Übung zu Betriebssystembau

Ereignisbearbeitung und Synchronisation

09. Januar 2024

Peter Ulbrich & Alexander Lochmann
(Mit Material vom Lehrstuhl 4 der FAU)

Arbeitsgruppe Systemsoftware
Technische Universität Dortmund

technische universität
dortmund

arbeitsgruppe
systemsoftware

Motivation

Problem

Wie sieht es mit gegenseitigem Ausschluss auf Fadenebende in StuBS aus?

Problem

Wie sieht es mit gegenseitigem Ausschluss auf Fadenebende in StuBS aus?

Wir haben doch bereits ein `spinlock` implementiert...

Mutex mit aktivem Warten

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
```

Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
```

App2

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
```

App3

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
```

Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`

active

ready list

App1 App2 App3

Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
```

App2

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
```

App3

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
```

active

App1

ready list

App2 App3

Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
```

App2

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
```

App3

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
```

active

App1

ready list

App2 App3

CPU-Zeit →

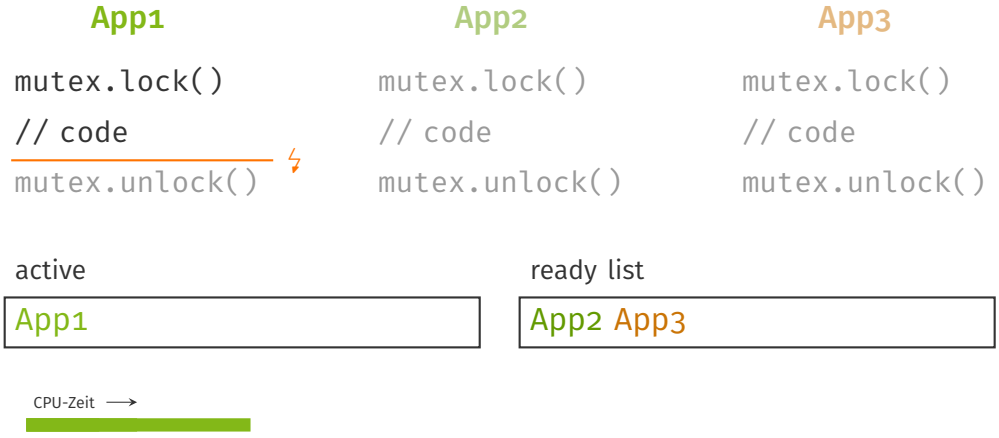
Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`

Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU



Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`

active

ready list

App2 App3 App1

Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`

active

App2

ready list

App3 App1

Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`

active

App2

ready list

App3 App1

Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`

active

App2

ready list

App3 App1

Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()` ↯	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`

active

App2

ready list

App3 App1

Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`

active

ready list

App3 App1 App2

Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`

active

App3

ready list

App1 App2

Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`

active

App3

ready list

App1 App2

Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`

active

App3

ready list

App1 App2

Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()` ↯
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`

active

App3

ready list

App1 App2

Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`

active

ready list

App1 App2 App3

Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
```

App2

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
```

App3

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
```

active

App1

ready list

App2 App3

Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`

active

App1

ready list

App2 App3

Mutex mit aktivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
```

App2

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
```

App3

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
```

active

App1

ready list

App2 App3

Verschwendung von CPU-Zeit

Mutex mit harter Synchronisation

- Analog zur Interruptsperre mit `cli`
- **Ziel:** Kein (präemptives) Scheduling

Mutex mit harter Synchronisation

- Analog zur Interruptsperre mit `cli`
- **Ziel:** Kein (präemptives) Scheduling
- Realisierbar durch
  - Multitasking (temporär) deaktivieren
  - Erweiterung des Schedulers
  - Wechsel auf Epilogebene

Mutex mit harter Synchronisation

- Analog zur Interruptsperre mit `cli`
- **Ziel:** Kein (präemptives) Scheduling
- Realisierbar durch
  - Multitasking (temporär) deaktivieren
  - Erweiterung des Schedulers
  - Wechsel auf Epilogebene
- **Vorteile:**
  - konsistent
  - (relativ) einfach zu implementieren

Mutex mit harter Synchronisation

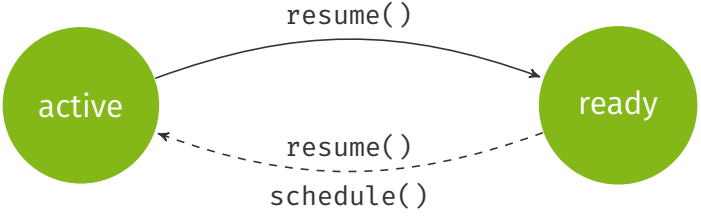
- Analog zur Interruptsperre mit `cli`
- **Ziel:** Kein (präemptives) Scheduling
- Realisierbar durch
  - Multitasking (temporär) deaktivieren
  - Erweiterung des Schedulers
  - Wechsel auf Epilogebene
- **Vorteile:**
  - konsistent
  - (relativ) einfach zu implementieren
- **Nachteile:**
  - Breitbandwirkung
  - Prioritätsverletzung
  - Prophylaktisch

Idee: Passives Warten

Ansatz: Fäden, die den kritischen Abschnitt nicht betreten können, werden blockiert (d.h. von der CPU-Zuteilung ausgeschlossen)

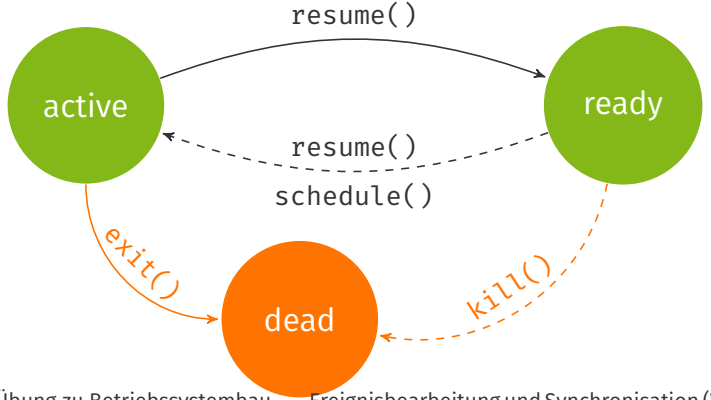
Idee: Passives Warten

Ansatz: Fäden, die den kritischen Abschnitt nicht betreten können, werden blockiert (d.h. von der CPU-Zuteilung ausgeschlossen)

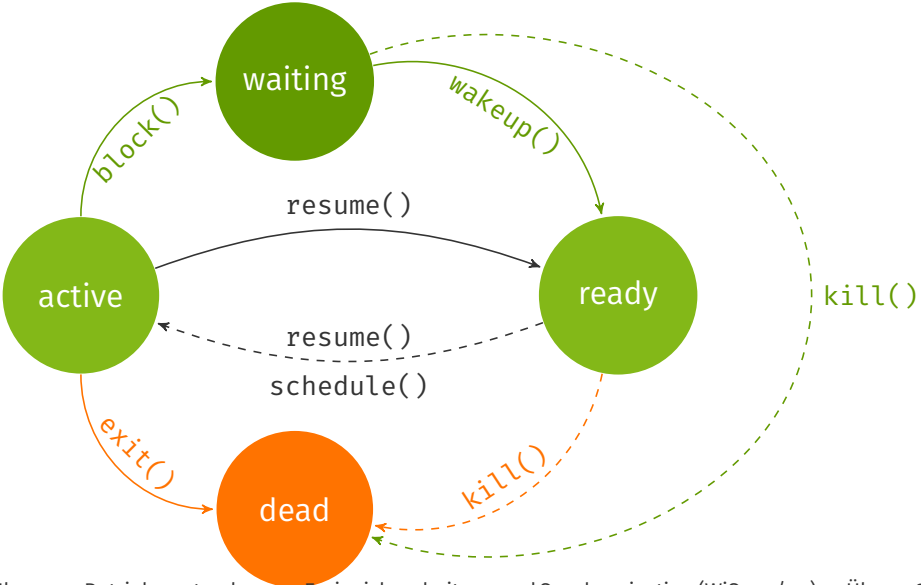


Idee: Passives Warten

Ansatz: Fäden, die den kritischen Abschnitt nicht betreten können, werden blockiert (d.h. von der CPU-Zuteilung ausgeschlossen)



Idee: Passives Warten



Idee: Passives Warten

Einführung eines **waiting room**s
(Liste mit wartenden Threads)

Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`
`// mehr code`	`// mehr code`	`// mehr code`

active	ready list	waiting room
	App1 App2 App3	

Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1

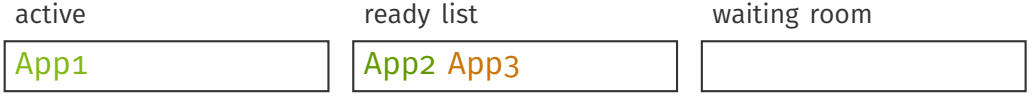
```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
// mehr code
```

App2

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
// mehr code
```

App3

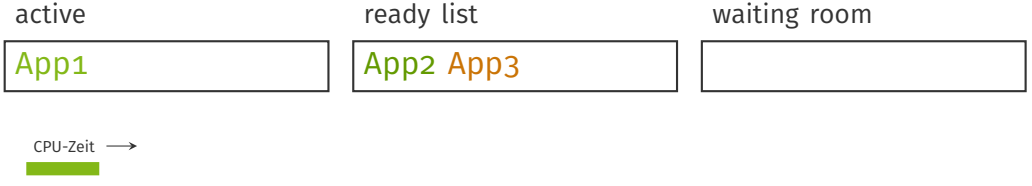
```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
// mehr code
```



Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

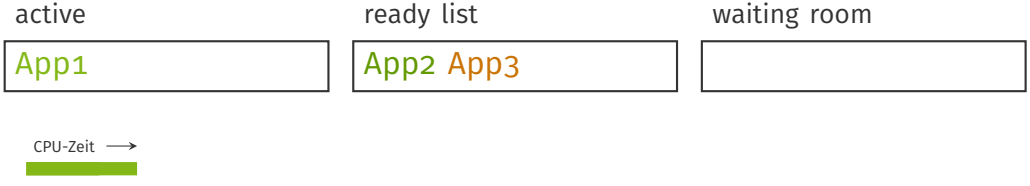
App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`
`// mehr code`	`// mehr code`	`// mehr code`



Mutex mit passivem Warten

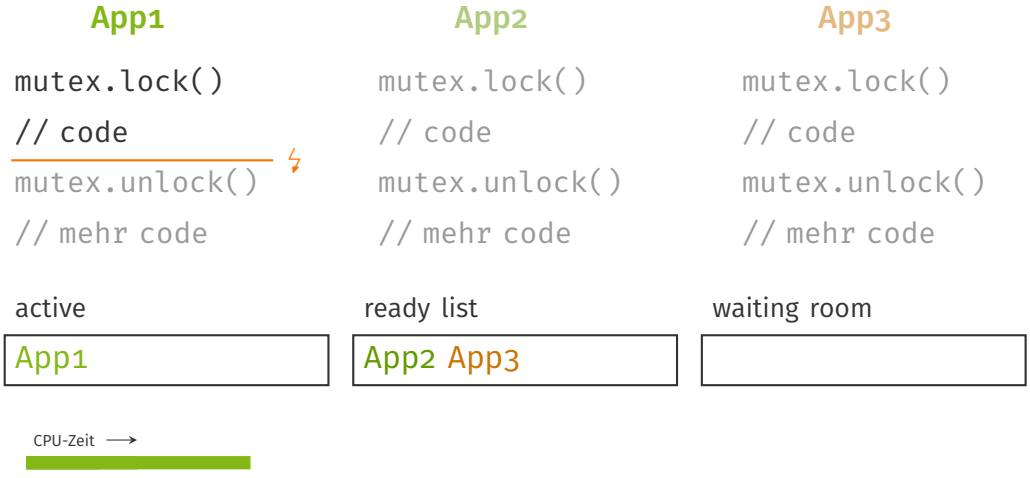
Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`
`// mehr code`	`// mehr code`	`// mehr code`



Mutex mit passivem Warten

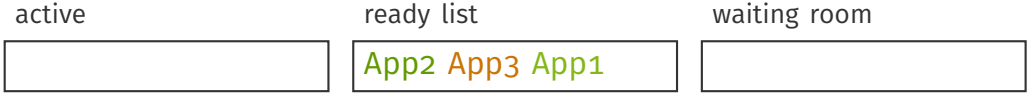
Beispiel: Drei Threads auf einer CPU



Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

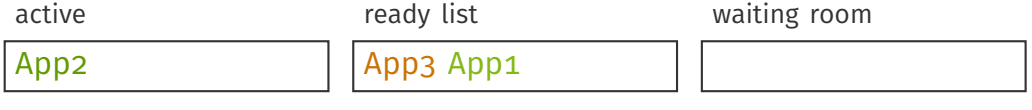
App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`
`// mehr code`	`// mehr code`	`// mehr code`



Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`
`// mehr code`	`// mehr code`	`// mehr code`



Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`
`// mehr code`	`// mehr code`	`// mehr code`

active	ready list	waiting room
App2	App3 App1	

Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`
`// mehr code`	`// mehr code`	`// mehr code`

active	ready list	waiting room
	App3 App1	App2

Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`
`// mehr code`	`// mehr code`	`// mehr code`

active	ready list	waiting room
App3	App1	App2

Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`
`// mehr code`	`// mehr code`	`// mehr code`

active	ready list	waiting room
App3	App1	App2

Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`
`// mehr code`	`// mehr code`	`// mehr code`

active	ready list	waiting room
	App1	App2 App3

Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`
`// mehr code`	`// mehr code`	`// mehr code`

active	ready list	waiting room
App1		App2 App3

Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`
`// mehr code`	`// mehr code`	`// mehr code`

active	ready list	waiting room
App1		App2 App3

Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1

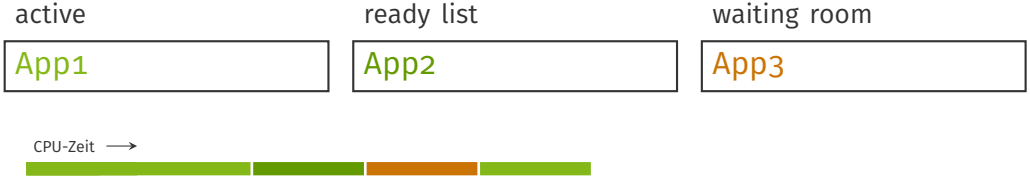
```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
// mehr code
```

App2

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
// mehr code
```

App3

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
// mehr code
```



Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1

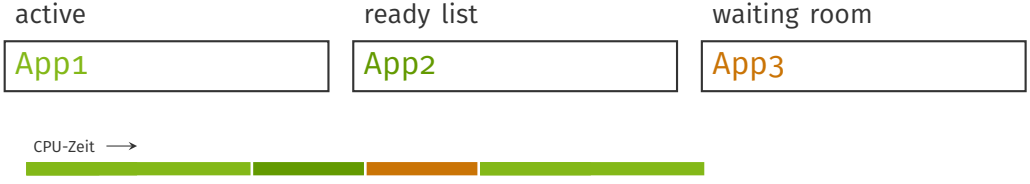
```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
// mehr code
```

App2

```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
// mehr code
```

App3

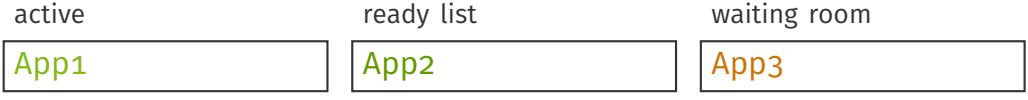
```
mutex.lock()
// code
mutex.unlock()
// mehr code
```



Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`
`// mehr code`	`// mehr code`	`// mehr code`



Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`
`// mehr code`	`// mehr code`	`// mehr code`

active	ready list	waiting room
	App2 App1	App3

Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`
`// mehr code`	`// mehr code`	`// mehr code`

active	ready list	waiting room
App2	App1	App3

Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`
`// mehr code`	`// mehr code`	`// mehr code`

active	ready list	waiting room
App2	App1	App3

Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`
`// mehr code`	`// mehr code`	`// mehr code`

active	ready list	waiting room
App2	App1	App3

Mutex mit passivem Warten

Beispiel: Drei Threads auf einer CPU

App1	App2	App3
`mutex.lock()`	`mutex.lock()`	`mutex.lock()`
`// code`	`// code`	`// code`
`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`	`mutex.unlock()`
`// mehr code`	`// mehr code`	`// mehr code`

active	ready list	waiting room
App2	App1 App3	

Semaphore

Wortherkunft

sem·a·phore

1. any apparatus for signaling, as by an arrangement of lights, flags, and mechanical arms on railroads
2. a system for signaling by the use of two flags, one held in each hand: the letters of the alphabet are represented by the various positions of the arms
3. any system of signaling by semaphore

nach V. E. Neufeld, Webster's New World Dictionary, Simon & Schuster Inc., third college edition, 1988

Operationen

`init()` Zähler c mit positivem Wert initialisieren

`P()` von *Prolaag* (versuchen zu verringern)
bzw. *Passeering*† (passieren)

- $c > 0$ dekrementieren
- $c = 0$ warten

`V()` von *Verhoog* (erhöhen) bzw. *Vrijgave*† (freigeben)

- nächsten wartenden Faden aufwecken oder
- Zähler c erhöhen

† nach Edsger W. Dijkstra, Over de sequentialiteit van procesbeschrijvingen, ca. 1962

```
01 Semaphore mutex(1);
02
03 void func() {
04
05   mutex.p();  // lock
06
07   // critical section
08
09   mutex.v();  // unlock
10
11 }
```

```
Semaphore mutex(1);

void func() {

  mutex.p();  // lock

  // critical section

  mutex.v();  // unlock

}
```

```
Semaphore empty(size);
Semaphore full(0);

void producer(){
  empty.p();
  // produce
  full.v();
}

void consumer(){
  full.p();
  // consume
  empty.v();
}
```

Zeitgesteuertes Warten

Schlafen legen

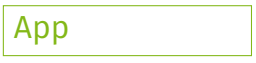
```
01 App::action(){
02     foo();
03     sleep(13);
04     bar();
05 }
```

- ähnlich der Funktion `sleep(3)`
- jedoch mit Wartezeit in Millisekunden (statt Sekunden)
- analog zu Wartezimmer den Thread aus Ready-Liste des Schedulers nehmen

Schlafen legen

```
01 App::action(){
02     foo();
03     sleep(13);
04     bar();
05 }
```

- ähnlich der Funktion `sleep(3)`
- jedoch mit Wartezeit in Millisekunden (statt Sekunden)
- analog zu Wartezimmer den Thread aus Ready-Liste des Schedulers nehmen



Schlafen legen

```
01 App::action(){
02     foo();
03     sleep(13);
04     bar();
05 }
```

- ähnlich der Funktion `sleep(3)`
- jedoch mit Wartezeit in Millisekunden (statt Sekunden)
- analog zu Wartezimmer den Thread aus Ready-Liste des Schedulers nehmen

(alternative Darstellung)

Schlafen legen

```
01 App::action(){
02     foo();
03     sleep(13);
04     bar();
05 }
```

- ähnlich der Funktion `sleep(3)`
- jedoch mit Wartezeit in Millisekunden (statt Sekunden)
- analog zu Wartezimmer den Thread aus Ready-Liste des Schedulers nehmen

- mit jedem Tick die Wartezeit dekrementieren

Schlafen legen

```
01 App::action(){
02     foo();
03     sleep(13);
04     bar();
05 }
```

- ähnlich der Funktion `sleep(3)`
- jedoch mit Wartezeit in Millisekunden (statt Sekunden)
- analog zu Wartezimmer den Thread aus Ready-Liste des Schedulers nehmen

- mit jedem Tick die Wartezeit dekrementieren •

Schlafen legen

```
01 App::action(){
02     foo();
03     sleep(13);
04     bar();
05 }
```

- ähnlich der Funktion `sleep(3)`
- jedoch mit Wartezeit in Millisekunden (statt Sekunden)
- analog zu Wartezimmer den Thread aus Ready-Liste des Schedulers nehmen

- mit jedem Tick die Wartezeit dekrementieren ••

Schlafen legen

```
01 App::action(){
02     foo();
03     sleep(13);
04     bar();
05 }
```

- ähnlich der Funktion `sleep(3)`
- jedoch mit Wartezeit in Millisekunden (statt Sekunden)
- analog zu Wartezimmer den Thread aus Ready-Liste des Schedulers nehmen

- mit jedem Tick die Wartezeit dekrementieren •••

Schlafen legen

```
01 App::action(){
02     foo();
03     sleep(13);
04     bar();
05 }
```

- ähnlich der Funktion `sleep(3)`
- jedoch mit Wartezeit in Millisekunden (statt Sekunden)
- analog zu Wartezimmer den Thread aus Ready-Liste des Schedulers nehmen

- mit jedem Tick die Wartezeit dekrementieren

Schlafen legen

```
01 App::action(){
02     foo();
03     sleep(13);
04     bar();
05 }
```

- ähnlich der Funktion `sleep(3)`
- jedoch mit Wartezeit in Millisekunden (statt Sekunden)
- analog zu Wartezimmer den Thread aus Ready-Liste des Schedulers nehmen

- mit jedem Tick die Wartezeit dekrementieren
- nach Ablauf der Wartezeit Thread wieder im Scheduler einreihen

Naive Datenstruktur

Beispiel: Drei Anwendungen legen sich nacheinander schlafen

Naive Datenstruktur

Beispiel: Drei Anwendungen legen sich nacheinander schlafen

1. Thread **foo** für `666ms`

Naive Datenstruktur

Beispiel: Drei Anwendungen legen sich nacheinander schlafen

1. Thread **foo** für `666ms`

Naive Datenstruktur

Beispiel: Drei Anwendungen legen sich nacheinander schlafen

1. Thread **foo** für `666ms`
2. Thread **bar** für `23ms`

Naive Datenstruktur

Beispiel: Drei Anwendungen legen sich nacheinander schlafen

1. Thread **foo** für `666ms`
2. Thread **bar** für `23ms`

Naive Datenstruktur

Beispiel: Drei Anwendungen legen sich nacheinander schlafen

1. Thread **foo** für `666ms`
2. Thread **bar** für `23ms`
3. Thread **baz** für `42ms`

Naive Datenstruktur

Beispiel: Drei Anwendungen legen sich nacheinander schlafen

1. Thread **foo** für `666ms`
2. Thread **bar** für `23ms`
3. Thread **baz** für `42ms`

Naive Datenstruktur

Beispiel: Drei Anwendungen legen sich nacheinander schlafen

1. Thread **foo** für `666ms`
2. Thread **bar** für `23ms`
3. Thread **baz** für `42ms`

Verwaltung mittels verketteter Liste

Naive Datenstruktur

Beispiel: Drei Anwendungen legen sich nacheinander schlafen

1. Thread **foo** für `666ms`
2. Thread **bar** für `23ms`
3. Thread **baz** für `42ms`

Verwaltung mittels verketteter Liste

Naive Datenstruktur

Beispiel: Drei Anwendungen legen sich nacheinander schlafen

1. Thread **foo** für `666ms`
2. Thread **bar** für `23ms`
3. Thread **baz** für `42ms`

Verwaltung mittels verketteter Liste hat den Nachteil, dass bei jedem Tick die gesamte Liste durchlaufen werden muss

Naive Datenstruktur

Beispiel: Drei Anwendungen legen sich nacheinander schlafen

1. Thread **foo** für `666ms`
2. Thread **bar** für `23ms`
3. Thread **baz** für `42ms`

Verwaltung mittels verketteter Liste hat den Nachteil, dass bei jedem Tick die gesamte Liste durchlaufen werden muss •

Naive Datenstruktur

Beispiel: Drei Anwendungen legen sich nacheinander schlafen

1. Thread **foo** für `666ms`
2. Thread **bar** für `23ms`
3. Thread **baz** für `42ms`

Verwaltung mittels verketteter Liste hat den Nachteil, dass bei jedem Tick die gesamte Liste durchlaufen werden muss ••

Naive Datenstruktur

Beispiel: Drei Anwendungen legen sich nacheinander schlafen

1. Thread **foo** für `666ms`
2. Thread **bar** für `23ms`
3. Thread **baz** für `42ms`

Verwaltung mittels verketteter Liste hat den Nachteil, dass bei jedem Tick die gesamte Liste durchlaufen werden muss •••

Naive Datenstruktur

Beispiel: Drei Anwendungen legen sich nacheinander schlafen

1. Thread **foo** für `666ms`
2. Thread **bar** für `23ms`
3. Thread **baz** für `42ms`

Verwaltung mittels verketteter Liste hat den Nachteil, dass bei jedem Tick die gesamte Liste durchlaufen werden muss
($\mathcal{O}(n)$, und das 1000× pro Sekunde in der Epilogebene)

Naive Datenstruktur

Beispiel: Drei Anwendungen legen sich nacheinander schlafen

1. Thread **foo** für `666ms`
2. Thread **bar** für `23ms`
3. Thread **baz** für `42ms`

Verwaltung mittels verketteter Liste hat den Nachteil, dass bei jedem Tick die gesamte Liste durchlaufen werden muss
($\mathcal{O}(n)$, und das 1000× pro Sekunde in der Epilogebene)

Das muss besser gehen!

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit

Beispiel: absolute Zeit `T = 1334ms`

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit
  - wird mit jedem Tick inkrementiert

Beispiel: absolute Zeit `T = 1334ms`

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit
  - wird mit jedem Tick inkrementiert •

Beispiel: absolute Zeit `T = 1335ms`

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit
  - wird mit jedem Tick inkrementiert ●●

Beispiel: absolute Zeit `T = 1336ms`

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit
  - wird mit jedem Tick inkrementiert •••

Beispiel: absolute Zeit `T = 1337ms`

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit
  - wird mit jedem Tick inkrementiert
- Berechnung der Endzeit beim Einfügen neuer Threads

Beispiel: absolute Zeit `T = 1337ms`

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit
  - wird mit jedem Tick inkrementiert
- Berechnung der Endzeit beim Einfügen neuer Threads

Beispiel: absolute Zeit `T = 1337ms`

1. Thread **foo**: `666ms + 1337ms`

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit
  - wird mit jedem Tick inkrementiert
- Berechnung der Endzeit beim Einfügen neuer Threads

Beispiel: absolute Zeit `T = 1337ms`

1. Thread **foo**: `666ms + 1337ms`

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit
  - wird mit jedem Tick inkrementiert
- Berechnung der Endzeit beim Einfügen neuer Threads

Beispiel: absolute Zeit `T = 1337ms`

1. Thread **foo**: `666ms + 1337ms`
2. Thread **bar**: `23ms + 1337ms`

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit
  - wird mit jedem Tick inkrementiert
- Berechnung der Endzeit beim Einfügen neuer Threads

Beispiel: absolute Zeit `T = 1337ms`

1. Thread **foo**: `666ms + 1337ms`
2. Thread **bar**: `23ms + 1337ms`

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit
  - wird mit jedem Tick inkrementiert
- Berechnung der Endzeit beim Einfügen neuer Threads
- Einordnen in einer Vorrangwarteschlange ($\mathcal{O}(n)$)

Beispiel: absolute Zeit `T = 1337ms`

1. Thread **foo**: `666ms + 1337ms`
2. Thread **bar**: `23ms + 1337ms`

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit
  - wird mit jedem Tick inkrementiert
- Berechnung der Endzeit beim Einfügen neuer Threads
- Einordnen in einer Vorrangwarteschlange ($\mathcal{O}(n)$)

Beispiel: absolute Zeit `T = 1337ms`

1. Thread **foo**: `666ms + 1337ms`
2. Thread **bar**: `23ms + 1337ms`

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit
  - wird mit jedem Tick inkrementiert
- Berechnung der Endzeit beim Einfügen neuer Threads
- Einordnen in einer Vorrangwarteschlange ($\mathcal{O}(n)$)

Beispiel: absolute Zeit `T = 1337ms`

1. Thread **foo**: `666ms + 1337ms`
2. Thread **bar**: `23ms + 1337ms`
3. Thread **baz**: `42ms + 1360ms`

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit
  - wird mit jedem Tick inkrementiert
- Berechnung der Endzeit beim Einfügen neuer Threads
- Einordnen in einer Vorrangwarteschlange ($\mathcal{O}(n)$)

Beispiel: absolute Zeit `T = 1337ms`

1. Thread **foo**: `666ms + 1337ms`
2. Thread **bar**: `23ms + 1337ms`
3. Thread **baz**: `42ms + 1337ms`

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit
  - wird mit jedem Tick inkrementiert
- Berechnung der Endzeit beim Einfügen neuer Threads
- Einordnen in einer Vorrangwarteschlange ($\mathcal{O}(n)$)

Beispiel: absolute Zeit `T = 1337ms`

1. Thread **foo**: `666ms + 1337ms`
2. Thread **bar**: `23ms + 1337ms`
3. Thread **baz**: `42ms + 1337ms`

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit
  - wird mit jedem Tick inkrementiert
- Berechnung der Endzeit beim Einfügen neuer Threads
- Einordnen in einer Vorrangwarteschlange ($\mathcal{O}(n)$)
- Wenn die aktuelle Zeit T dem ersten Element entspricht: Thread wieder dem Scheduler übergeben ($\mathcal{O}(1)$)

Beispiel: absolute Zeit `T = 1337ms`

1. Thread **foo**: `666ms + 1337ms`
2. Thread **bar**: `23ms + 1337ms`
3. Thread **baz**: `42ms + 1337ms`

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit
  - wird mit jedem Tick inkrementiert
- Berechnung der Endzeit beim Einfügen neuer Threads
- Einordnen in einer Vorrangwarteschlange ($\mathcal{O}(n)$)
- Wenn die aktuelle Zeit T dem ersten Element entspricht:
  Thread wieder dem Scheduler übergeben ($\mathcal{O}(1)$)

Beispiel: absolute Zeit `T = 1360ms`

1. Thread **foo**: `666ms + 1337ms`
2. Thread **bar**: `23ms + 1337ms`
3. Thread **baz**: `42ms + 1337ms`

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit
  - wird mit jedem Tick inkrementiert
- Berechnung der Endzeit beim Einfügen neuer Threads
- Einordnen in einer Vorrangwarteschlange ($\mathcal{O}(n)$)
- Wenn die aktuelle Zeit T dem ersten Element entspricht:
  Thread wieder dem Scheduler übergeben ($\mathcal{O}(1)$)

Nachteile

- Absolute Zeit ist ein neuer Zustand
- Bei 32bit Überlauf *möglich* (nach 49.7 Tagen)

Alternative Variante

- Einführung einer absoluten Zeit
  - wird mit jedem Tick inkrementiert
- Berechnung der Endzeit beim Einfügen neuer Threads
- Einordnen in einer Vorrangwarteschlange ($\mathcal{O}(n)$)
- Wenn die aktuelle Zeit T dem ersten Element entspricht:
  Thread wieder dem Scheduler übergeben ($\mathcal{O}(1)$)

Nachteile

- Absolute Zeit ist ein neuer Zustand
- Bei 32bit Überlauf *möglich* (nach 49.7 Tagen)

Geht das nicht effizienter (ohne solche Probleme)?

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert (negative Zeitdifferenzen sind nicht erlaubt!)

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert

Beispiel:

1. Thread **foo**: `666ms`

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert

Beispiel:

1. Thread **foo**: `666ms`

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit t_0 = `0ms`

Beispiel:

1. Thread **foo**: `666ms`

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit t_0 = `0ms`

Beispiel:

1. Thread **foo**: `666ms` – t_0 = `666ms`

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit t_0 = `0ms`

Beispiel:

1. Thread **foo**: `666ms`

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit t_0 = `0ms`

Beispiel:

1. Thread **foo**: `666ms`
2. Thread **bar**: `23ms`

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit t_0 = `0ms`

Beispiel:

1. Thread **foo**: `666ms`
2. Thread **bar**: `23ms`

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit t_0 = `0ms`
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)

Beispiel:

1. Thread **foo**: `666ms`
2. Thread **bar**: `23ms`

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit t_0 = `0ms`
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)

Beispiel:

1. Thread **foo**: `666ms`
2. Thread **bar**: `23ms` – t_0 = `23ms`

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit t_0 = `0ms`
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)

Beispiel:

1. Thread **foo**: `666ms`
2. Thread **bar**: `23ms`

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit t_0 = `0ms`
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)
  - Nachfolgendes Element muss angepasst werden ($\mathcal{O}(1)$)

Beispiel:

1. Thread **foo**: `666ms`
2. Thread **bar**: `23ms`

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit $t_0 = \texttt{0ms}$
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)
  - Nachfolgendes Element muss angepasst werden ($\mathcal{O}(1)$)

Beispiel:

1. Thread **foo**: $\texttt{666ms} - t_{\texttt{bar}} = \texttt{643ms}$
2. Thread **bar**: $\texttt{23ms}$

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit t_0 = `0ms`
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)
  - Nachfolgendes Element muss angepasst werden ($\mathcal{O}(1)$)

Beispiel:

1. Thread **foo**: `643ms`
2. Thread **bar**: `23ms`

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit $t_0 = \texttt{0ms}$
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)
  - Nachfolgendes Element muss angepasst werden ($\mathcal{O}(1)$)

Beispiel:

1. Thread **foo**: `643ms`
2. Thread **bar**: `23ms`
3. Thread **baz**: `42ms`

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit $t_0 = \texttt{0ms}$
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)
  - Nachfolgendes Element muss angepasst werden ($\mathcal{O}(1)$)

Beispiel:

1. Thread **foo**: `643ms`
2. Thread **bar**: `23ms`
3. Thread **baz**: `42ms`

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit $t_0 = \texttt{0ms}$
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)
  - Nachfolgendes Element muss angepasst werden ($\mathcal{O}(1)$)

Beispiel:

1. Thread **foo**: 643ms
2. Thread **bar**: 23ms
3. Thread **baz**: $42\texttt{ms} - t_0 = 42\texttt{ms}$

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit $t_0 = \texttt{0ms}$
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)
  - Nachfolgendes Element muss angepasst werden ($\mathcal{O}(1)$)

Beispiel:

1. Thread **foo**: 643ms
2. Thread **bar**: 23ms
3. Thread **baz**: $\texttt{42ms} - t_0 = \texttt{42ms} > t_{\texttt{bar}}$

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit $t_0 = \texttt{0ms}$
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)
  - Nachfolgendes Element muss angepasst werden ($\mathcal{O}(1)$)

Beispiel:

1. Thread **foo**: `643ms`
2. Thread **bar**: `23ms`
3. Thread **baz**: $\texttt{42ms} - t_0 - t_{\texttt{bar}} = \texttt{19ms}$

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit t_0 = `0ms`
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)
  - Nachfolgendes Element muss angepasst werden ($\mathcal{O}(1)$)

Beispiel:

1. Thread **foo**: `643ms`
2. Thread **bar**: `23ms`
3. Thread **baz**: `19ms`

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit $t_0 = \texttt{0ms}$
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)
  - Nachfolgendes Element muss angepasst werden ($\mathcal{O}(1)$)

  $\Rightarrow$ keine Vorrangwarteschlange!

Beispiel:

1. Thread **foo**: 643ms
2. Thread **bar**: 23ms
3. Thread **baz**: 19ms

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit $t_0 = \texttt{0ms}$
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)
  - Nachfolgendes Element muss angepasst werden ($\mathcal{O}(1)$)

  $\Rightarrow$ keine Vorrangwarteschlange!

Beispiel:

1. Thread **foo**: $\texttt{643ms} - t_{\texttt{baz}} = \texttt{624ms}$
2. Thread **bar**: $\texttt{23ms}$
3. Thread **baz**: $\texttt{19ms}$

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit $t_0 = \texttt{0ms}$
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)
  - Nachfolgendes Element muss angepasst werden ($\mathcal{O}(1)$)

  $\Rightarrow$ keine Vorrangwarteschlange!

Beispiel:

1. Thread **foo**: 624ms
2. Thread **bar**: 23ms
3. Thread **baz**: 19ms

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit $t_0 = \texttt{0ms}$
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)
  - Nachfolgendes Element muss angepasst werden ($\mathcal{O}(1)$)

  $\Rightarrow$ keine Vorrangwarteschlange!
- Erstes Element wird mit jedem Tick dekrementiert

Beispiel:

1. Thread **foo**: 624ms
2. Thread **bar**: 23ms
3. Thread **baz**: 19ms

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit $t_0 = 0\text{ms}$
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)
  - Nachfolgendes Element muss angepasst werden ($\mathcal{O}(1)$)

  $\Rightarrow$ keine Vorrangwarteschlange!
- Erstes Element wird mit jedem Tick dekrementiert •

Beispiel:

1. Thread **foo**: 624ms
2. Thread **bar**: 23ms
3. Thread **baz**: 19ms

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit $t_0 = \texttt{0ms}$
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)
  - Nachfolgendes Element muss angepasst werden ($\mathcal{O}(1)$)

  $\Rightarrow$ keine Vorrangwarteschlange!
- Erstes Element wird mit jedem Tick dekrementiert ••

Beispiel:

1. Thread **foo**: 624ms
2. Thread **bar**: 23ms
3. Thread **baz**: 19ms

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit $t_0 = \texttt{0ms}$
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)
  - Nachfolgendes Element muss angepasst werden ($\mathcal{O}(1)$)

  $\Rightarrow$ keine Vorrangwarteschlange!
- Erstes Element wird mit jedem Tick dekrementiert •••

Beispiel:

1. Thread **foo**: `624ms`
2. Thread **bar**: `23ms`
3. Thread **baz**: `19ms`

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit t_0 = `0ms`
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)
  - Nachfolgendes Element muss angepasst werden ($\mathcal{O}(1)$)

  $\Rightarrow$ keine Vorrangwarteschlange!
- Erstes Element wird mit jedem Tick dekrementiert und bei 0 dem Scheduler übergeben

  Beispiel:
  1. Thread **foo**: `624ms`
  2. Thread **bar**: `23ms`
  3. Thread **baz**: `19ms`

Effiziente Variante (Optional!)

- Verwendung der relativen Delta-Zeit
  - Es wird nur die Zeitdifferenz zum Vorgänger gespeichert
  - Vorgänger des ersten Elements hat Zeit $t_0 = \texttt{0ms}$
- Neue Threads nach Schlafdauer einordnen ($\mathcal{O}(n)$)
  - Nachfolgendes Element muss angepasst werden ($\mathcal{O}(1)$)

  $\Rightarrow$ keine Vorrangwarteschlange!
- Erstes Element wird mit jedem Tick dekrementiert und bei 0 dem Scheduler übergeben ($\mathcal{O}(1)$)

  Beispiel:
  1. Thread **foo**: 624ms
  2. Thread **bar**: 23ms
  3. Thread **baz**: 19ms

Umsetzung

Aufgaben

- Implementierung von Semaphoren mit passivem Warten
  - Verwendung in der neuen `getKey()` Funktion
- Zeitgesteuertes Schlafen der Threads
- Leerlauf des Prozessor (falls keine Threads vorhanden)
- Kapselung in Systemaufrufschnittstellen (`syscall`)
  welche sich um den Wechsel in die Epilogebene kümmern

(viel zu) viele Wartezimmer

- jede Semaphore ist gleichzeitig ein Wartezimmer

(viel zu) viele Wartezimmer

- jede Semaphore ist gleichzeitig ein Wartezimmer
- und jeder Wecker (`bell`) ebenfalls
  - auch wenn bei unseren Weckern nur je ein Faden darin weilt
  - → einfache Implementierung, da wir beim Wecker die neuen Ablaufplanmethoden für die Semaphoren verwenden können.
    Wirkt aber auf den ersten Blick halt komisch.

(viel zu) viele Wartezimmer

- jede Semaphore ist gleichzeitig ein Wartezimmer
- und jeder Wecker (`bell`) ebenfalls
  - auch wenn bei unseren Weckern nur je ein Faden darin weilt
  - → einfache Implementierung, da wir beim Wecker die neuen Ablaufplanmethoden für die Semaphoren verwenden können.
    Wirkt aber auf den ersten Blick halt komisch.
- Umsetzung durch Ableitung von `waitingroom`

(viel zu) viele Wartezimmer

- jede Semaphore ist gleichzeitig ein Wartezimmer
- und jeder Wecker (`bell`) ebenfalls
  - auch wenn bei unseren Weckern nur je ein Faden darin weilt
  - → einfache Implementierung, da wir beim Wecker die neuen Ablaufplanmethoden für die Semaphoren verwenden können.
    Wirkt aber auf den ersten Blick halt komisch.
- Umsetzung durch Ableitung von `waitingroom`
- Alle aktiven Wecker werden selbst wieder in einer verketteten Liste (vom `bellringer`) verwaltet

Richtig ticken

Der `bellringer` prüft regelmäßig die Wecker

- unter Verwendung des LAPIC Timers
- welcher mit `windup(1000)` auf Millisekundentakt gestellt wird
- es reicht, wenn eine CPU das übernimmt

Leerlauf

Problem: zu wenig Threads bereit

Leerlauf

Problem: zu wenig Threads bereit

Lösung: je ein `IdleThread` pro CPU

```
01 void IdleThread::action() {
02     while (true) {
03         if (!Scheduler::isEmpty())
04             GuardedScheduler::resume();
05     }
06 }
```

Leerlauf

Problem: zu wenig Threads bereit

Lösung: je ein `IdleThread` pro CPU

```
01 void IdleThread::action() {
02     while (true) {
03         if (!Scheduler::isEmpty())
04             GuardedScheduler::resume();
05     }
06 }
```

CPU fungiert effektiv als Heizkörper

Leerlauf

Problem: zu wenig Threads bereit

Lösung: je ein `IdleThread` pro CPU

```
01 void IdleThread::action() {
02     while (true) {
03         if (!Scheduler::isEmpty())
04             GuardedScheduler::resume();
05     }
06 }
```

CPU fungiert effektiv als Heizkörper, besser wäre jedoch ein Schlafzustand

`Core::idle()` hält CPU bis zum nächsten Interrupt an

Leerlauf

`Core::idle()` hält CPU bis zum nächsten Interrupt an

Leerlauf

`Core::idle()` hält CPU bis zum nächsten Interrupt an

```
01 void IdleThread::action() {
02     while (true) {
03         if (Scheduler::isEmpty())
04             Core::idle();
05         else
06             GuardedScheduler::resume();
07     }
08 }
```

Leerlauf

`Core::idle()` hält CPU bis zum nächsten Interrupt an

```
01 void IdleThread::action() {
02     while (true) {
03         if (Scheduler::isEmpty())
04             Core::idle();
05         else
06             GuardedScheduler::resume();
07     }
08 }
```

Thread ready

Leerlauf

`Core::idle()` hält CPU bis zum nächsten Interrupt an

```
01 void IdleThread::action() {
02     while (true) {
03         if (Scheduler::isEmpty())
04             Core::idle();
05         else
06             GuardedScheduler::resume();
07     }
08 }
```

Thread ready

Durch Aufwachen eines wartenden Threads (oder Neueinplanung bei MPStuBS) kann ein **Lost-Wakeup** passieren!

Leerlauf

`Core::idle()` hält CPU bis zum nächsten Interrupt an
(mittels atomaren `sti` und `hlt`)

```
01 void IdleThread::action() {
02     while (true) {
03         if (Scheduler::isEmpty())
04             Core::idle();
05         else
06             GuardedScheduler::resume();
07     }
08 }
```

Thread ready

Durch Aufwachen eines wartenden Threads (oder Neueinplanung bei MPStuBS) kann ein **Lost-Wakeup** passieren!

Leerlauf

`Core::idle()` hält CPU bis zum nächsten Interrupt an
(mittels atomaren `sti` und `hlt`)

```
01 void IdleThread::action() {
02     while (true) {
03         Core::Interrupt::disable();
04         if (Scheduler::isEmpty())
05             Core::idle();
06         else {
07             Core::Interrupt::enable();
08             GuardedScheduler::resume();
09         }
10     }
11 }
```

Leerlauf mittels `Core::idle()`

```
01 namespace Core {
02     inline void idle() {
03         asm volatile("sti\n\t"
04                      "hlt\n\t"
05                                  ::: "memory");
06     }
07 }
```

Leerlauf in MPStuBS

Problem: Sobald ein Thread bereit ist, soll eine CPU im Leerlauf sofort mit der Abarbeitung beginnen

Leerlauf in MPStuBS

Problem: Sobald ein Thread bereit ist, soll eine CPU im Leerlauf sofort mit der Abarbeitung beginnen

Lösung: Aufwecken der CPU mittels IPI

Weitere Fragen?

Fast geschafft - dies ist die letzte *Pflicht*aufgabe!