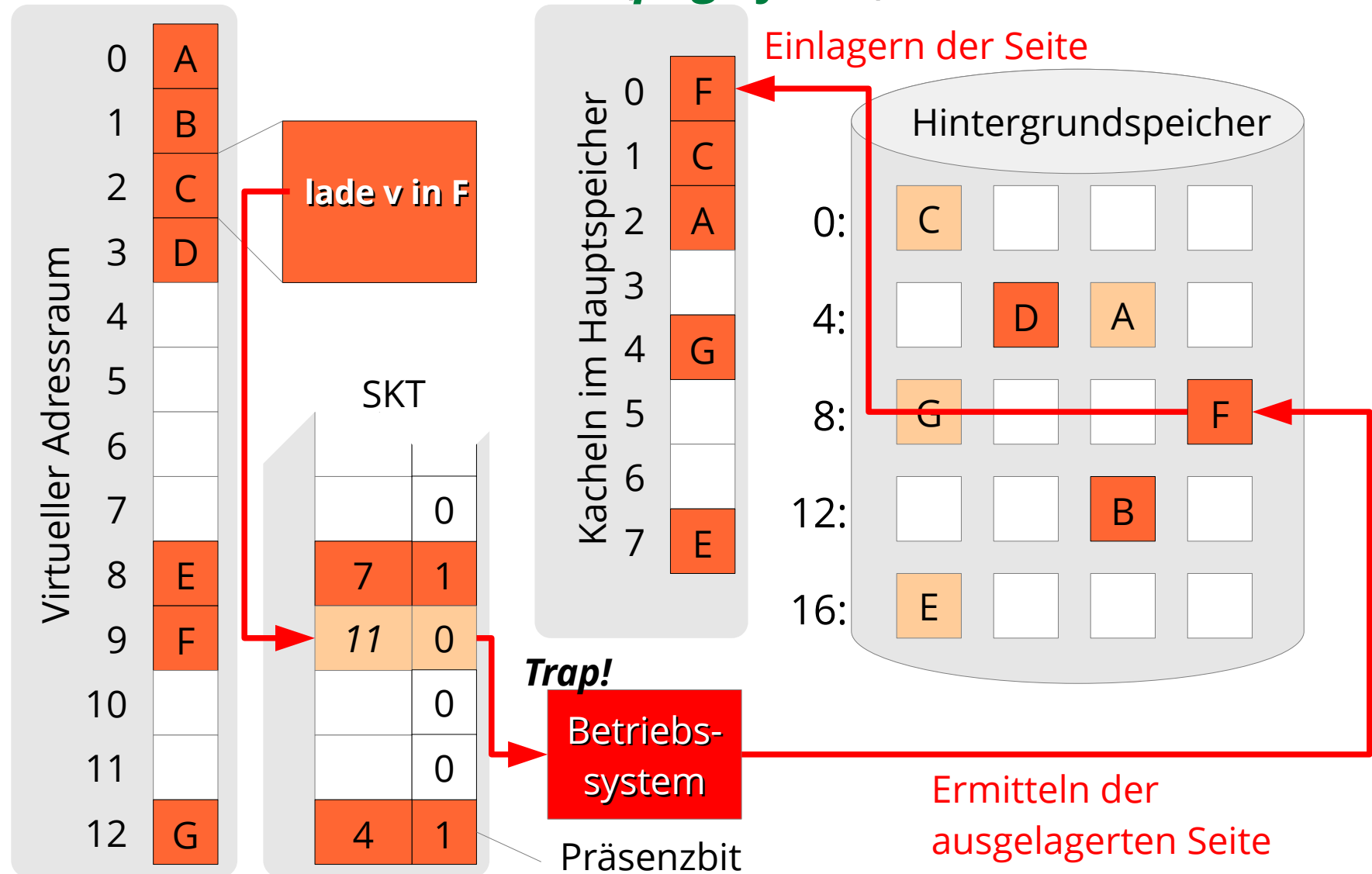
Demand Paging

- Reaktion auf Seitenfehler (*page fault*)



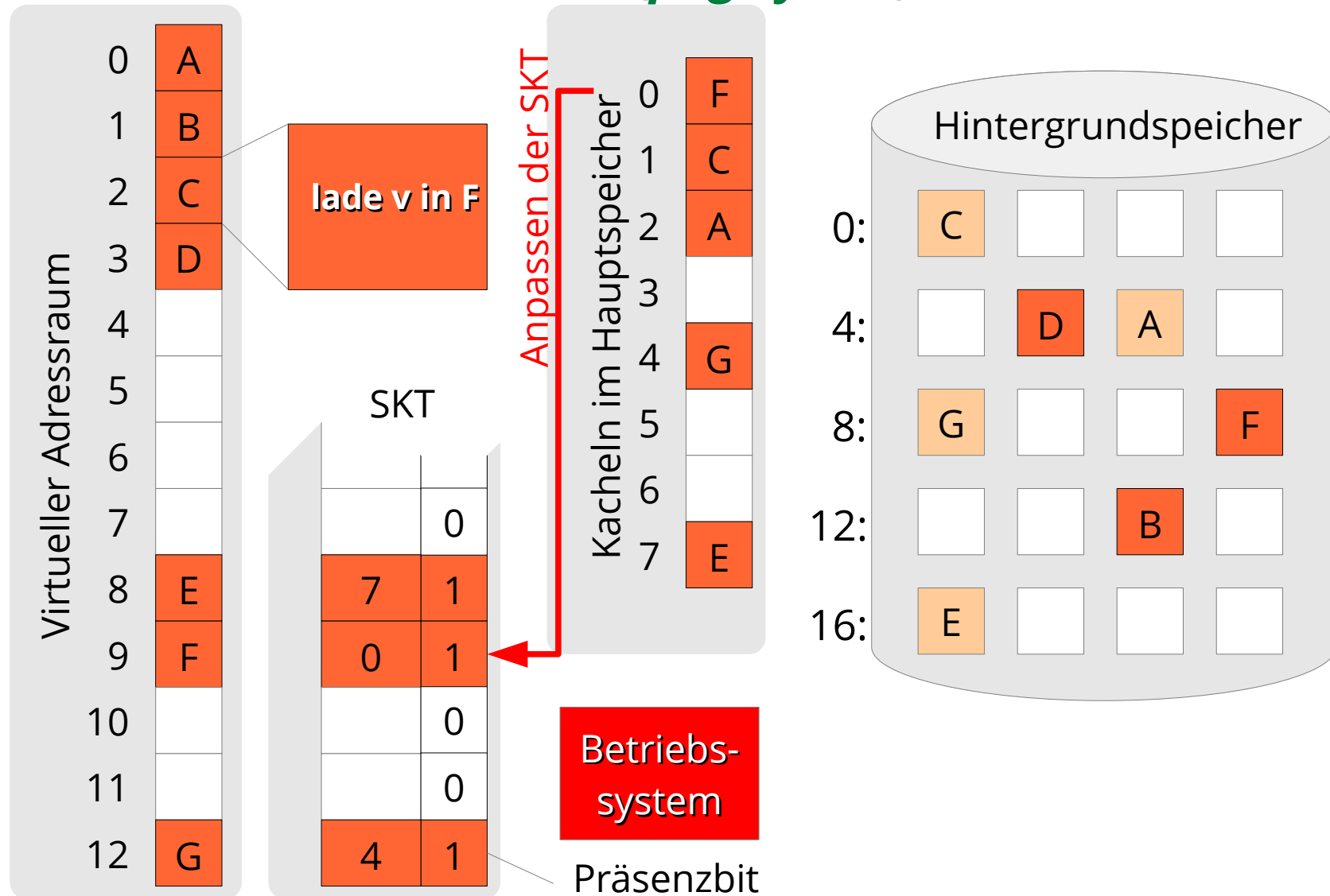
Demand Paging

- Reaktion auf Seitenfehler (*page fault*)



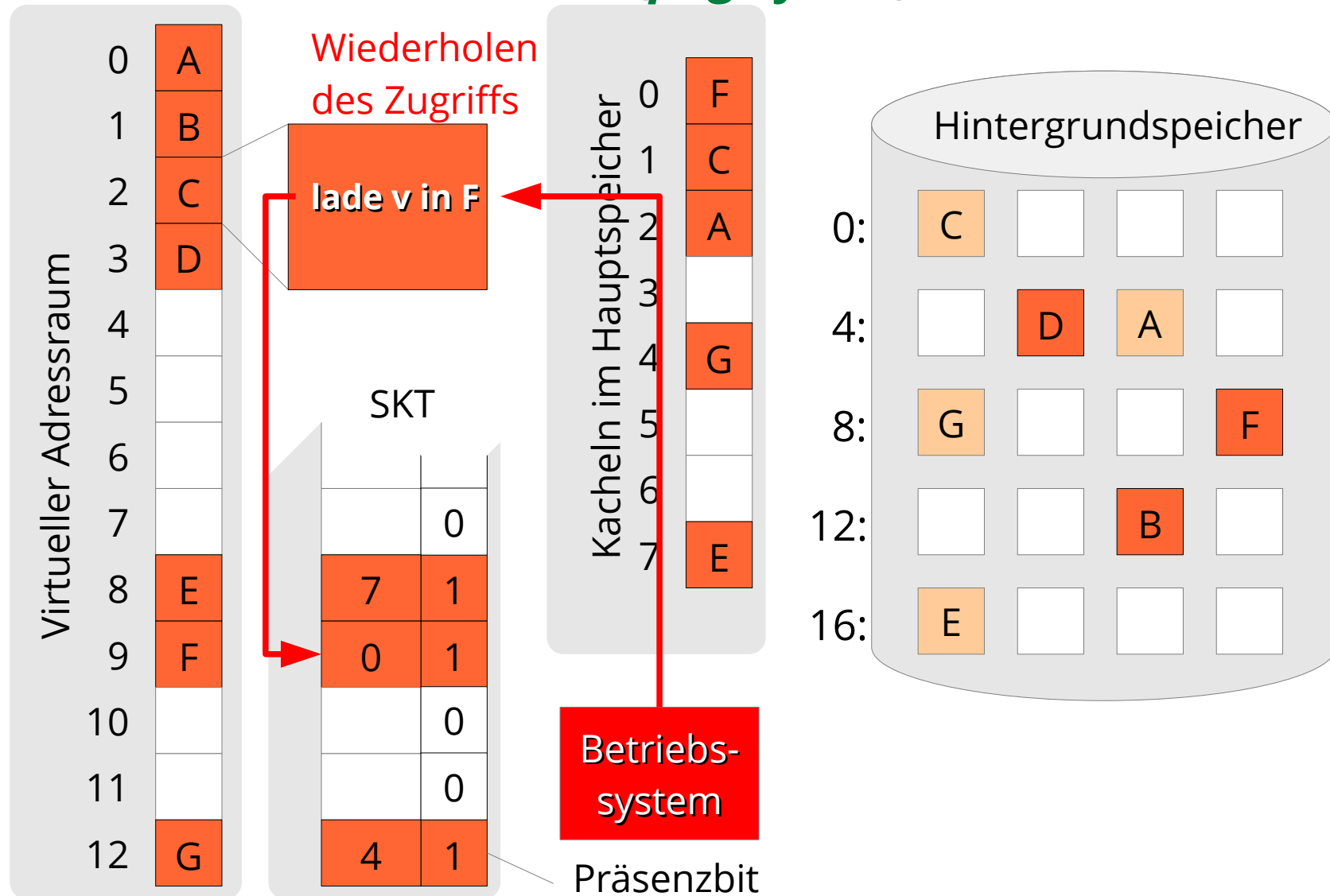
Demand Paging

- Reaktion auf Seitenfehler (*page fault*)



Demand Paging

- Reaktion auf Seitenfehler (*page fault*)



Diskussion: *Paging*-Zeitverhalten

- 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 8 ms
(3 ms Latenz, 5 ms Positionierzeit, 0,05 ms Übertragungszeit)
 - **Annahme:** normale Zugriffszeit 100 ns
 - Effektive Zugriffszeit:
$$(1 - p) \cdot 100 \text{ ns} + p \cdot 8050000 \text{ ns} = 100 \text{ ns} + 8049900 \text{ ns} \cdot p$$
- 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: *Demand Segmentation*

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

- Grobe Granularität
 - z.B. *Code*-, Daten-, *Stack*-Segment
- Schwierigere Hauptspeicherverwaltung
 - Alle freien Kacheln sind **gleich gut** für ausgelagerte **Seiten**. Bei der Einlagerung von **Segmenten** ist die Speichersuche schwieriger.
- Schwierigere Hintergrundspeicherverwaltung
 - Hintergrundspeicher wie Kacheln in Blöcke strukturiert (2er-Potenzen)
- In der Praxis hat sich *Demand Paging* durchgesetzt.

Inhalt

- Wiederholung
- Motivation
- *Demand Paging*
- **Seitenersetzung**
- Kachelzuordnung
- Ladestrategie
- Zusammenfassung

Seitenersetzung

- Was tun, wenn keine freie Kachel vorhanden?
 - Eine Seite muss **verdrängt** werden, um Platz für neue Seite zu schaffen!
 - Auswahl von Seiten, die nicht geändert wurden (**dirty bit** in der SKT)
 - Verdrängung erfordert **Auslagerung**, falls Seite geändert wurde
- **Vorgang:**
 - Seitenfehler (*page fault*): *Trap* in das Betriebssystem
 - Auslagern einer Seite, falls keine freie Kachel 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:**
 - Folge von Seitennummern, die das Speicherzugriffsverhalten eines Prozesses abbildet
 - Ermittlung von Referenzfolgen z.B. durch Aufzeichnung der zugegriffenen Adressen – reduziert auf Seitennummern
 - **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 jede Kachel
- Ablauf der Ersetzungen (9 Einlagerungen):

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

First-In, First-Out

- Größerer Hauptspeicher mit 4 Kacheln (**10** Einlagerungen!)
- „FIFO-Anomalie“ (aka „Béládys Anomalie“, 1969)

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

Optimale Ersetzungsstrategie

- Vorwärtsabstand
 - Zeitdauer bis zum nächsten Zugriff auf die entsprechende Seite
- Strategie OPT (oder MIN) ist **optimal** (bei fester Kachelmenge):
minimale Anzahl von Einlagerungen/Ersetzungen (hier 7)
 - „Ersetze immer die Seite mit dem größten Vorwärtsabstand!“

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

Optimale Ersetzungsstrategie

- Vergrößerung des Hauptspeichers (4 Kacheln):
6 Einlagerungen
 - keine Anomalie

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

Optimale Ersetzungsstrategie

- Implementierung von OPT **praktisch meist 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)
 - „Ersetze die Seite mit dem größten Rückwärtsabstand!“

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

Least Recently Used (LRU)

- Vergrößerung des Hauptspeichers (4 Kacheln):
8 Einlagerungen

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

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 Kacheln zu jedem Zeitpunkt eine Teilmenge der Seiten eingelagert, die bei $k+1$ Kacheln 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.
- **Problem:**
 - Implementierung von LRU nicht ohne **Hardwareunterstützung** möglich.
 - Es muss jeder Speicherzugriff berücksichtigt werden.

Least Recently Used (LRU)

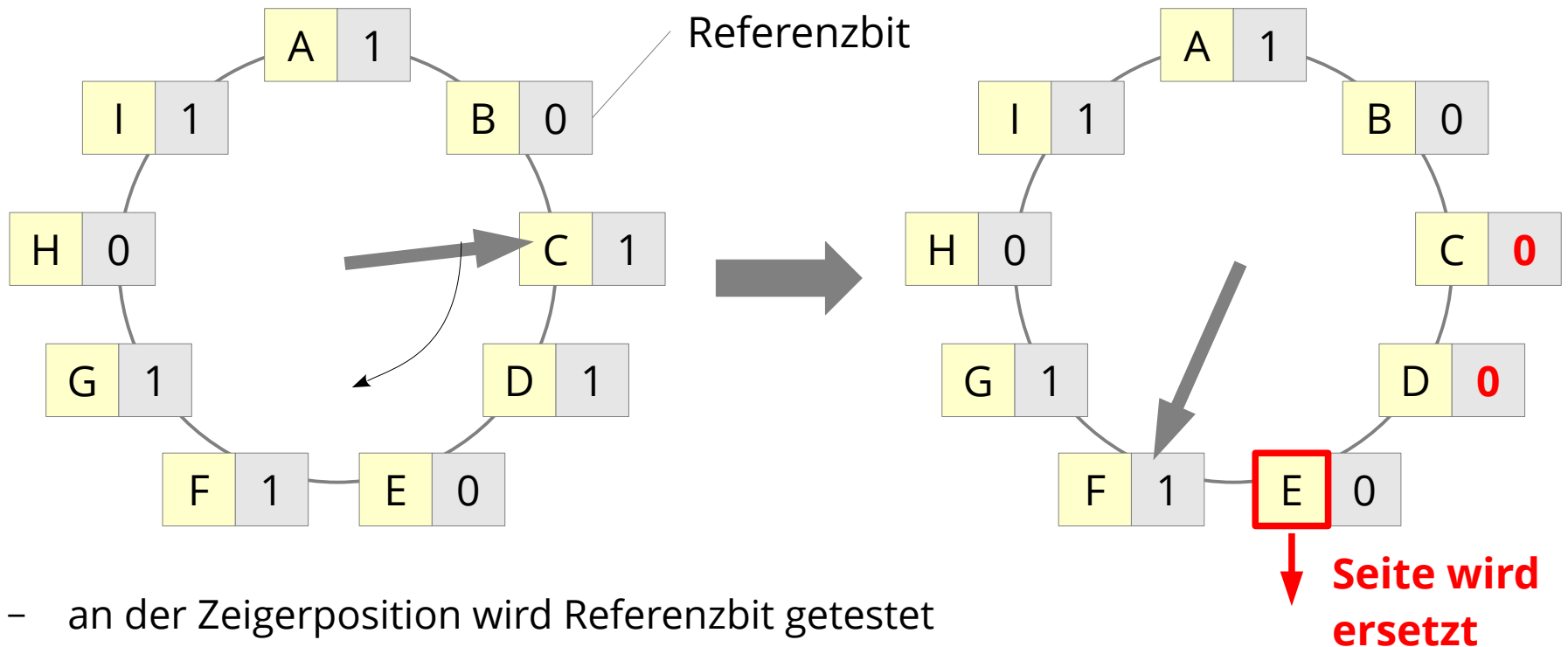
- **Naive Idee:** Hardwareunterstützung durch **Zähler**
 - CPU besitzt einen Zähler, der bei jedem Speicherzugriff erhöht wird.
 - Bei jedem Zugriff wird der aktuelle Zählerwert in den jeweiligen Seitendeskriptor geschrieben.
 - Auswahl der Seite **mit dem kleinsten Zählerstand** (Suche!)
- Aufwändige Implementierung:
 - viele zusätzliche Speicherzugriffe
 - hoher Speicherplatzbedarf
 - Minimum-Suche in der Seitenfehler-Behandlung

Clock-Algorithmus

- 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 an LRU
 - bei einer frisch eingelagerten Seite wird das Referenzbit zunächst auf 1 gesetzt
 - wird eine Opferseite gesucht, so werden die Kacheln **reihum** inspiziert
 - ist das Referenzbit 1, so wird es auf 0 gesetzt (Seite bekommt „2. Chance“)
 - ist das Referenzbit 0, so wird die Seite ersetzt

Clock-Algorithmus

- 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 *Clock* zu FIFO.

Clock-Algorithmus

- Ablauf bei drei Kacheln (9 Einlagerungen)

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

Clock-Algorithmus

- Vergrößerung des Hauptspeichers (4 Kacheln):
10 Einlagerungen

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

Clock-Algorithmus

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

Diskussion: 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

- Wiederholung
- Motivation
- *Demand Paging*
- Seitenersetzung
- **Kachelzuordnung**
- Ladestrategie
- Zusammenfassung

Kachelzuordnung

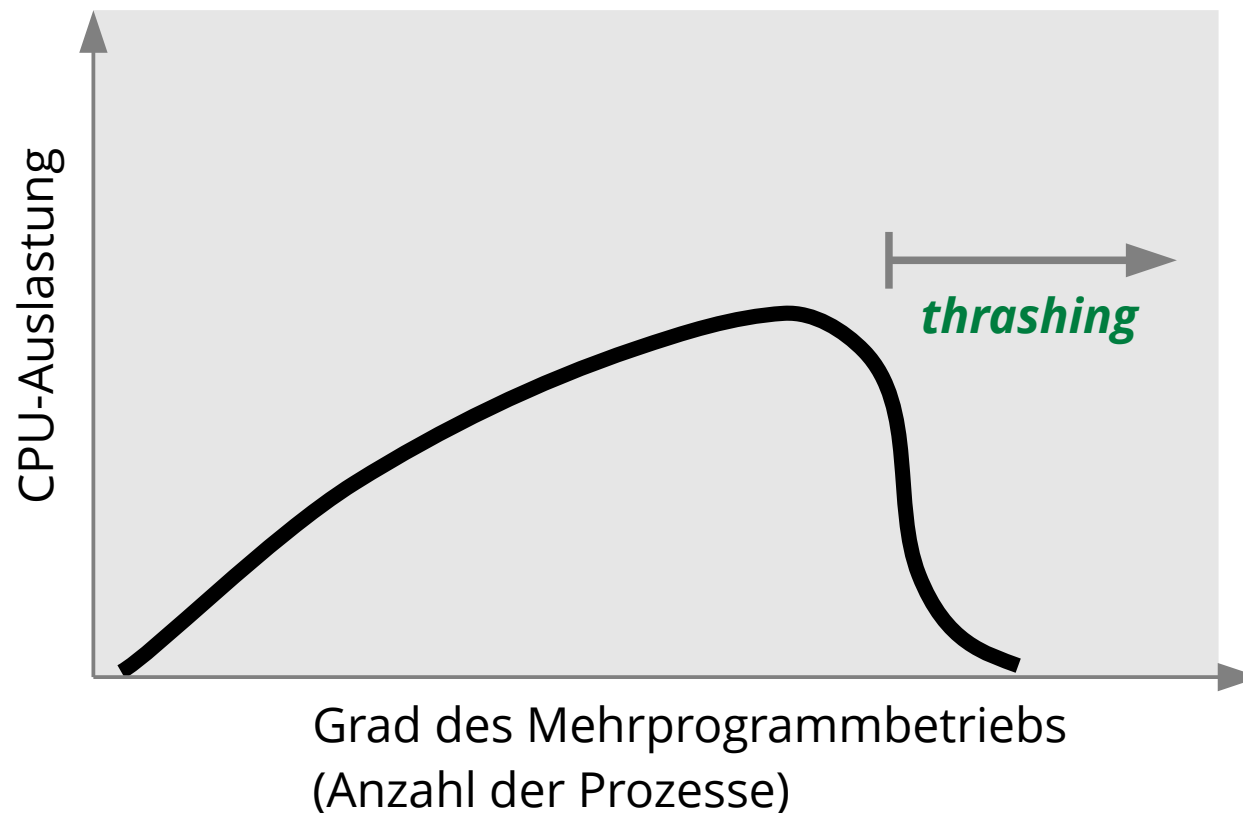
- **Problem:** Aufteilung der Kacheln auf die Prozesse
 - Wie viele eingelagerte Seiten soll man einem Prozess zugestehen?
 - **Maximum:** begrenzt durch Anzahl der Kacheln
 - **Minimum:** abhängig von der Prozessorarchitektur
 - Mindestens die Anzahl von Seiten nötig, die theoretisch bei einem Maschinenbefehl benötigt werden
(z.B. zwei Seiten für den Befehl, vier Seiten für die adressierten Daten)
- Gleiche Zuordnung
 - Anzahl der Prozesse bestimmt die Kachelmenge, die ein Prozess bekommt
- Größenabhängige Zuordnung
 - Größe des Programms fließt in die zugeteilte Kachelmenge ein

Kachelzuordnung

- Globale und lokale Anforderung von Seiten
 - **lokal:** Prozess ersetzt nur immer seine eigenen Seiten
 - Seitenfehler-Verhalten liegt nur in der Verantwortung des Prozesses
 - **global:** Prozess ersetzt auch Seiten anderer Prozesse
 - bessere Effizienz, da ungenutzte Seiten von anderen Prozessen verwendet werden können

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

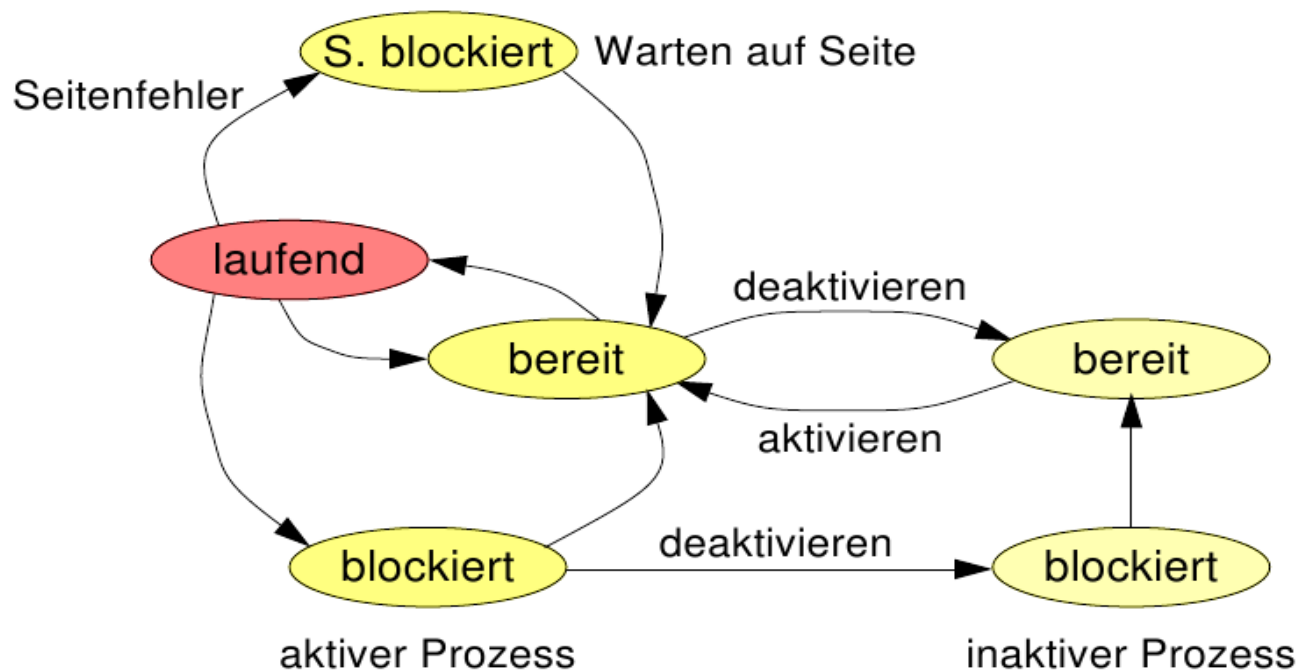
→ Lokale Seitenanforderung behebt *Thrashing* zwischen Prozessen

→ Zuteilung einer genügend großen Zahl von Kacheln behebt *Thrashing* innerhalb der Prozessseiten

- Begrenzung der Prozessanzahl

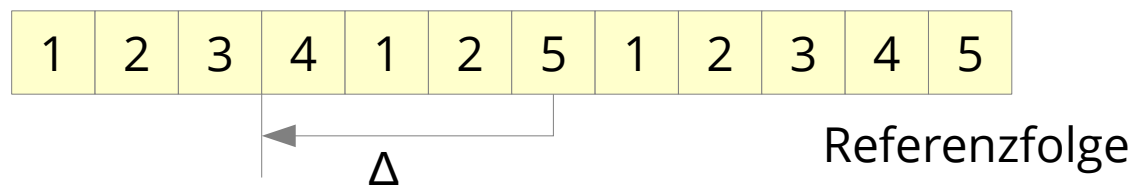
Lösung 1: Auslagerung von Prozessen

- Inaktiver Prozess benötigt keine Kacheln
 - Kacheln teilen sich auf weniger Prozesse auf
 - Verbindung mit dem *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:** $\Delta >$ 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

- 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 $\text{Alter} > \Delta$ 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

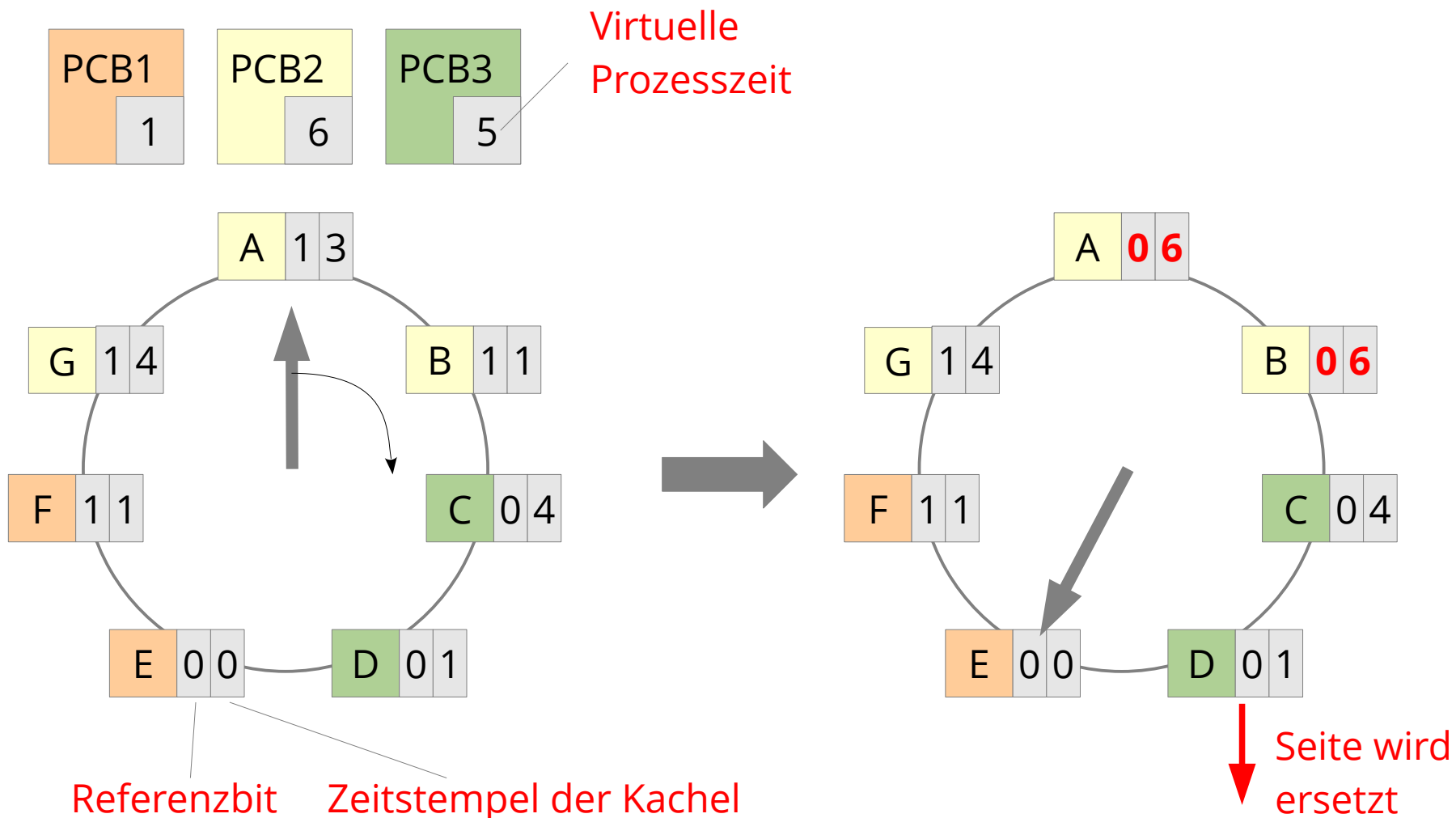
Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock

- 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 der Kachel.

Arbeitsmengenbestimmung mit WSClock

- WSClock-Algorithmus

$$\Delta = 3$$



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
 - $\text{Rate} < \text{Schwellwert}$: Kachelmenge verkleinern
 - $\text{Rate} > \text{Schwellwert}$: Kachelmenge vergrößern

Inhalt

- Wiederholung
- Motivation
- *Demand Paging*
- Seitenersetzung
- Kachelzuordnung
- **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 *Page-Faults* aus.
 - Durch Interpretation des Befehls beim ersten *Page Fault* können die benötigten anderen Seiten im Voraus eingelagert werden. Weitere *Page Faults* werden verhindert.
 - Komplettes *Working Set* bei Prozesseinlagerung im Voraus laden
 - Sequentielle Zugriffsmuster erkennen und Folgeseiten vorab laden

Inhalt

- Wiederholung
- Motivation
- *Demand Paging*
- Seitenersetzung
- Kachelzuordnung
- 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 die FIFO-Anomalie oder „*Thrashing*“)
 - Zeitverhalten nicht vorhersagbar
- ➔ Einfache (Spezialzweck-)Systeme, die diesen „Luxus“ nicht unbedingt benötigen, sollten besser darauf verzichten.