

Stärkere Speicherprimitive

Prof. Dr. David Sabel

LFE Theoretische Informatik



Übersicht: Stärkere Speicheroperationen

- 1 Übersicht über die Operationen
- 2 Mutual-Exclusion-Algorithmen mit test-and-set-Bits
- 3 Ein Mutual-Exclusion-Algorithmus mit RMW-Objekt
- 4 Der MCS Queue-basierte Algorithmus mit Compare and Swap

- Nur Lesen und Schreiben sind atomare (unteilbare) Operationen
- atomare Leseoperation: `if x = 10 then ...`
Meinte eigentlich `if read(x) = 10 then ...`
- atomare Schreiboperation: `x := 10`
Meint eigentlich `write(x, 10)`

- Hardware unterstützt verschiedene stärkere Speicheroperationen
- Formal stellen wir diese Operationen als Funktionen dar

```
function xyz( $p_1 : \mathbf{Typ}_1, \dots, p_n : \mathbf{Typ}_n \dots$ ) returns :  $\mathbf{Typ}$ 
```

“atomare Ausführung des Rumpfs”

```
end function
```

- Hardware unterstützt verschiedene stärkere Speicheroperationen
- Formal stellen wir diese Operationen als Funktionen dar

Funktionsname

Parameter mit Typen

Rückgabetyt

```
function xyz( $p_1 : \mathbf{Typ}_1, \dots, p_n : \mathbf{Typ}_n \dots$ ) returns :  $\mathbf{Typ}$ 
```

“atomare Ausführung des Rumpfs”

```
end function
```

- **Register** = gemeinsames Speicherregister
- **Lokales Register** = lokales Speicherregister
- **Wert** = ein Wert wie True, 1, (keine weitere Unterscheidung)
- **Funktion** = eine Seiteneffekt-freie Funktion auf Werten

Read und Write in der Funktionsnotation

read(r)

```
function read( $r$  : Register) returns : Wert  
  return( $r$ ) :  
end function
```

write(r, v)

```
function write( $r$  : Register,  $v$  : Wert)  
   $r := v$   
end function
```


Read und Write in der Funktionsnotation

read(r)

```
function read( $r$  : Register) returns : Wert  
  return( $r$ ) :  
end function
```

write(r, v)

```
function write( $r$  : Register,  $v$  : Wert)  
   $r := v$   
end function
```



kein returns, da kein Rückgabewert!

“Nebenläufiges Objekt”:

Nebenläufige Datenstruktur mit atomaren Operationen

“Nebenläufiges Objekt”:

Nebenläufige Datenstruktur mit atomaren Operationen

Beispiel:

Atomares Speicherregister (als Objekt)

Gemeinsames Speicherregister mit

- atomarer *read*-Operation
- atomarer *write*-Operation

Test-and-set

test-and-set(r, v)

Wert v wird dem Register r zugewiesen, Rückgabewert: **alter** Wert von r .

```
function test-and-set( $r$  : Register,  $v$  : Wert) returns : Wert  
     $temp := r$ ;  
     $r := v$ ;  
    return( $temp$ );  
end function
```

test-and-set(r, v)

Wert v wird dem Register r zugewiesen, Rückgabewert: **alter** Wert von r .

```
function test-and-set( $r$  : Register,  $v$  : Wert) returns : Wert  
     $temp := r$ ;  
     $r := v$ ;  
    return( $temp$ );  
end function
```

Variante: Register, darf nur 0 oder 1 sein.

```
function test-and-set( $r$  : Register) returns : Wert  
     $temp := r$ ;  
     $r := 1$ ;  
    return( $temp$ ) :  
end function
```

Test-and-Set-Objekt

Test-and-set-Objekt

Ein gemeinsames Speicherregister mit

- *write*-Operation
- *test-and-set*-Operationen

Test-and-set-Bit

Ein gemeinsames Speicherregister mit Werten 0 und 1

- alternative *test-and-set*-Operationen setzt Register auf 1
- *reset*-Operation: atomares Schreiben einer 0 in das Register,

Test-and-test-and-set-Objekt

Ein Test-and-set Objekt, das zusätzlich die atomare *read*-Operation unterstützt

swap

Wert von lokalem Register mit gemeinsamen Register tauschen:

```
function swap(r : Register, l : Lokales Register)  
    temp := r;  
    r := l;  
    l := temp;  
end function
```

wird manchmal auch als *fetch-and-store* bezeichnet.

Swap-Objekt

Ein gemeinsames Speicherregister mit

- *swap*-Operation zwischen dem Register und jedem beliebigen lokalen Register unterstützt.

fetch-and-add

Erhöhen des Registerwerts um v , Rückgabe: alter Wert

```
function fetch-and-add( $r$  : Register,  $v$  : Wert) returns : Wert  
     $temp := r$ ;  
     $r := temp + v$ ;  
    return( $temp$ );  
end function
```

Variante: *fetch-and-increment*: genau 1 wird dazu addiert

Fetch-and-increment-Objekt

Ein gemeinsames Speicherregister mit

- *fetch-and-increment*-Operation
- *write*-Operation
- *read*-Operation

Fetch-and-add-Objekt

Ein gemeinsames Speicherregister mit

- *fetch-and-add*-Operation
- *write*-Operation
- *read*-Operation

read-modify-write

Anwenden einer Funktion auf Registerwert. Rückgabe: alter Wert.

```
function read-modify-write(r : Register, f : Funktion)  
  returns : Wert  
  temp := r;  
  r := f(temp);  
  return(temp);  
end function
```

read-modify-write

Anwenden einer Funktion auf Registerwert. Rückgabe: alter Wert.

```
function read-modify-write(r : Register, f : Funktion)
  returns : Wert
  temp := r;
  r := f(temp);
  return(temp);
end function
```

Beachte:

- *read*, *write*, *test-and-set* und *fetch-and-add* können alle mittels *read-modify-write* ausgedrückt werden
- Funktion *f* muss Seiteneffekt-frei sein.
Z.B.-: *f* eine atomare Operation wie *fetch-and-increment*
⇒ unklar was atomar ausgeführt wird? Deswegen: Verboten!

Read-Modify-Write-Objekt

Ein gemeinsames Speicherregister mit

- *read-modify-write*-Operation
- *write*-Operation
- *read*-Operation

compare-and-swap

Operation erwartet (r,old,new):

Wenn $r=old$, dann neuer Wert für r und Rückgabe True, sonst Rückgabe False

```
function compare-and-swap(r : Register, old : Wert, new : Wert)
  returns : Wert
  if r = old then
    r := new;
    return(True);
  else
    return(False);
end function
```

Compare-and-swap-Objekt

Ein gemeinsames Speicherregister mit

- *compare-and-swap*-Operation
- *write*-Operation
- *read*-Operation

sticky-write

- $sticky-write(r, v)$ erwartet ein Register und einen Wert.
- Initialwert von r : undefiniert (geschrieben als \perp).
- Wenn der Wert des Registers r gleich zu v oder \perp , dann Wert wird auf v gesetzt, True als Ergebnis geliefert.
- sonst: False als Ergebnis

Variante

sticky-bit-write-Operation

Spezialfall: r kann nur die Wert 0, 1 und \perp annehmen

Sticky-Bit

Ein gemeinsames Speicherregister mit

- *read*-Operation
- *sticky-bit-write*-Operation

move

Wert eines gemeinsamen Registers wird in weiteres gemeinsames Register „verschoben“

```
function move( $r_1$  : Register,  $r_2$  : Register)  
    temp :=  $r_2$ ;  
     $r_1$  := temp;  
end function
```

Move-Objekt

Gruppe von gemeinsamen Speicherregistern, so dass

- paarweise die *move*-Operation unterstützt wird
- *write*-Operation für alle Register
- *read*-Operation für all Register

shared swap

Zwei gemeinsame Register tauschen den Wert

```
function shared-swap( $r_1$  : Register,  $r_2$  : Register)  
     $temp_1 := r_1$ ;  
     $temp_2 := r_2$ ;  
     $r_1 := temp_2$ ;  
     $r_2 := temp_1$ ;  
end function
```

Shared-swap-Objekt

Gruppe von gemeinsamen Speicherregistern, mit

- paarweise: die *shared-swap*-Operation
- *write*-Operation
- *read*-Operation

Mutual-Exclusion-Algorithmen mit test-and-set-Bits

Test-and-set-Bit = Lock (Sperre)

Ein gemeinsames Speicherregister mit Werten 0 und 1

- *test-and-set*-Operationen setzt Register auf 1
Operation wird auch *lock* genannt
- *reset*-Operation: atomares Schreiben einer 0
Operation wird auch *unlock* genannt

Spin-Lock

Algorithmen benutzen Locks oft so:

```
while test-and-set(lock)=1 do skip;
```

D.h. der Algorithmus "kreiselt" um den Lock.

Daher der Name **Spin-Lock**

Einfacher Algorithmus mit Test-and-Set-Bit

Initial: Test-and-set-Bit x hat Wert 0

Programm des i . Prozesses

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set( $x$ )=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset( $x$ );
end loop
```

Beispiel: 4 Prozesse

Prozess 1

```
loop forever
(1) restlicher Code
(2) await (test-and-set(x)=0);
(3) Kritischer Abschnitt
(4) reset(x);
end loop
```

Prozess 2

```
loop forever
(1) restlicher Code
(2) await (test-and-set(x)=0);
(3) Kritischer Abschnitt
(4) reset(x);
end loop
```

x :=

Prozess 3

```
loop forever
(1) restlicher Code
(2) await (test-and-set(x)=0);
(3) Kritischer Abschnitt
(4) reset(x);
end loop
```

Prozess 4

```
loop forever
(1) restlicher Code
(2) await (test-and-set(x)=0);
(3) Kritischer Abschnitt
(4) reset(x);
end loop
```


Beispiel: 4 Prozesse

Prozess 1

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Prozess 2

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

x := 1
return von t-a-s: 0

Prozess 3

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Prozess 4

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Beispiel: 4 Prozesse

Prozess 1

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Prozess 2

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

$x := 1$

Prozess 3

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Prozess 4

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Beispiel: 4 Prozesse

Prozess 1

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Prozess 2

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

x := 1
return von t-a-s: 1

Prozess 3

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Prozess 4

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Beispiel: 4 Prozesse

Prozess 1

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Prozess 2

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

x := 1
return von t-a-s: 1

Prozess 3

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Prozess 4

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Beispiel: 4 Prozesse

Prozess 1

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Prozess 2

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

x := 0

Prozess 3

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Prozess 4

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Beispiel: 4 Prozesse

Prozess 1

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Prozess 2

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

x := 1
return von t-a-s: 0

Prozess 3

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Prozess 4

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Beispiel: 4 Prozesse

Prozess 1

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Prozess 2

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

x := 1

Prozess 3

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Prozess 4

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (test-and-set(x)=0);
(3)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

Eigenschaften des einfachen Algorithmus

- Garantiert **wechselseitigen Ausschluss**:
 - Nur ein Prozess kann atomar x von 0 auf 1 setzen und dabei 0 als Ergebnis erhalten
 - Solange $x=1$ gilt, erhalten alle anderen Prozesse das Ergebnis 1
 - Erst nach atomarem *reset* kann der nächste Prozess den Lock setzen
- ist **Deadlock-frei**
 - Wenn mehrere Prozesse im Initialisierungscode und keiner im kritischen Abschnitt, dann muss $x=0$ nach endlich vielen Schritten gelten
 - Danach: Einer muss nach endlichen vielen Schritten den Lock setzen
- ist **nicht** Starvation-frei

Eigenschaften des einfachen Algorithmus (2)

- Aus **praktischer** Sicht schlecht:
Bei vielen Prozessen: Lock wird ständig (von 1 auf 1) gesetzt
- Durch das ständige Schreiben müssen Prozessor-Caches auch ständig aktualisiert werden!
- Das führt zu (unnötigem) Kommunikationsaufwand!

Verbesserung mit Test-and-Test-and-Set-Bit

Initial: Test-and-test-and-set-Bit x hat Wert 0

Programm des i . Prozesses

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  await (x=0);
(3)  while (test-and-set(x)=1) do
(4)    await (x=0);
(5)  Kritischer Abschnitt
(4)  reset(x);
end loop
```

- Er wird **lesend** gewartet
- Nur wenn Chance zum Setzen des Locks vorhanden: test-and-set

(Praktische) Verbesserung mit Pause-Operation

Initial: Test-and-test-and-set-Bit x hat Wert 0, delay: lokale Variable, minDelay, maxDelay: Konstanten

Programm des i. Prozesses

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  delay=minDelay;
(3)  repeat
(4)    delay := min(2*delay,maxDelay)
(5)    while (x=1) do pause(delay);
(6)  until (test-and-set(x)=0)
(7)  Kritischer Abschnitt
(8)  reset(x);
end loop
```

- pause(x) wartet x ms
- Wartezeit wird exponentiell erhöht ("exponential backoff")
- Nur erhöhen, wenn Lock frei war, aber nicht geschnappt wurde

Starvation-freier Algorithmus mit Test-and-Set

- Veröffentlicht: R. Alur und G. Taubenfeld 1993
- Starvation-frei
- erfüllt die Eigenschaft **n -Fairness** (n = Anzahl der Prozesse)

r -Fairness

Ein wartender Prozess hat die Möglichkeit den kritischen Abschnitt zu betreten, bevor alle anderen Prozesse **gemeinsam** den kritischen Abschnitt $r + 1$ -mal betreten können.

Beachte:

- r -Fairness impliziert r -bounded waiting
- r -bounded waiting impliziert $((n - 1) \cdot r)$ -Fairness

Starvation-freier Algorithmus mit Test-and-Set (2)

Programm des i. Prozesses

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  waiting[i]:=True;
(3)  key := 1;
(4)  while (waiting[i] and key=1) do
(5)    key := test-and-set(lock);
(6)  waiting[i]:=False;
(7)  Kritischer Abschnitt
(8)  if turn=i
(9)    then lturn := 1 + (turn mod n);
(10)   else lturn := turn
(11)   if waiting[lturn]
(12)   then turn := lturn;
(13)     waiting[lturn] := False;
(14)   else turn := 1+(lturn mod n);
(15)     reset(lock);
end loop
```

Initial:

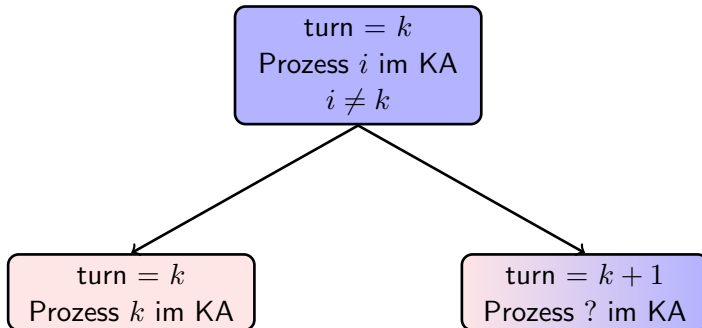
```
turn: atom. Register, Wert egal (zwischen 1..n);
Test-and-set-Bit lock: 0;
waiting[i]: False;
lturn, key: lokale Register
```

Starvation-freier Algorithmus mit Test-and-Set (2)

- Variable `turn` hält Nummer eines Prozesses
- Trick: im Abschlusscode
- Lock wird „übergeben“ an Prozess mit der Nummer `turn`,
wenn er wartet
- das geschieht ohne `reset`, sondern über `waiting`
- (Wenn `turn` aktueller Prozess, dann wird vorher inkrementiert)
- Wenn Prozess `turn` nicht wartet, dann `turn` erhöhen und `reset`
- Nach höchstens `n` mal Abschlusscode insgesamt
gilt: `turn = j` (nächste Folie)

Beweis der n -Fairness

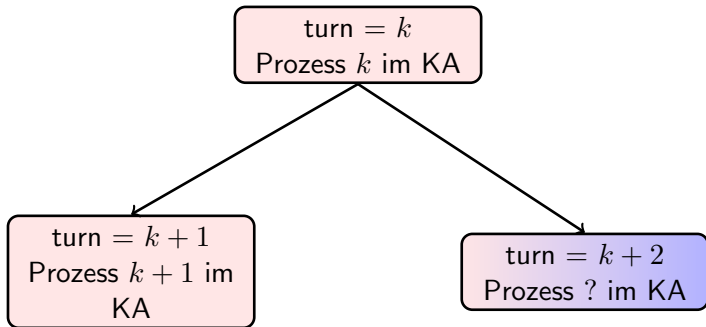
Zwei Fälle: Fall 1:



Rote Knoten = Prozess u im kritischen Abschnitt und $\text{turn} = u$
Blaue Knoten = Prozess u im kritischen Abschnitt und $\text{turn} \neq u$
Rot/Blau = Beides möglich

Beweis der n -Fairness (2)

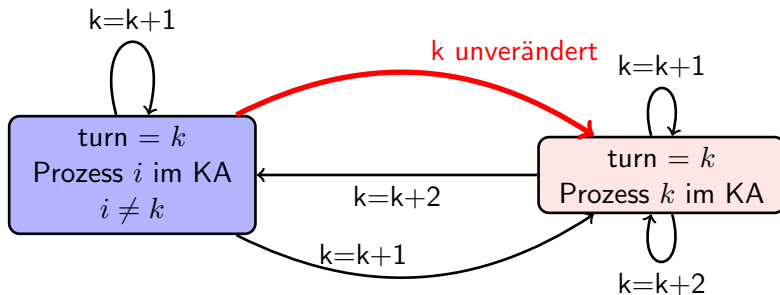
Zwei Fälle: Fall 2:



Rote Knoten = Prozess u im kritischen Abschnitt und $\text{turn} = u$
Blaue Knoten = Prozess u im kritischen Abschnitt und $\text{turn} \neq u$
Rot/Blau = Beides möglich

Beweis der n -Fairness (3)

Vereinigung der Fälle:



Roter Pfeil kann erst wieder gewählt werden, wenn turn um 2 erhöht wurde!

Mutual-Exclusion-Algorithmus mit RMW-Objekt

Ticket-Algorithmus mit RMW-Objekt

- M.J. Fischer, N.A. Lynch, J.E. Burns, A. Borodin 1989
- Idee ähnlich zum Bakery-Algorithmus („Nummern ziehen“).
- Feste Anzahl an Nummern reicht jedoch aus.

Ticket-Algorithmus mit RMW-Objekt (2)

Initial: (ticket,valid): Read-Modify-Write Objekt für ein Paar von Zahlen im Bereich $1 \dots n$ wobei initial
ticket = valid (ticket_i, valid_i) lokales Register

Programm des i. Prozesses

```
loop forever
(1)  restlicher Code
      // erhöhe ticket (lese alte Werte):
(2)  (ticketi,validi) := read-modify-write((ticket,valid), inc-fst)
(3)  while ticketi ≠ validi do
(4)      validi := valid;
(5)  Kritischer Abschnitt
(6)  read-modify-write((ticket,valid), inc-snd) // erhöhe valid
end loop
```

Funktionen

```
function inc-fst((a,b))
  return (1+(a mod n), b)
end function
```

```
function inc-snd((a,b))
  return (a, 1+(b mod n))
end function
```

Beispiel

Prozess 1

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_1, v_1) := r-m-w((t, v), inc-fst)$
 - (3) while $t_1 \neq v_1$ do
 - (4) $v_1 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r-m-w((t, v), inc-snd)$
- $t_1 = ?$
 $v_1 = ?$

Prozess 2

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_2, v_2) := r-m-w((t, v), inc-fst)$
 - (3) while $t_2 \neq v_2$ do
 - (4) $v_2 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r-m-w((t, v), inc-snd)$
- $t_2 = ?$
 $v_2 = ?$

Prozess 3

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_3, v_3) := r-m-w((t, v), inc-fst)$
 - (3) while $t_3 \neq v_3$ do
 - (4) $v_3 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r-m-w((t, v), inc-snd)$
- $t_3 = ?$
 $v_3 = ?$

$t = 1$
 $v = 1$

Beispiel

Prozess 1

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_1, v_1) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) while $t_1 \neq v_1$ do
 - (4) $v_1 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_1 = ?$
 $v_1 = ?$

Prozess 2

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_2, v_2) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) while $t_2 \neq v_2$ do
 - (4) $v_2 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_2 = ?$
 $v_2 = ?$

Prozess 3

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_3, v_3) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) while $t_3 \neq v_3$ do
 - (4) $v_3 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_3 = 1$
 $v_3 = 1$

$t = 2$
 $v = 1$

Beispiel

Prozess 1

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_1, v_1) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) while $t_1 \neq v_1$ do
 - (4) $v_1 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_1 = 2$
 $v_1 = 1$

Prozess 2

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_2, v_2) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) while $t_2 \neq v_2$ do
 - (4) $v_2 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_2 = ?$
 $v_2 = ?$

Prozess 3

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_3, v_3) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) while $t_3 \neq v_3$ do
 - (4) $v_3 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_3 = 1$
 $v_3 = 1$

$t = 3$
 $v = 1$

Beispiel

Prozess 1

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_1, v_1) := r-m-w((t, v), inc-fst)$
 - (3) while $t_1 \neq v_1$ do
 - (4) $v_1 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r-m-w((t, v), inc-snd)$
- $t_1 = 2$
 $v_1 = 1$

Prozess 2

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_2, v_2) := r-m-w((t, v), inc-fst)$
 - (3) while $t_2 \neq v_2$ do
 - (4) $v_2 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r-m-w((t, v), inc-snd)$
- $t_2 = 3$
 $v_2 = 1$

Prozess 3

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_3, v_3) := r-m-w((t, v), inc-fst)$
 - (3) while $t_3 \neq v_3$ do
 - (4) $v_3 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r-m-w((t, v), inc-snd)$
- $t_3 = 1$
 $v_3 = 1$

$t = 1$
 $v = 1$

Beispiel

Prozess 1

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_1, v_1) := r-m-w((t, v), inc-fst)$
 - (3) while $t_1 \neq v_1$ do
 - (4) $v_1 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r-m-w((t, v), inc-snd)$
- $t_1 = 2$
 $v_1 = 1$

Prozess 2

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_2, v_2) := r-m-w((t, v), inc-fst)$
 - (3) while $t_2 \neq v_2$ do
 - (4) $v_2 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r-m-w((t, v), inc-snd)$
- $t_2 = 3$
 $v_2 = 1$

Prozess 3

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_3, v_3) := r-m-w((t, v), inc-fst)$
 - (3) while $t_3 \neq v_3$ do
 - (4) $v_3 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r-m-w((t, v), inc-snd)$
- $t_3 = 1$
 $v_3 = 1$

$t = 1$
 $v = 1$

Beispiel

Prozess 1

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_1, v_1) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) while $t_1 \neq v_1$ do
 - (4) $v_1 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_1 = 2$
 $v_1 = 1$

Prozess 2

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_2, v_2) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) while $t_2 \neq v_2$ do
 - (4) $v_2 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_2 = 3$
 $v_2 = 1$

Prozess 3

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_3, v_3) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) while $t_3 \neq v_3$ do
 - (4) $v_3 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_3 = 1$
 $v_3 = 1$

$t = 1$
 $v = 1$

Beispiel

Prozess 1

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_1, v_1) := r-m-w((t, v), inc-fst)$
 - (3) while $t_1 \neq v_1$ do
 - (4) $v_1 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r-m-w((t, v), inc-snd)$
- $t_1 = 2$
 $v_1 = 1$

Prozess 2

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_2, v_2) := r-m-w((t, v), inc-fst)$
 - (3) while $t_2 \neq v_2$ do
 - (4) $v_2 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r-m-w((t, v), inc-snd)$
- $t_2 = 3$
 $v_2 = 1$

Prozess 3

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_3, v_3) := r-m-w((t, v), inc-fst)$
 - (3) while $t_3 \neq v_3$ do
 - (4) $v_3 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r-m-w((t, v), inc-snd)$
- $t_3 = 1$
 $v_3 = 1$

$t = 1$
 $v = 1$

Beispiel

Prozess 1

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_1, v_1) := r-m-w((t, v), inc-fst)$
 - (3) while $t_1 \neq v_1$ do
 - (4) $v_1 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r-m-w((t, v), inc-snd)$
- $t_1 = 2$
 $v_1 = 1$

Prozess 2

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_2, v_2) := r-m-w((t, v), inc-fst)$
 - (3) while $t_2 \neq v_2$ do
 - (4) $v_2 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r-m-w((t, v), inc-snd)$
- $t_2 = 3$
 $v_2 = 1$

Prozess 3

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_3, v_3) := r-m-w((t, v), inc-fst)$
 - (3) while $t_3 \neq v_3$ do
 - (4) $v_3 := v;$
 - (5) **Kritischer Abschnitt**
 - (6) $r-m-w((t, v), inc-snd)$
- $t_3 = 1$
 $v_3 = 1$

$t = 1$
 $v = 1$

Beispiel

Prozess 1

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_1, v_1) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) while $t_1 \neq v_1$ do
 - (4) $v_1 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_1 = 2$
 $v_1 = 1$

Prozess 2

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_2, v_2) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) while $t_2 \neq v_2$ do
 - (4) $v_2 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_2 = 3$
 $v_2 = 1$

Prozess 3

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_3, v_3) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) while $t_3 \neq v_3$ do
 - (4) $v_3 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_3 = 1$
 $v_3 = 1$

$t = 1$
 $v = 2$

Beispiel

Prozess 1

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_1, v_1) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) **while** $t_1 \neq v_1$ **do**
 - (4) $v_1 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_1 = 2$
 $v_1 = 1$

Prozess 2

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_2, v_2) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) **while** $t_2 \neq v_2$ **do**
 - (4) $v_2 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_2 = 3$
 $v_2 = 1$

Prozess 3

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_3, v_3) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) **while** $t_3 \neq v_3$ **do**
 - (4) $v_3 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_3 = 1$
 $v_3 = 1$

$t = 1$
 $v = 2$

Beispiel

Prozess 1

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_1, v_1) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) while $t_1 \neq v_1$ do
 - (4) $v_1 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_1 = 2$
 $v_1 = 2$

Prozess 2

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_2, v_2) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) while $t_2 \neq v_2$ do
 - (4) $v_2 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_2 = 3$
 $v_2 = 1$

Prozess 3

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_3, v_3) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) while $t_3 \neq v_3$ do
 - (4) $v_3 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_3 = 1$
 $v_3 = 1$

$t = 1$
 $v = 2$

Beispiel

Prozess 1

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_1, v_1) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) **while** $t_1 \neq v_1$ **do**
 - (4) $v_1 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_1 = 2$
 $v_1 = 2$

Prozess 2

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_2, v_2) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) **while** $t_2 \neq v_2$ **do**
 - (4) $v_2 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_2 = 3$
 $v_2 = 1$

Prozess 3

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_3, v_3) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) **while** $t_3 \neq v_3$ **do**
 - (4) $v_3 := v;$
 - (5) Kritischer Abschnitt
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_3 = 1$
 $v_3 = 1$

$t = 1$
 $v = 2$

Beispiel

Prozess 1

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_1, v_1) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) while $t_1 \neq v_1$ do
 - (4) $v_1 := v;$
 - (5) **Kritischer Abschnitt**
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_1 = 2$
 $v_1 = 2$

Prozess 2

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_2, v_2) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) while $t_2 \neq v_2$ do
 - (4) $v_2 := v;$
 - (5) **Kritischer Abschnitt**
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_2 = 3$
 $v_2 = 1$

Prozess 3

- (1) restlicher Code
 - (2) $(t_3, v_3) := r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}fst)$
 - (3) while $t_3 \neq v_3$ do
 - (4) $v_3 := v;$
 - (5) **Kritischer Abschnitt**
 - (6) $r\text{-}m\text{-}w((t, v), \text{inc}\text{-}snd)$
- $t_3 = 1$
 $v_3 = 1$

$t = 1$
 $v = 2$

Theorem

Der Ticket-Algorithmus garantiert wechselseitigen Ausschluss, Starvation-Freiheit und die FIFO-Eigenschaft.

Den Beweis ist einfach (Wir lassen ihn weg).

Eigenschaften des Ticket-Algorithmus (2)

Bemerkungen:

- Der Ticket-Algorithmus verwendet ein RMW-Objekt mit n^2 unterschiedlichen Werten
- Bezüglich dieser Anzahl an Werten ist der Algorithmus der beste bekannte Algorithmus unter allen Algorithmen, die wechselseitigen Ausschluss, Deadlock-Freiheit und die starke FIFO-Eigenschaft garantieren.

Starke FIFO-Eigenschaft:

FIFO gilt auch Initialisierungscode und im Abschlusscode

- Untere Schranke:

Jeder Algorithmus für $n \geq 3$ Prozesse benötigt mindestens $\frac{n^2 - 3n + 2}{2}$ verschiedene Zustände des gemeinsamen Speichers.

Mutual-Exclusion-Algorithmus mit Warteschlange und Compare-and-Swap-Objekt

Der MCS Queue-basierte Algorithmus

- Veröffentlicht von Mellor-Crummey und Scott im Jahr 1991
- Dijkstra Preis in Distributed Computing 2006
- Benutzt ein Swap-Compare-and-Swap Objekt, d.h. Objekt mit *swap*- und *compare-and-swap*-Operation
- Prozesse reihen sich in eine Warteschlange ein
- Besonderheit: Der Abschlusscode ist nicht wait-frei
- Eigenschaften: erfüllt Mutual-Exclusion, Starvation-Freiheit und FIFO-Eigenschaft
- Es wird nur gewartet an lokalen Registern

Für einen Zeiger p sei

- $*p$ der Indirektions-Operation, d.h. $*p$ liefert das Objekt, auf das der Zeiger zeigt.
- $\&p$ gibt die Speicheradresse eines Objekts (um damit Zeiger auf das Objekt zu erstellen)

Der MCS Queue-basierte Algorithmus (2)

Typen:

- Record Element: zwei Attribute: value:Bool, und next: Zeiger auf ein Element

Gemeinsame Variablen:

- nodes[i]: Feldeintrag: Inhalt ein Record vom Typ Element
- tail: Swap und Compare-and-Swap Objekt vom Typ: Zeiger auf ein Element
Wert am Anfang: Nil

Lokale Variablen:

- mynode: Zeiger auf ein Element, am Anfang auf nodes[i]
- prev, succ: Zeiger auf Elemente

Der MCS Queue-basierte Algorithmus (3)

Programm des i. Prozesses

```
loop forever
(1)  restlicher Code
(2)  *mynode.next := Nil;
(3)  prev := mynode;
(4)  swap(tail,prev);
(5)  if prev  $\neq$  Nil then
(6)    *mynode.value := 1;
(7)    *prev.next := mynode;
(8)    await *mynode.value = 0;
(9)  Kritischer Abschnitt
(10) if mynode.next = Nil then
(11)   if compare-and-swap(tail,mynode,Nil) = False then
(12)    await *mynode.next  $\neq$  Nil;
(13)    succ := *mynode.next;
(14)    *succ.value := 0;
(15) else
(16)   succ := *mynode.next;
(17)   *succ.value := 0;
```

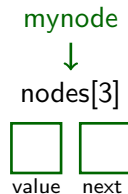
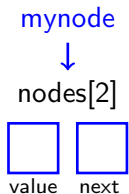
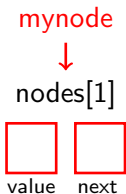

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus (4)

Idee:

- Prozesse reihen sich in die Warteschlange ein.
- Erster Prozess darf in den kritischen Abschnitt
- Beim Verlassen des kritischen Abschnitts gibt es mehrere Fälle:
 - kam in der Zwischenzeit ein weiterer Prozess, der sich anhängte, dann einfacher Fall: dessen Wert wird auf 0 gesetzt (`*mynode.next ≠ Nil`)
 - kam in der Zwischenzeit kein Prozess in den Initialisierungscode, dann wird `tail` auf `Nil` gesetzt (Fall `compare-and-swap` liefert `True`)
 - kam in der Zwischenzeit ein Prozess, der aber noch nicht fertig ist mit anhängen, dann wird gewartet bis er sich angehängt hat (Fall `compare-and-swap` liefert `false`)

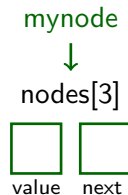
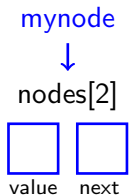
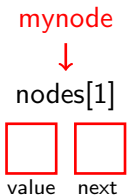
Der MCS Queue-basierte Algorithmus: Beispiel

Nur ein Prozess will in den kritischen Abschnitt
tail \longrightarrow Nil



Der MCS Queue-basierte Algorithmus: Beispiel

Nur ein Prozess will in den kritischen Abschnitt
tail \longrightarrow Nil

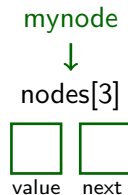
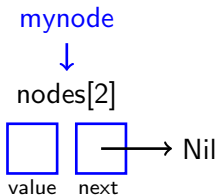
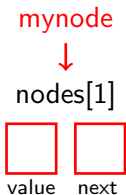


Prozess 2:

- (2) `*mynode.next := Nil;`
- (3) `prev := mynode;`
- (4) `swap(tail,prev);`

Der MCS Queue-basierte Algorithmus: Beispiel

Nur ein Prozess will in den kritischen Abschnitt
tail \longrightarrow Nil

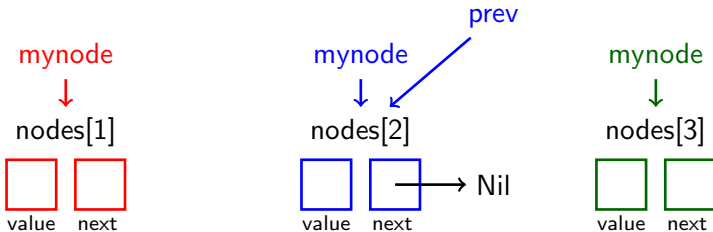


Prozess 2:

- (2) `*mynode.next := Nil;`
- (3) `prev := mynode;`
- (4) `swap(tail,prev);`

Der MCS Queue-basierte Algorithmus: Beispiel

Nur ein Prozess will in den kritischen Abschnitt
tail \longrightarrow Nil

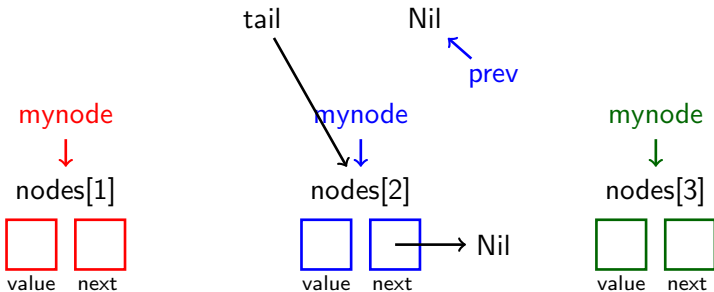


Prozess 2:

- (2) `*mynode.next := Nil;`
- (3) `prev := mynode;`
- (4) `swap(tail,prev);`

Der MCS Queue-basierte Algorithmus: Beispiel

Nur ein Prozess will in den kritischen Abschnitt

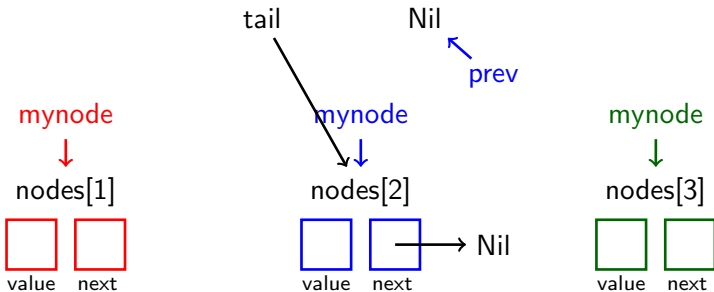


Prozess 2:

- (2) `*mynode.next := Nil;`
- (3) `prev := mynode;`
- (4) `swap(tail,prev);`

Der MCS Queue-basierte Algorithmus: Beispiel

Nur ein Prozess will in den kritischen Abschnitt



Prozess 2:

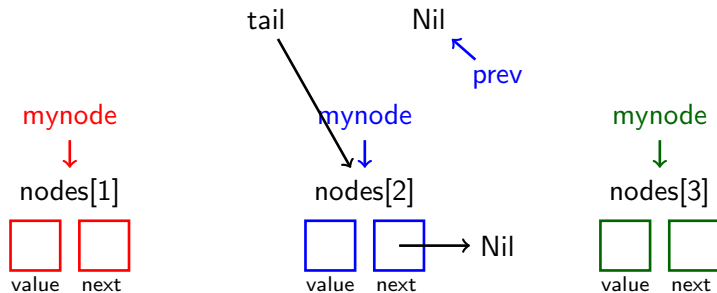
(5) if $prev \neq Nil$ then

...

(9) Kritischer Abschnitt

Der MCS Queue-basierte Algorithmus: Beispiel

Nur ein Prozess will in den kritischen Abschnitt



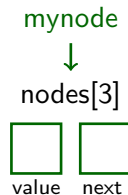
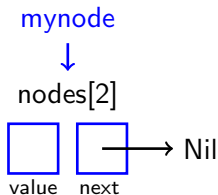
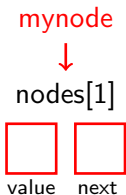
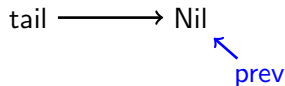
Prozess 2:

(10) if mynode.next = Nil then

(11) if *compare-and-swap*(tail, mynode, Nil) = False then

Der MCS Queue-basierte Algorithmus: Beispiel

Nur ein Prozess will in den kritischen Abschnitt



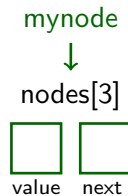
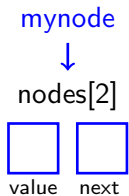
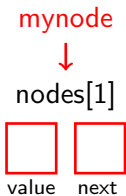
Prozess 2:

(10) if mynode.next = Nil then

(11) if *compare-and-swap*(tail, mynode, Nil) = False then
... liefert True

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (2)

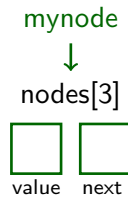
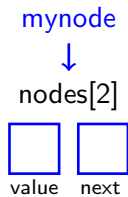
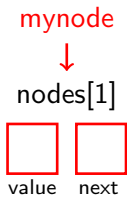
Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in den kritischen Abschnitt
tail \longrightarrow Nil



Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (2)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in den kritischen Abschnitt

tail \longrightarrow Nil



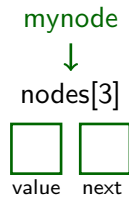
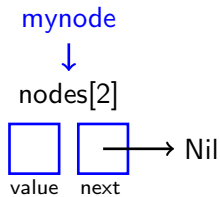
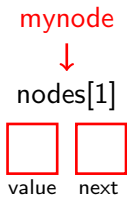
Prozess 2:

- (2) *mynode.next := Nil;
- (3) prev := mynode;
- (4) swap(tail,prev);

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (2)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in den kritischen Abschnitt

tail \longrightarrow Nil



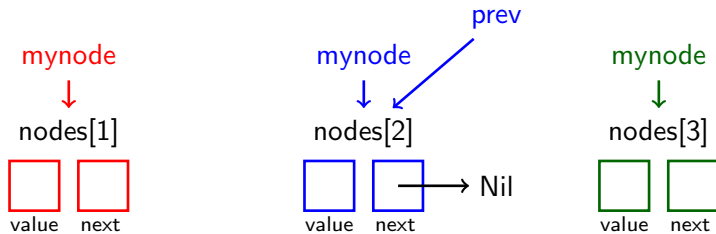
Prozess 2:

- (2) `*mynode.next := Nil;`
- (3) `prev := mynode;`
- (4) `swap(tail,prev);`

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (2)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in den kritischen Abschnitt

tail \longrightarrow Nil

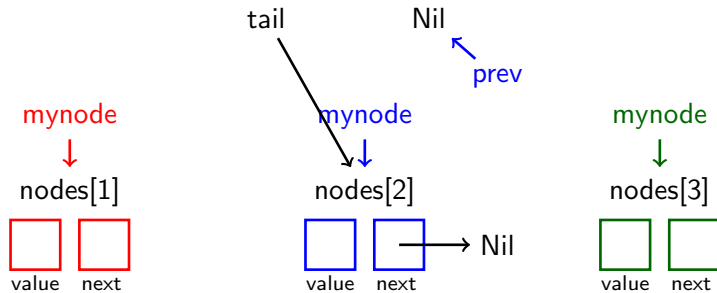


Prozess 2:

- (2) `*mynode.next := Nil;`
- (3) `prev := mynode;`
- (4) `swap(tail,prev);`

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (2)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in den kritischen Abschnitt

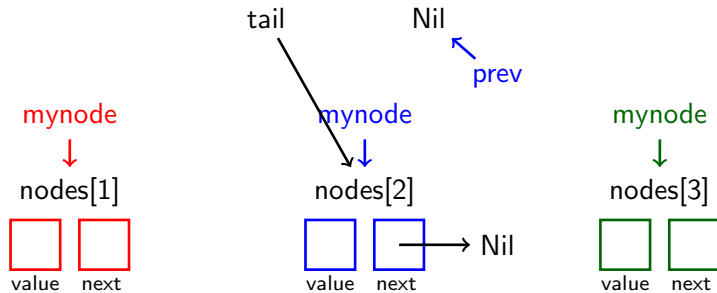


Prozess 2:

- (2) `*mynode.next := Nil;`
- (3) `prev := mynode;`
- (4) `swap(tail,prev);`

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (2)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in den kritischen Abschnitt



Prozess 2:

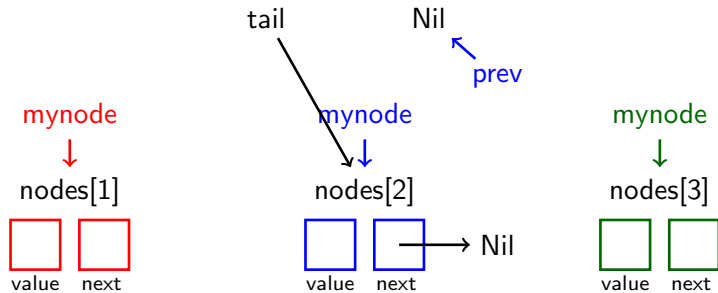
(5) if $prev \neq Nil$ then

...

(9) Kritischer Abschnitt

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (2)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in den kritischen Abschnitt

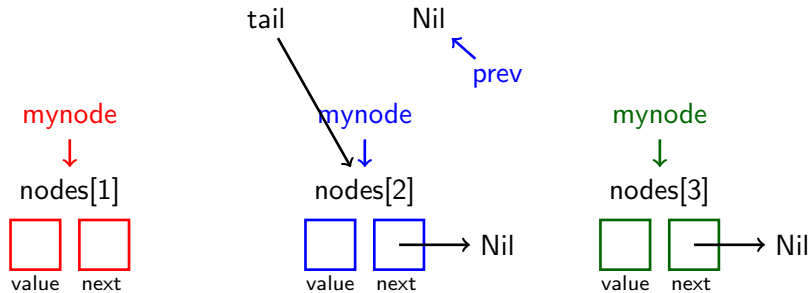


Prozess 3:

- (2) `*mynode.next := Nil;`
- (3) `prev := mynode;`
- (4) `swap(tail,prev);`

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (2)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in den kritischen Abschnitt

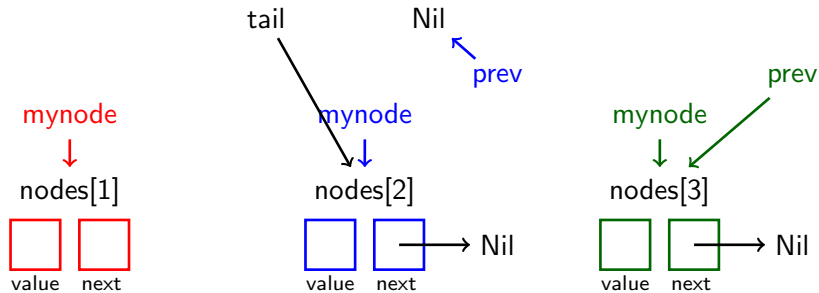


Prozess 3:

- (2) `*mynode.next := Nil;`
- (3) `prev := mynode;`
- (4) `swap(tail,prev);`

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (2)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in den kritischen Abschnitt

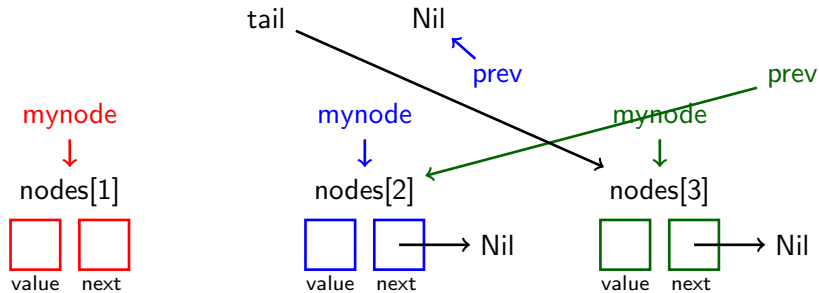


Prozess 3:

- (2) `*mynode.next := Nil;`
- (3) `prev := mynode;`
- (4) `swap(tail,prev);`

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (2)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in den kritischen Abschnitt

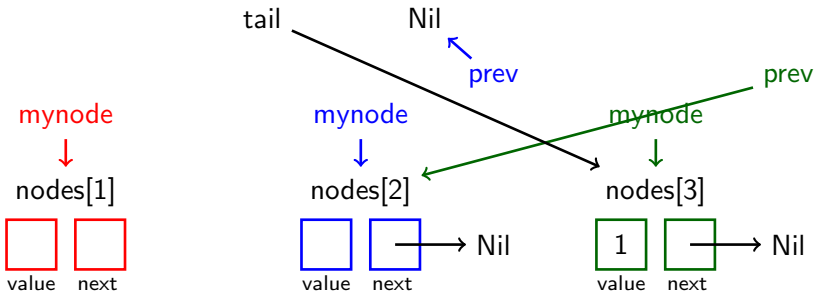


Prozess 3:

- (2) `*mynode.next := Nil;`
- (3) `prev := mynode;`
- (4) `swap(tail,prev);`

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (2)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in den kritischen Abschnitt

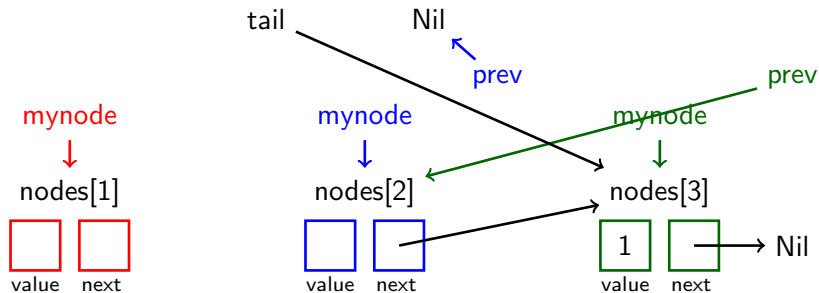


Prozess 3:

- (5) if $prev \neq Nil$ then
- (6) $*mynode.value := 1;$
- (7) $*prev.next := mynode;$
- (8) await $*mynode.value = 0;$

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (2)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in den kritischen Abschnitt

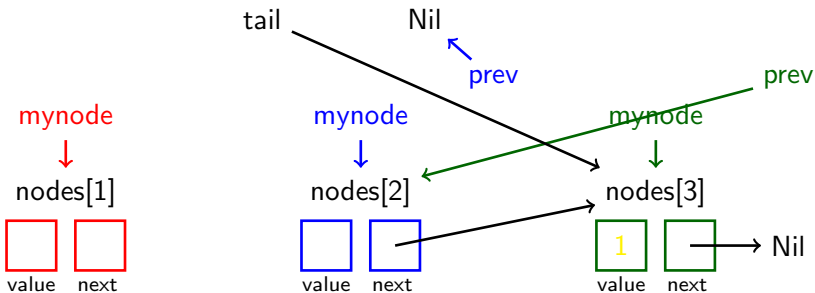


Prozess 3:

- (5) if $prev \neq Nil$ then
- (6) $*mynode.value := 1;$
- (7) $*prev.next := mynode;$
- (8) await $*mynode.value = 0;$

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (2)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in den kritischen Abschnitt

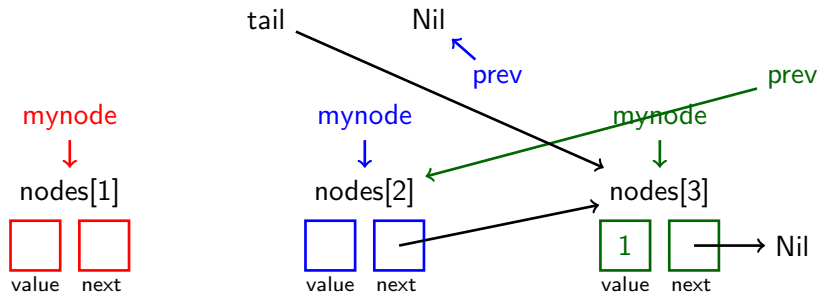


Prozess 3:

- (5) if $prev \neq Nil$ then
- (6) $*mynode.value := 1;$
- (7) $*prev.next := mynode;$
- (8) await $*mynode.value = 0;$

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (2)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in den kritischen Abschnitt

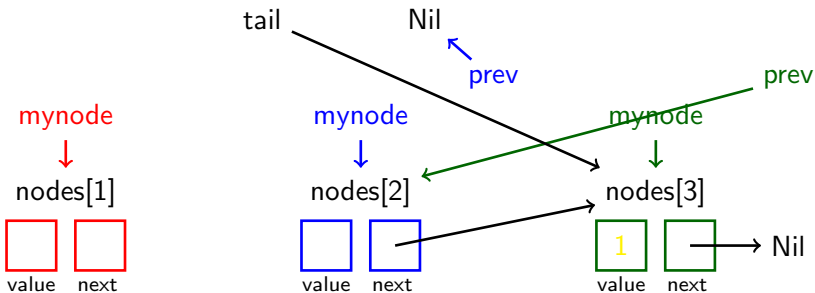


Prozess 3:

- (5) if $prev \neq Nil$ then
- (6) $*mynode.value := 1;$
- (7) $*prev.next := mynode;$
- (8) await $*mynode.value = 0;$

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (2)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in den kritischen Abschnitt

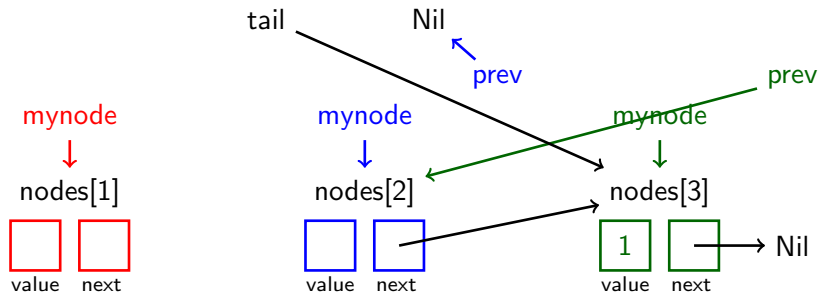


Prozess 3:

- (5) if $prev \neq Nil$ then
- (6) $*mynode.value := 1;$
- (7) $*prev.next := mynode;$
- (8) $await *mynode.value = 0;$

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (2)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in den kritischen Abschnitt

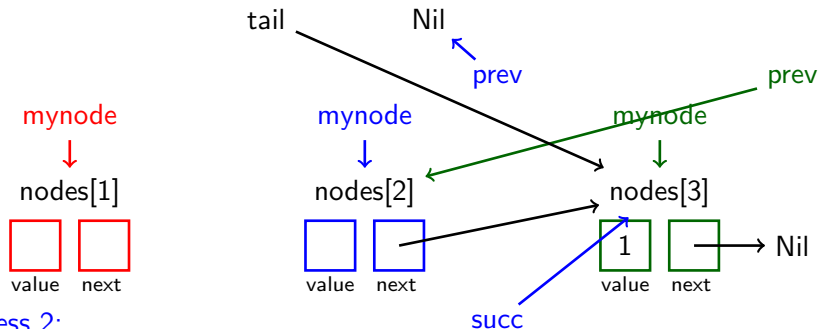


Prozess 3:

- (5) if $prev \neq Nil$ then
- (6) $*mynode.value := 1;$
- (7) $*prev.next := mynode;$
- (8) $await *mynode.value = 0;$

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (2)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in den kritischen Abschnitt

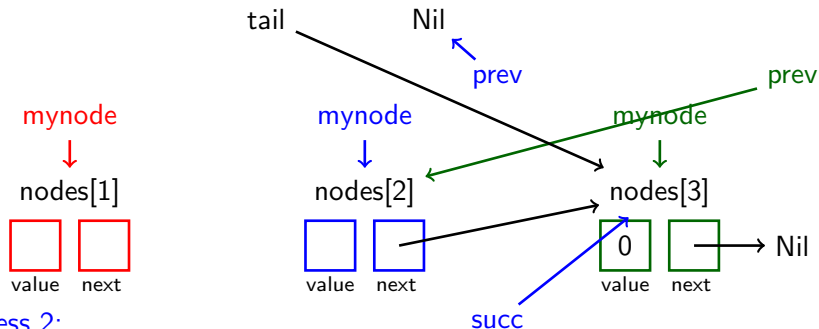


Prozess 2:

```
(10) if mynode.next = Nil then
(15) else
(16)   succ := *mynode.next;
(17)   *succ.value := 0;
```

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (2)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in den kritischen Abschnitt

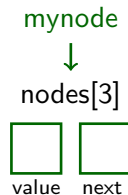
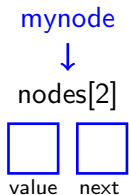
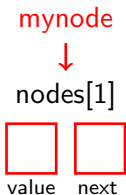


Prozess 2:

```
(10) if mynode.next = Nil then
(15) else
(16)   succ := *mynode.next;
(17)   *succ.value := 0;
```

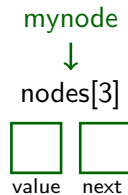
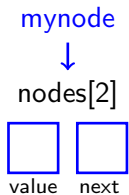
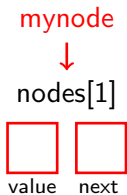
Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (3)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in KA, aber 2 fertig, bevor 3 den next-Zeiger umbiegt
tail \longrightarrow Nil



Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (3)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in KA, aber 2 fertig, bevor 3 den next-Zeiger umbiegt
tail \longrightarrow Nil

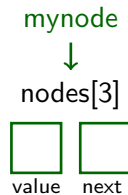
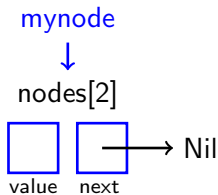
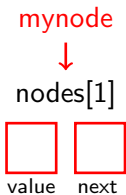


Prozess 2:

- (2) *mynode.next := Nil;
- (3) prev := mynode;
- (4) swap(tail,prev);

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (3)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in KA, aber 2 fertig, bevor 3 den next-Zeiger umbiegt
tail \longrightarrow Nil



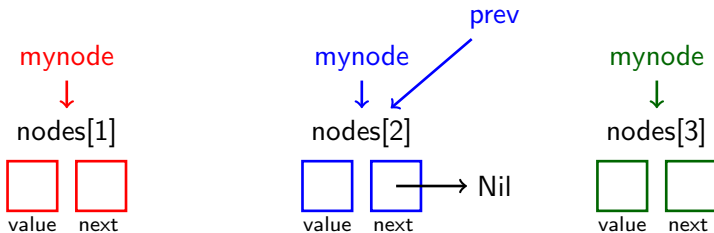
Prozess 2:

- (2) `*mynode.next := Nil;`
- (3) `prev := mynode;`
- (4) `swap(tail,prev);`

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (3)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in KA, aber 2 fertig, bevor 3 den next-Zeiger umbiegt

tail \longrightarrow Nil

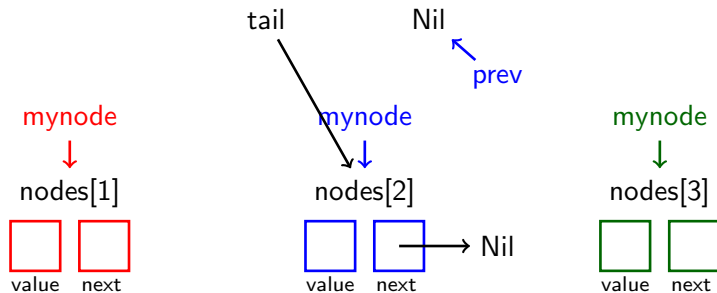


Prozess 2:

- (2) `*mynode.next := Nil;`
- (3) `prev := mynode;`
- (4) `swap(tail,prev);`

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (3)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in KA, aber 2 fertig, bevor 3 den next-Zeiger umbiegt

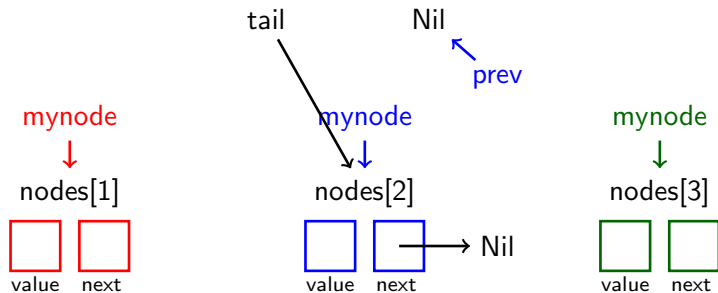


Prozess 2:

- (2) `*mynode.next := Nil;`
- (3) `prev := mynode;`
- (4) `swap(tail,prev);`

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (3)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in KA, aber 2 fertig, bevor 3 den next-Zeiger umbiegt



Prozess 2:

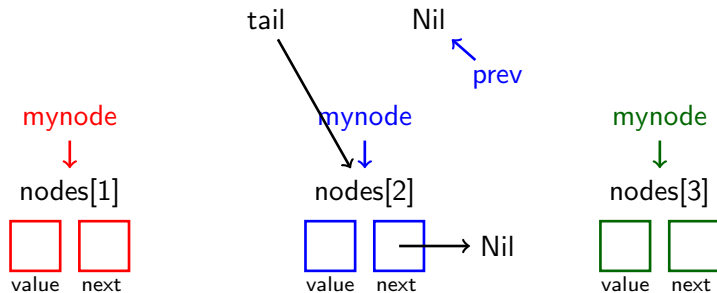
(5) if $prev \neq Nil$ then

...

(9) Kritischer Abschnitt

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (3)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in KA, aber 2 fertig, bevor 3 den next-Zeiger umbiegt

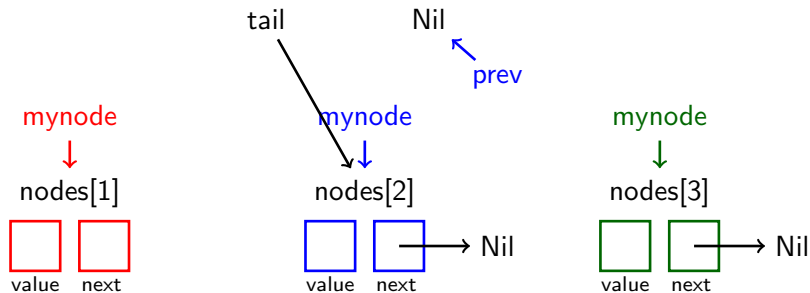


Prozess 3:

- (2) `*mynode.next := Nil;`
- (3) `prev := mynode;`
- (4) `swap(tail,prev);`

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (3)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in KA, aber 2 fertig, bevor 3 den next-Zeiger umbiegt

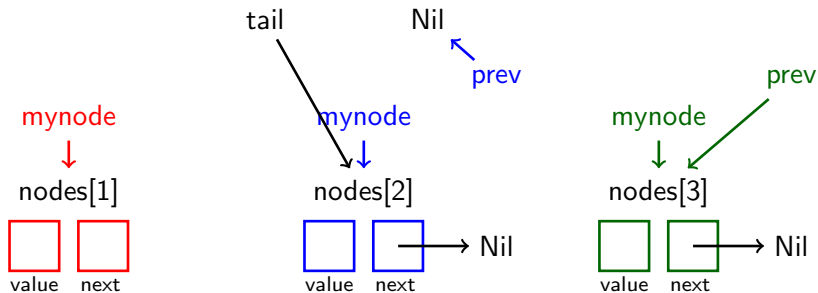


Prozess 3:

- (2) `*mynode.next := Nil;`
- (3) `prev := mynode;`
- (4) `swap(tail,prev);`

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (3)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in KA, aber 2 fertig, bevor 3 den next-Zeiger umbiegt

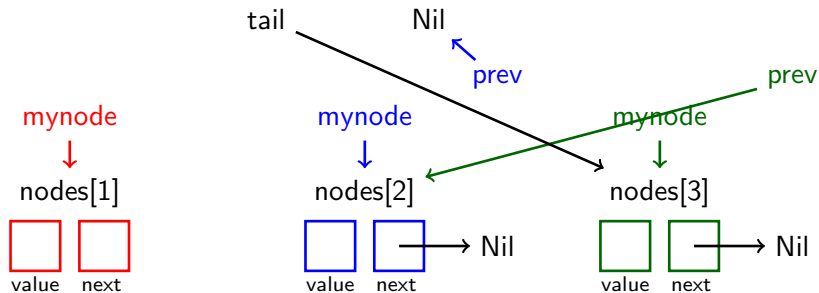


Prozess 3:

- (2) `*mynode.next := Nil;`
- (3) `prev := mynode;`
- (4) `swap(tail,prev);`

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (3)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in KA, aber 2 fertig, bevor 3 den next-Zeiger umbiegt

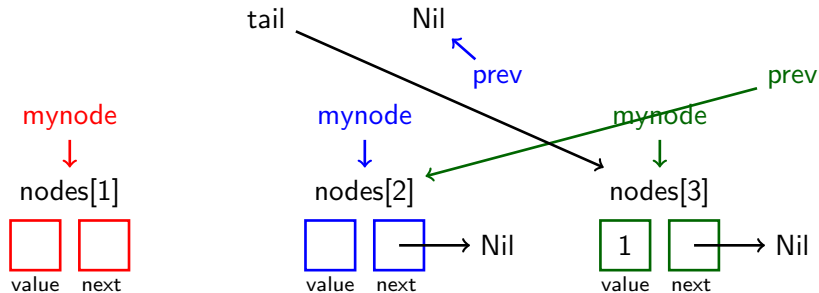


Prozess 3:

- (2) `*mynode.next := Nil;`
- (3) `prev := mynode;`
- (4) `swap(tail,prev);`

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (3)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in KA, aber 2 fertig, bevor 3 den next-Zeiger umbiegt

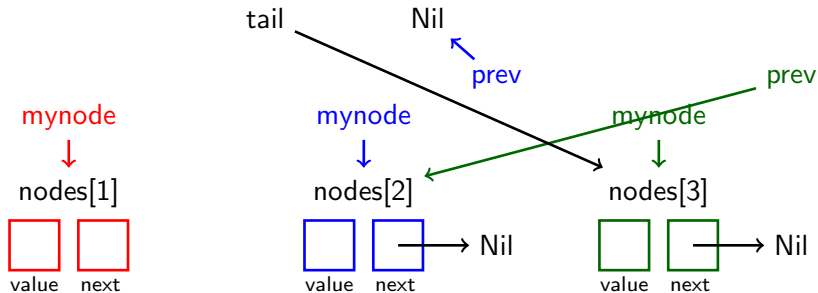


Prozess 3:

- (5) if $prev \neq Nil$ then
- (6) *mynode.value := 1;

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (3)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in KA, aber 2 fertig, bevor 3 den next-Zeiger umbiegt

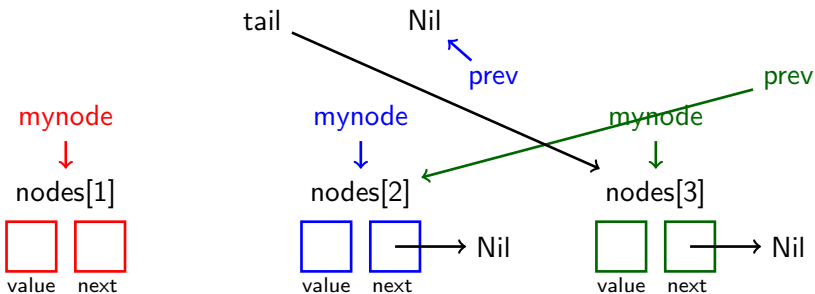


Prozess 3:

- (5) if $prev \neq Nil$ then
- (6) $*mynode.value := 1;$

Der MCS-Queue-basierte Algorithmus: Beispiel (3)

Prozess 2 im KA, Prozess 3 will in KA, aber 2 fertig, bevor 3 den next-Zeiger umbiegt



Prozess 2:

- ```
(10) if mynode.next = Nil then
(11) if compare-and-swap(tail,mynode,Nil) = False then
(12) await *mynode.next ≠ Nil;
(13) succ := *mynode.next;
(14) *succ.value := 0;
```



- Stärkere Speicheroperationen als atomares Read- und Write.
- Einige verschiedene Operationen.
- Mutual-Exclusion-Algorithmen mit diesen Operationen einfach, aber für gute Eigenschaften (Starvation-Freiheit, FIFO-Eigenschaften) auch nicht-trivial
- Ausblick:
  - Welche der Operationen braucht man?
  - Welche der Operationen sind stärker als andere?