

**Aufgabe 5.7** Erläutern und bewerten Sie die verschiedenen Strategien zur Verdrängung (Ersetzung) von Seiten in einem System mit virtuellem Speicher anhand der folgenden Beispiele. Dabei wird, sofern nicht anders angegeben, jeweils ein physischer Speicher mit vier Rahmen/Kacheln zugrunde gelegt.

- (a) Für die Seitenreferenzfolge  $1 - 2 - 3 - 4 - 1 - 2 - 5 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5$  sind die optimale Seitenersetzung sowie die Strategien FIFO und LRU zu betrachten. Bestimmen Sie zusätzlich für den Algorithmus FIFO die Anzahl der Seitenfehler in dem Fall, dass nur drei Rahmen vorhanden sind. Welches „unnormale“ Verhalten bei FIFO zeigt das Beispiel, wenn die Anzahl der Rahmen vergrößert wird?

# Seitenersetzungsverfahren

## Situation:

- physischer Speicher ist voll (es gibt bestehende Abbildungen auf alle Kacheln)
- Programm greift auf eine Seite zu, für die es noch keine bestehende Abbildung gibt
- Zugriff war zulässig (valider Speicherbereich) → *demand paging* durchführen

## Problem:

- Neue Abbildung von virt. auf phys. muss geschaffen werden
- Welche bestehende Abbildung von Seite auf Kachel soll aufgelöst werden
  - Inhalt der gewählten Kachel wird ausgelagert (*swapped*)

# Seitenersetzungsverfahren

## Situation:

- physischer Speicher ist voll (es gibt bestehende Abbildungen auf alle Kacheln)
- Programm greift auf eine Seite zu, für die es noch keine bestehende Abbildung gibt
- Zugriff war zulässig (valider Speicherbereich) → *demand paging* durchführen

## Problem:

- Neue Abbildung von virt. auf phys. muss geschaffen werden
- Welche bestehende Abbildung von Seite auf Kachel soll aufgelöst werden
  - Inhalt der gewählten Kachel wird ausgelagert (*swapped*)

Seitenersetzung/-verdrängung tritt nur auf, wenn der physische Speicher voll ist und eine *neue* Seite (ohne bestehende Abbildung) verwendet wird.

## Seitenersetzungsverfahren: OPT

Verdränge immer die Seite aus dem Speicher, die am weitesten *in der Zukunft* wieder verwendet wird.

















# Seitenersetzungsverfahren: OPT

<b>OPT</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓							
Rahmen 2		2				✓						
Rahmen 3			3									
Rahmen 4				4			5					
Seitenfehler	X	X	X	X			X					

# Seitenersetzungsverfahren: OPT

<b>OPT</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓			✓				
Rahmen 2		2				✓						
Rahmen 3			3									
Rahmen 4				4			5					
Seitenfehler	X	X	X	X			X					

# Seitenersetzungsverfahren: OPT

<b>OPT</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓			✓				
Rahmen 2		2				✓			✓			
Rahmen 3			3									
Rahmen 4				4			5					
Seitenfehler	X	X	X	X			X					

# Seitenersetzungsverfahren: OPT

<b>OPT</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓			✓				
Rahmen 2		2				✓			✓			
Rahmen 3			3							✓		
Rahmen 4				4			5					
Seitenfehler	X	X	X	X			X					

# Seitenersetzungsverfahren: OPT

<b>OPT</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓			✓			4	
Rahmen 2		2				✓			✓			
Rahmen 3			3							✓		
Rahmen 4				4			5					
Seitenfehler	X	X	X	X			X				X	



# Seitenersetzungsverfahren: OPT

<b>OPT</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓			✓			4	
Rahmen 2		2				✓			✓			
Rahmen 3			3							✓		
Rahmen 4				4			5					✓
Seitenfehler	X	X	X	X			X				X	

## Seitenersetzungsverfahren: OPT

<b>OPT</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓			✓			4	
Rahmen 2		2				✓			✓			
Rahmen 3			3							✓		
Rahmen 4				4			5					✓
Seitenfehler	X	X	X	X			X				X	

**Anzahl Seitenfehler: 6**

## Seitenersetzungsverfahren: FIFO

Verdränge die Seite aus dem Speicher, die als erstes eingelagert wurde.

















## Seitenersetzungsverfahren: FIFO

<b>FIFO</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓		5					
Rahmen 2		2				✓						
Rahmen 3			3									
Rahmen 4				4								
Seitenfehler	X	X	X	X			X					

## Seitenersetzungsverfahren: FIFO

<b>FIFO</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓		5					
Rahmen 2		2				✓		1				
Rahmen 3			3									
Rahmen 4				4								
Seitenfehler	X	X	X	X			X	X				

## Seitenersetzungsverfahren: FIFO

<b>FIFO</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓		5					
Rahmen 2		2				✓		1				
Rahmen 3			3						2			
Rahmen 4				4								
Seitenfehler	X	X	X	X			X	X	X			

## Seitenersetzungsverfahren: FIFO

<b>FIFO</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓		5					
Rahmen 2		2				✓		1				
Rahmen 3			3						2			
Rahmen 4				4						3		
Seitenfehler	X	X	X	X			X	X	X	X		

## Seitenersetzungsverfahren: FIFO

<b>FIFO</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓		5				4	
Rahmen 2		2				✓		1				
Rahmen 3			3						2			
Rahmen 4				4						3		
Seitenfehler	X	X	X	X			X	X	X	X	X	

## Seitenersetzungsverfahren: FIFO

<b>FIFO</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓		5				4	
Rahmen 2		2				✓		1				5
Rahmen 3			3						2			
Rahmen 4				4						3		
Seitenfehler	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X



## Seitenersetzungsverfahren: FIFO

<b>FIFO</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓		5				4	
Rahmen 2		2				✓		1				5
Rahmen 3			3						2			
Rahmen 4				4						3		
Seitenfehler	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X

**Anzahl Seitenfehler: 10**











## Seitenersetzungsverfahren: FIFO

<b>FIFO</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1			4								
Rahmen 2		2			1							
Rahmen 3			3									
Seitenfehler	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>							

## Seitenersetzungsverfahren: FIFO

<b>FIFO</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1			4								
Rahmen 2		2			1							
Rahmen 3			3			2						
Seitenfehler	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>						



## Seitenersetzungsverfahren: FIFO

<b>FIFO</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1			4			5					
Rahmen 2		2			1							
Rahmen 3			3			2						
Seitenfehler	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>					

## Seitenersetzungsverfahren: FIFO

<b>FIFO</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1			4			5					
Rahmen 2		2			1			✓				
Rahmen 3			3			2						
Seitenfehler	X	X	X	X	X	X	X					

## Seitenersetzungsverfahren: FIFO

<b>FIFO</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1			4			5					
Rahmen 2		2			1			✓				
Rahmen 3			3			2			✓			
Seitenfehler	X	X	X	X	X	X	X					

## Seitenersetzungsverfahren: FIFO

<b>FIFO</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1			4			5					
Rahmen 2		2			1			✓		3		
Rahmen 3			3			2			✓			
Seitenfehler	X	X	X	X	X	X	X			X		

## Seitenersetzungsverfahren: FIFO

<b>FIFO</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1			4			5					
Rahmen 2		2			1			✓		3		
Rahmen 3			3			2			✓		4	
Seitenfehler	X	X	X	X	X	X	X			X	X	

## Seitenersetzungsverfahren: FIFO

<b>FIFO</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1			4			5					✓
Rahmen 2		2			1			✓		3		
Rahmen 3			3			2			✓		4	
Seitenfehler	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	

## Seitenersetzungsverfahren: FIFO

<b>FIFO</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1			4			5					✓
Rahmen 2		2			1			✓		3		
Rahmen 3			3			2			✓		4	
Seitenfehler	X	X	X	X	X	X	X			X	X	

**Anzahl Seitenfehler: 9**

## Seitenersetzungsverfahren: LRU

Verdränge die Seite aus dem Speicher, die *in der Vergangenheit am längsten nicht verwendet* wurde.



## Seitenersetzungsverfahren: LRU

Verdränge die Seite aus dem Speicher, die *in der Vergangenheit am längsten nicht verwendet* wurde.

Nicht zu verwechseln mit LFU (*least frequently used*) = ... die Seite, die am wenigst häufigsten verwendet wird.

















<b>LRU</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓							
Rahmen 2		2				✓						
Rahmen 3			3				5					
Rahmen 4				4								
Seitenfehler	X	X	X	X			X					

<b>LRU</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓			✓				
Rahmen 2		2				✓						
Rahmen 3			3				5					
Rahmen 4				4								
Seitenfehler	X	X	X	X			X					

<b>LRU</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓			✓				
Rahmen 2		2				✓			✓			
Rahmen 3			3				5					
Rahmen 4				4								
Seitenfehler	X	X	X	X			X					

<b>LRU</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓			✓				
Rahmen 2		2				✓			✓			
Rahmen 3			3				5					
Rahmen 4				4						3		
Seitenfehler	X	X	X	X			X			X		

<b>LRU</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓			✓				
Rahmen 2		2				✓			✓			
Rahmen 3			3				5				4	
Rahmen 4				4						3		
Seitenfehler	X	X	X	X			X			X	X	

<b>LRU</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓			✓				5
Rahmen 2		2				✓			✓			
Rahmen 3			3				5				4	
Rahmen 4				4						3		
Seitenfehler	X	X	X	X			X			X	X	X

<b>LRU</b>	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Rahmen 1	1				✓			✓				5
Rahmen 2		2				✓			✓			
Rahmen 3			3				5				4	
Rahmen 4				4						3		
Seitenfehler	X	X	X	X			X			X	X	X

**Anzahl Seitenfehler: 8**

# Bewertung

## OPT

- Basiert auf Wissen von der Zukunft → nicht implementierbar
- Dient als theoretische Unterschranke

## FIFO

- Nutzt kein Wissen über Referenzverhalten eines Programms (*Lokalitätsverhalten*)
- sehr einfach implementierbar, aber im Durchschnitt schlechtestes Verhalten
- Auftreten der **Beladeschen** Anomalität ( $\Rightarrow$  mehr Seitenfehler bei mehr Speicher)

## LRU/LFU

- Gute Näherung an OPT Verfahren
- Implementierung jedoch sehr aufwändig (komplettes Referenzverhalten muss gespeichert werden, volle Suche)



- (b) Eine Variante von FIFO, die auch das Referenzverhalten der Prozesse berücksichtigt, ist der Second-Chance- bzw. Clock-Algorithmus. Diskutieren Sie diesen Algorithmus für die Referenzfolge  $1 - 2 - 3 - 4 - 2 - 3 - 5 - 2 - 3 - 1 - 2 - 4$ .

# Clock-Algorithmus

## Idee und Voraussetzungen

- Annäherung an LRU-Verfahren mittels rudimentären Zugriffsverhalten
- MMU vermerkt Zugriffe auf Seiten in *Accessed-Bit* der Seitentabelle
- OS verdrängt Seiten auf die nicht zugegriffen wurde (*Accessed-Bit* nicht gesetzt)
- OS merkt sich zugehörigen Rahmen der letzten verdrängten Seite – schaut von dort weiter bei nächster Verdrängung ( $\Rightarrow$  Zeigerstelle)

## Funktionsweise

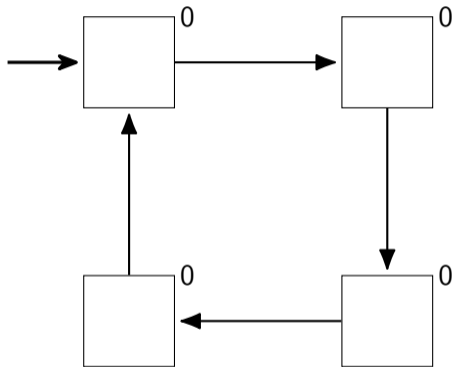
- *Accessed-Bit* gesetzt für Seite an aktueller Zeigerstelle?
  - Ja  $\rightarrow$  Bit in Seitentabelle zurück setzen, zu nächsten Rahmen weiter rutschen
  - Nein  $\rightarrow$  Verdrängungskandidat gefunden
    - Alte Seite auslagern (*swapping*)
    - Neue Seite einlagern + *Accessed-Bit* setzen
    - Zeigerstelle einen Rahmen weiter rutschen

Zugriff

Reihenfolge

Seitenfehler?

Verdrängung?



- 1
- 2
- 3
- 4
- 2
- 3
- 5
- 2
- 3
- 1
- 2
- 4

**Zugriff**

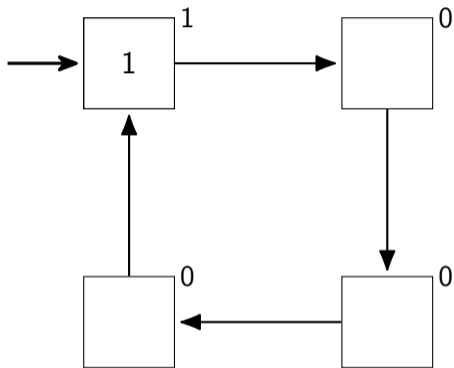
1

**Seitenfehler?**

Ja

**Verdrängung?**

Nein



**Reihenfolge**

1 ←

2

3

4

2

3

5

2

3

1

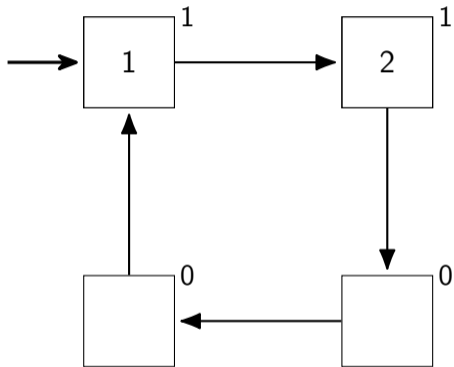
2

4

**Zugriff**  
2

**Seitenfehler?**  
Ja

**Verdrängung?**  
Nein



**Reihenfolge**

- 1
- 2 ←
- 3
- 4
- 2
- 3
- 5
- 2
- 3
- 1
- 2
- 4

**Zugriff**

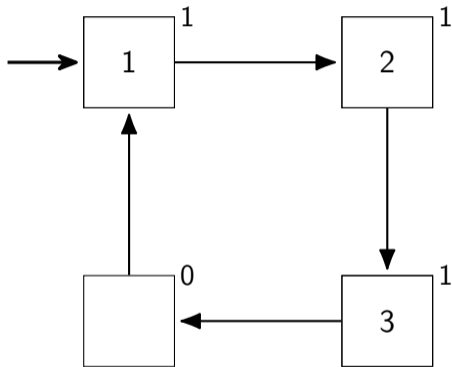
3

**Seitenfehler?**

Ja

**Verdrängung?**

Nein



**Reihenfolge**

1

2

3 ←

4

2

3

5

2

3

1

2

4

**Zugriff**

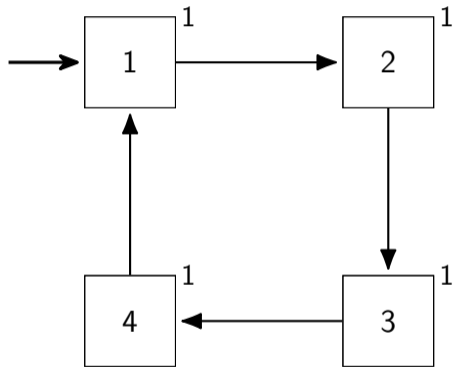
4

**Seitenfehler?**

Ja

**Verdrängung?**

Nein



**Reihenfolge**

1

2

3

4 ←

2

3

5

2

3

1

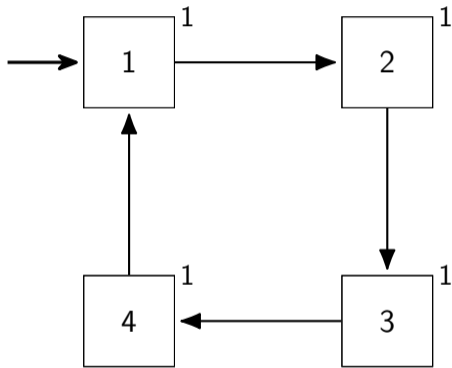
2

4

**Zugriff**  
2

**Seitenfehler?**  
Nein

**Verdrängung?**  
Nein



**Reihenfolge**

1

2

3

4

2 ←

3

5

2

3

1

2

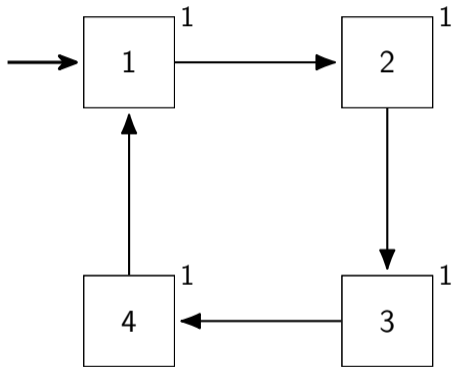
4



**Zugriff**  
3

**Seitenfehler?**  
Nein

**Verdrängung?**  
Nein



**Reihenfolge**

- 1
- 2
- 3 ←
- 4
- 2
- 3
- 1
- 2
- 4

**Zugriff**

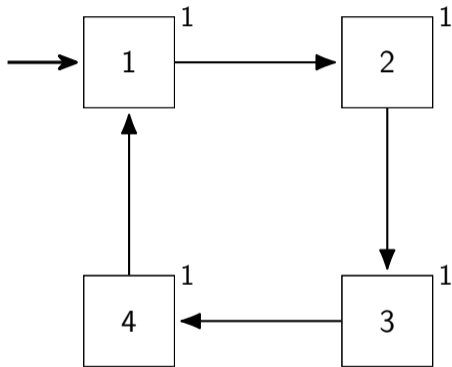
5

**Seitenfehler?**

Ja

**Verdrängung?**

Ja



**Reihenfolge**

1

2

3

4

2

3

5 ←

2

3

1

2

4

**Zugriff**

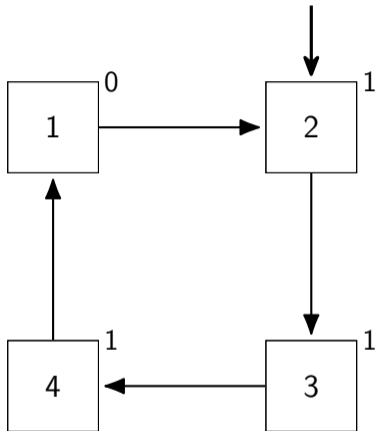
5

**Seitenfehler?**

Ja

**Verdrängung?**

Ja



**Reihenfolge**

1

2

3

4

2

3

5 ←

2

3

1

2

4

**Zugriff**

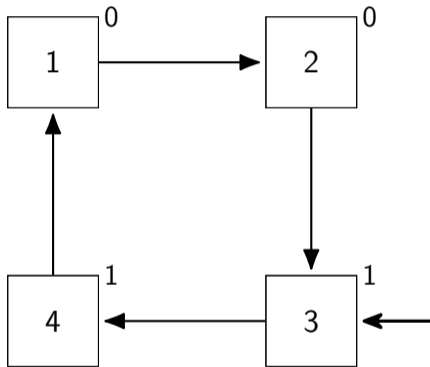
5

**Seitenfehler?**

Ja

**Verdrängung?**

Ja



**Reihenfolge**

1

2

3

4

2

3

5 ←

2

3

1

2

4

**Zugriff**

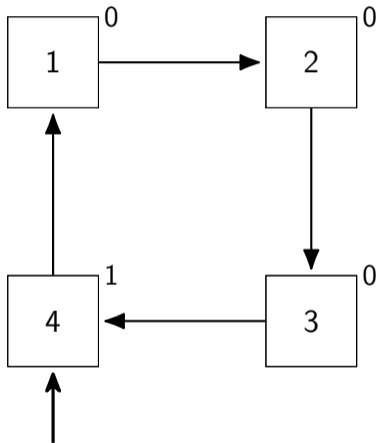
5

**Seitenfehler?**

Ja

**Verdrängung?**

Ja



**Reihenfolge**

1

2

3

4

2

3

5 ←

2

3

1

2

4

**Zugriff**

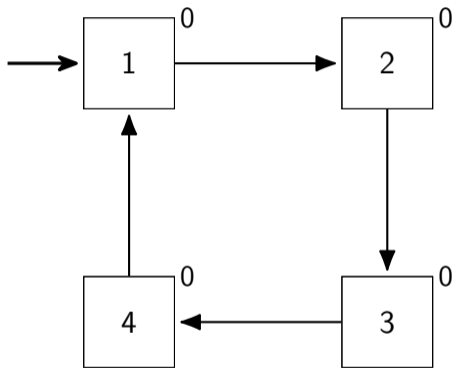
5

**Seitenfehler?**

Ja

**Verdrängung?**

Ja



**Reihenfolge**

1

2

3

4

2

3

5 ←

2

3

1

2

4

**Zugriff**

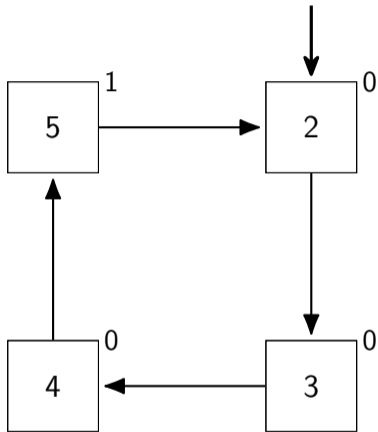
5

**Seitenfehler?**

Ja

**Verdrängung?**

Ja



**Reihenfolge**

1

2

3

4

2

3

5 ←

2

3

1

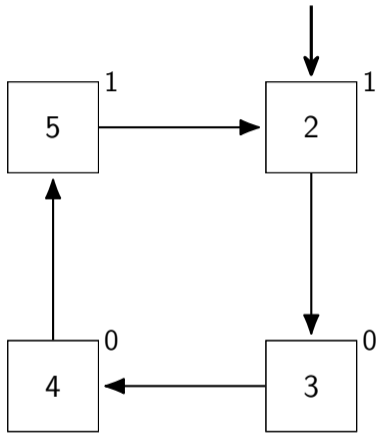
2

4

**Zugriff**  
2

**Seitenfehler?**  
Nein

**Verdrängung?**  
Nein



**Reihenfolge**

1

2

3

4

2

3

5

2 ←

3

1

2

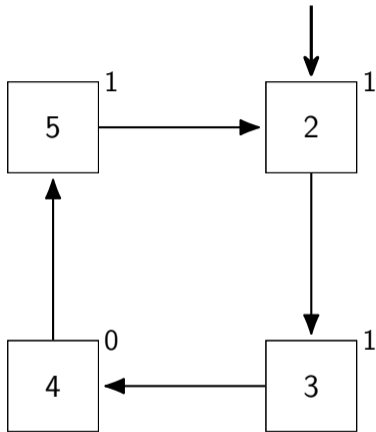
4



**Zugriff**  
3

**Seitenfehler?**  
Nein

**Verdrängung?**  
Nein



**Reihenfolge**

- 1
- 2
- 3
- 4
- 2
- 3
- 5
- 2
- 3 ←
- 1
- 2
- 4

**Zugriff**

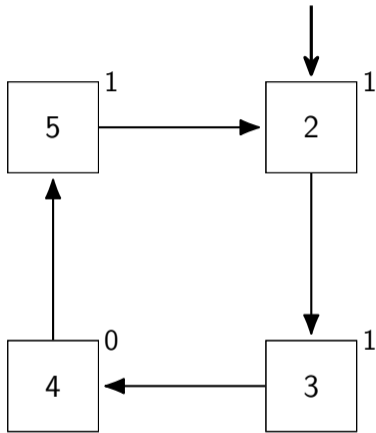
1

**Seitenfehler?**

Ja

**Verdrängung?**

Ja



**Reihenfolge**

1

2

3

4

2

3

5

2

3

1 ←

2

4

**Zugriff**

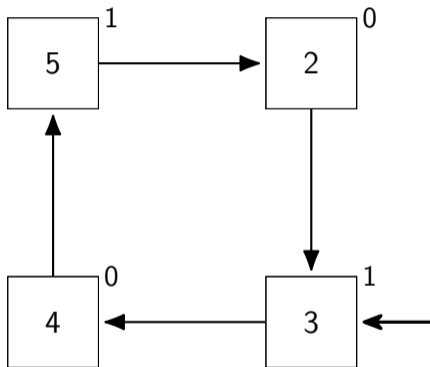
1

**Seitenfehler?**

Ja

**Verdrängung?**

Ja



**Reihenfolge**

1

2

3

4

2

3

5

2

3

1 ←

2

4

**Zugriff**

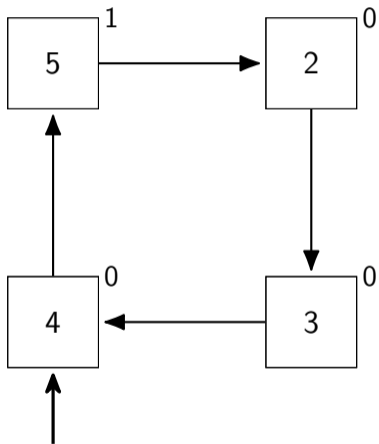
1

**Seitenfehler?**

Ja

**Verdrängung?**

Ja



**Reihenfolge**

1

2

3

4

2

3

5

2

3

1 ←

2

4

**Zugriff**

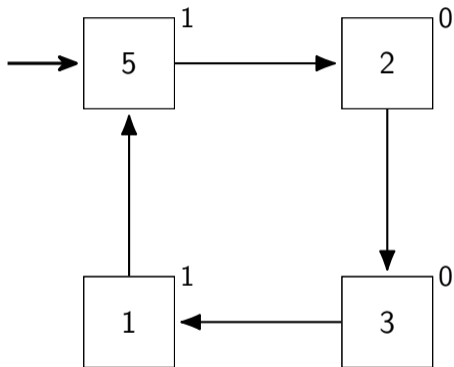
1

**Seitenfehler?**

Ja

**Verdrängung?**

Ja



**Reihenfolge**

1

2

3

4

2

3

5

2

3

1 ←

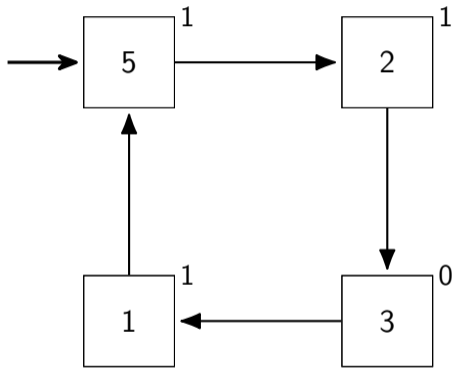
2

4

**Zugriff**  
2

**Seitenfehler?**  
Nein

**Verdrängung?**  
Nein



**Reihenfolge**

1

2

3

4

2

3

5

2

3

1

2 ←

4

**Zugriff**

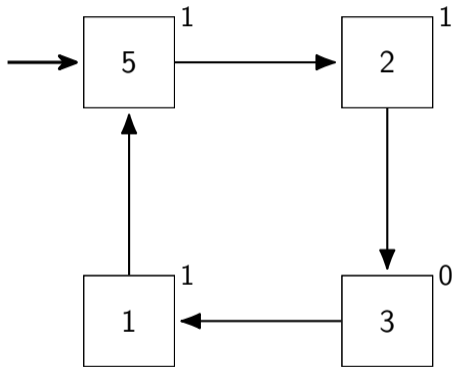
4

**Seitenfehler?**

Ja

**Verdrängung?**

Ja



**Reihenfolge**

1

2

3

4

2

3

5

2

3

1

2

4

←

**Zugriff**

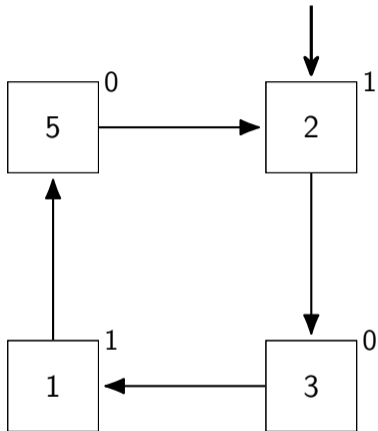
4

**Seitenfehler?**

Ja

**Verdrängung?**

Ja



**Reihenfolge**

1

2

3

4

2

3

5

2

3

1

2

4

←



**Zugriff**

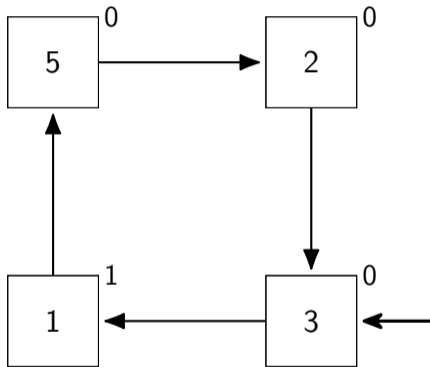
4

**Seitenfehler?**

Ja

**Verdrängung?**

Ja



**Reihenfolge**

1

2

3

4

2

3

5

2

3

1

2

4

←

**Zugriff**

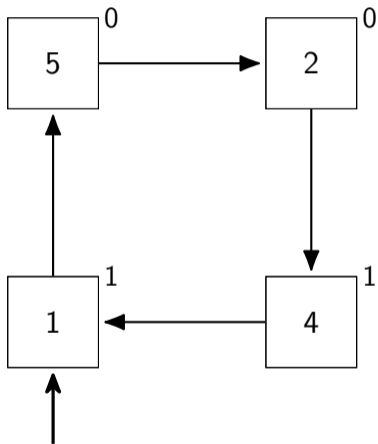
4

**Seitenfehler?**

Ja

**Verdrängung?**

Ja



**Reihenfolge**

1

2

3

4

2

3

5

2

3

1

2

4

←

# Clock-Algorithmus

## Bewertung

- Berücksichtigt Referenzverhalten von Prozessen (→ gute Näherung an LRU)
- Einfache Implementierung
  - 1 Zeiger (in Realität eigentlich 2 Zeiger)
  - Setzen und Löschen des Accessed-Bit
- Nicht *fair* zwischen mehreren Prozessen
  - Fehlende Zuordnung von Rahmen/Seiten zu Prozessen
  - Ein Prozess kann kompletten physischen Speicher übernehmen

- (c) Aufgrund der Seitenreferenzen dreier Prozesse möge sich die in unten stehender Abbildung dargestellte resultierende Referenzfolge ergeben. Erläutern Sie an diesem Beispiel den Begriff „Arbeitsmenge“. Tragen Sie in der Tabelle die entstehende Speicherbelegung ein unter der Annahme, dass fünf Rahmen verfügbar sind und dass jeder Prozess einen Arbeitsmengenparameter (Fenstergröße) von 2 Seiten besitzt. Erklären Sie ferner den Thrashing-Effekt.

# Arbeitsmengenmodell

## Idee und Voraussetzungen

- Nutze Referenzverhalten der Prozesse für Ersetzungsentscheidungen
- Zugriffe werden für jeden Prozess einzeln aufgezeichnet ( $\rightarrow$  Arbeitsmenge)
- Alle Seiten, die innerhalb der letzten  $n$  Zugriffe ( $\rightarrow$  Fenstergröße) verwendet wurden, werden nicht verdrängt

## Funktionsweise

- Aktualisiere bei jedem Zugriff Arbeitsmenge des Prozesses
  - Liste der letzten  $n$  Zugriffe des Prozesses
  - Bei mehrfachen Zugriffen auf die gleiche Seite keine Doppelnennung
- Markiere Kachel von Seiten, die nicht mehr in der AM sind als ersetzbar
- Aktuell Seite ohne Abbildung auf Kachel und Speicher voll?
  - ① Versuche eigene als *ersetzbar* markierte Seiten zu verdrängen  $\Rightarrow$  lokale Verdrängung
  - ② Versuche als ersetzbar markierte Seiten von anderen Prozessen zu verdrängen  $\Rightarrow$  globale Verdrängung

















































# Arbeitsmengenmodell

## Bewertung

- Berücksichtigt Referenzverhalten von Prozessen (→ gute Näherung an LRU)
- Fair zwischen mehreren Prozessen
  - Getrennte *Aufzeichnung* des Referenzverhalten der jeweiligen Prozesse
  - Bevorzugung von lokaler Verdrängung gegenüber globaler
- Aufwändige Implementierung
  - Speichern + Aktualisierung der Arbeitsmenge der Prozesse
  - Jeder Speicherzugriff muss aufgezeichnet werden (geht auch bloß periodisch)