

Threads – Einführung

- ▶ Die Ausführung eines **Java**-Programms besteht in Wahrheit nicht aus einem, sondern **mehreren** parallel laufenden **Threads**.
- ▶ Ein Thread ist ein sequentieller Ausführungsstrang.
- ▶ Der Aufruf eines Programms startet einen Thread **main**, der die Methode **main()** des Programms ausführt.
- ▶ Ein weiterer Thread, den das Laufzeitsystem parallel startet, ist die **Garbage Collection**.
- ▶ Die Garbage Collection soll mittlerweile nicht mehr erreichbare Objekte beseitigen und den von ihnen belegten Speicherplatz der weiteren Programmausführung zur Verfügung stellen.

Threads – Anwendungen

- ▶ Mehrere Threads sind auch nützlich, um
 - ▶ ...mehrere Eingabe-Quellen zu überwachen (z.B. Maus, Tastatur) ↑**Graphik**;
 - ▶ ...während der Blockierung einer Aufgabe etwas anderes Sinnvolles erledigen zu können;
 - ▶ ...die Rechenkraft mehrerer Prozessoren auszunutzen.
- ▶ Neue Threads können deshalb vom Programm selbst erzeugt und gestartet werden.
- ▶ Dazu stellt **Java** die Klasse **Thread** und das Interface **Runnable** bereit.

Version A

```
1 public class MyThread extends Thread {
2     public void hello(String s) {
3         System.out.println(s);
4     }
5     public void run() {
6         hello("I'm running ...");
7     } // end of run()
8     public static void main(String[] args) {
9         MyThread t = new MyThread();
10        t.start();
11        System.out.println("Thread has been started
12                               ...");
13    } // end of main()
14 } // end of class MyThread
```

Erläuterungen

- ▶ Neue Threads werden für Objekte aus (Unter-) Klassen der Klasse `Thread` angelegt.
- ▶ Jede Unterklasse von `Thread` sollte die Objekt-Methode `public void run();` implementieren.
- ▶ Ist `t` ein `Thread`-Objekt, dann bewirkt der Aufruf `t.start();` das folgende:
 1. ein neuer Thread wird initialisiert;
 2. die (parallele) Ausführung der Objektmethode `run()` für `t` wird angestoßen;
 3. die eigene Programmausführung wird hinter dem Aufruf fortgesetzt.

Version B

```
1 public class MyRunnable implements Runnable {
2     public void hello(String s) {
3         System.out.println(s);
4     }
5     public void run() {
6         hello("I'm running ...");
7     } // end of run()
8     public static void main(String[] args) {
9         Thread t = new Thread(new MyRunnable());
10        t.start();
11        System.out.println("Thread has been started
12                               ...");
13    } // end of main()
14 } // end of class MyRunnable
```

Erläuterungen

- ▶ Auch das Interface `Runnable` verlangt die Implementierung einer Objektmethode `public void run()`;
- ▶ `public Thread(Runnable obj)`; legt für ein `Runnable`-Objekt `obj` ein `Thread`-Objekt an.
- ▶ Ist `t` das `Thread`-Objekt für das `Runnable obj`, dann bewirkt der Aufruf `t.start()`; das folgende:
 1. ein neuer Thread wird initialisiert;
 2. die (parallele) Ausführung der Objekt-Methode `run()` für `obj` wird angestoßen;
 3. die eigene Programm-Ausführung wird hinter dem Aufruf fortgesetzt.

Mögliche Ausführungen

Entweder

```
Thread has been started ...  
I'm running ...
```

oder

```
I'm running ...  
Thread has been started ...
```

Scheduling

- ▶ Ein Thread kann nur eine Operation ausführen, wenn ihm ein Prozessor (CPU) zur Ausführung zugeteilt worden ist.
- ▶ Im Allgemeinen gibt es mehr Threads als CPUs.
- ▶ Der **Scheduler** verwaltet die verfügbaren CPUs und teilt sie den Threads zu.
- ▶ Bei verschiedenen Programmläufen kann diese Zuteilung verschieden aussehen!!!
- ▶ Es gibt verschiedene Strategien, nach denen sich Scheduler richten können (↑**Betriebssysteme**). Z.B.:
 - ▶ Zeitscheibenverfahren
 - ▶ Naives Verfahren

Strategie

- ▶ Ein Thread erhält eine CPU nur für eine bestimmte Zeitspanne (**Time Slice**), in der er rechnen darf.
- ▶ Danach wird er unterbrochen. Dann darf ein anderer.

Beispiel: Zeitscheibenverfahren

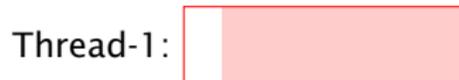
Thread-3: 

Thread-2: 

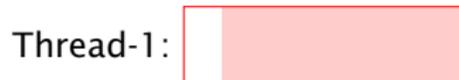
Thread-1: 

Schedule: 

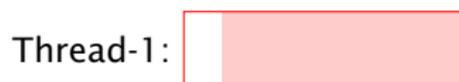
Beispiel: Zeitscheibenverfahren



Beispiel: Zeitscheibenverfahren



Beispiel: Zeitscheibenverfahren



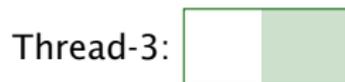
Beispiel: Zeitscheibenverfahren



Beispiel: Zeitscheibenverfahren



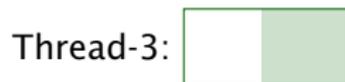
Beispiel: Zeitscheibenverfahren



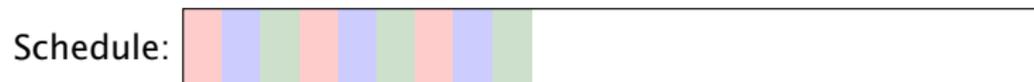
Beispiel: Zeitscheibenverfahren



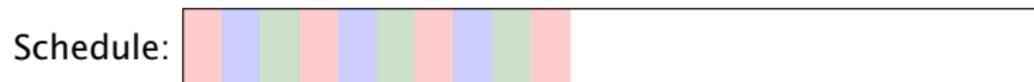
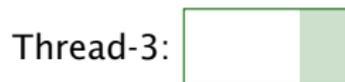
Beispiel: Zeitscheibenverfahren



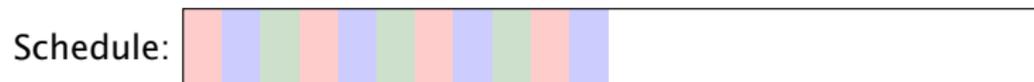
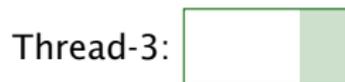
Beispiel: Zeitscheibenverfahren



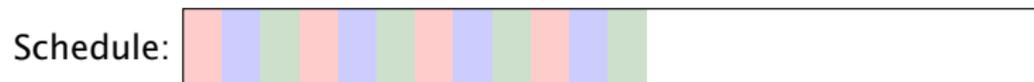
Beispiel: Zeitscheibenverfahren



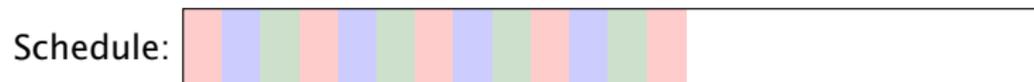
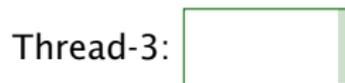
Beispiel: Zeitscheibenverfahren



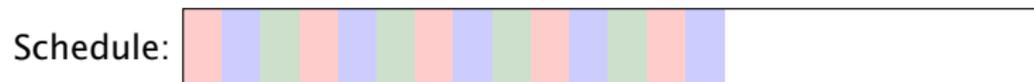
Beispiel: Zeitscheibenverfahren



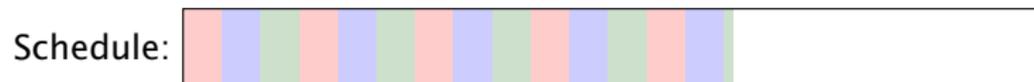
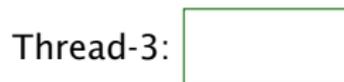
Beispiel: Zeitscheibenverfahren



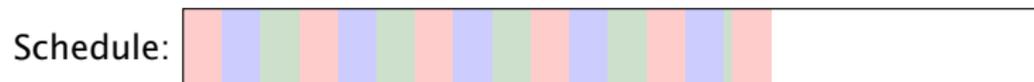
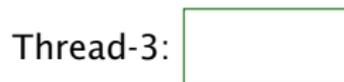
Beispiel: Zeitscheibenverfahren



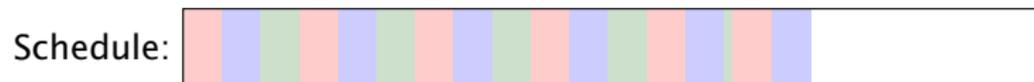
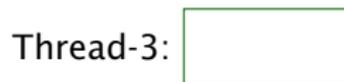
Beispiel: Zeitscheibenverfahren



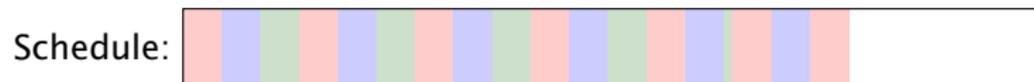
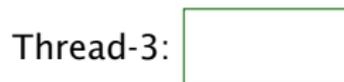
Beispiel: Zeitscheibenverfahren



Beispiel: Zeitscheibenverfahren



Beispiel: Zeitscheibenverfahren

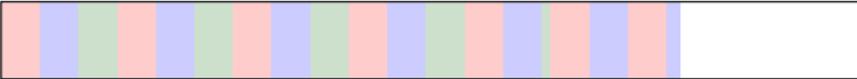


Beispiel: Zeitscheibenverfahren

Thread-3: 

Thread-2: 

Thread-1: 

Schedule: 

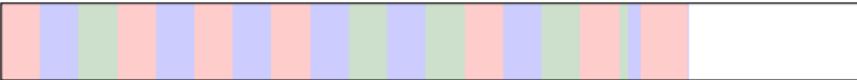
Beispiel: Zeitscheibenverfahren

Eine andere Ausführung:

Thread-3: 

Thread-2: 

Thread-1: 

Schedule: 

Erläuterungen – Zeitscheibenverfahren

- ▶ Ein Zeitscheiben-Scheduler versucht, jeden Thread **fair** zu behandeln, d.h. ab und zu Rechenzeit zuzuordnen — egal, welche Threads sonst noch Rechenzeit beanspruchen.
- ▶ Kein Thread hat jedoch Anspruch auf einen bestimmten Time-Slice.
- ▶ Für den Programmierer sieht es so aus, als ob sämtliche Threads „echt“ parallel ausgeführt werden, d.h. jeder über eine eigene CPU verfügt.

Strategie

- ▶ Erhält ein Thread eine CPU, darf er laufen, so lange er will...
- ▶ Gibt er die CPU wieder frei, darf ein anderer Thread arbeiten...

Beispiel – Naives Scheduling

Thread-3: 

Thread-2: 

Thread-1: 

Schedule: 

Beispiel

```
1 public class Start extends Thread {
2     public void run() {
3         System.out.println("I'm running...");
4         while (true);
5     }
6     public static void main(String[] args) {
7         (new Start()).start();
8         (new Start()).start();
9         (new Start()).start();
10        System.out.println("main is running...");
11        while (true);
12    }
13 } // end of class Start
```

Beispiel

Ausgabe (bei naivem Scheduling)

```
main is running...
```

Weil **main** nie fertig wird, erhalten die anderen Threads keine Chance, sie **verhungern**.

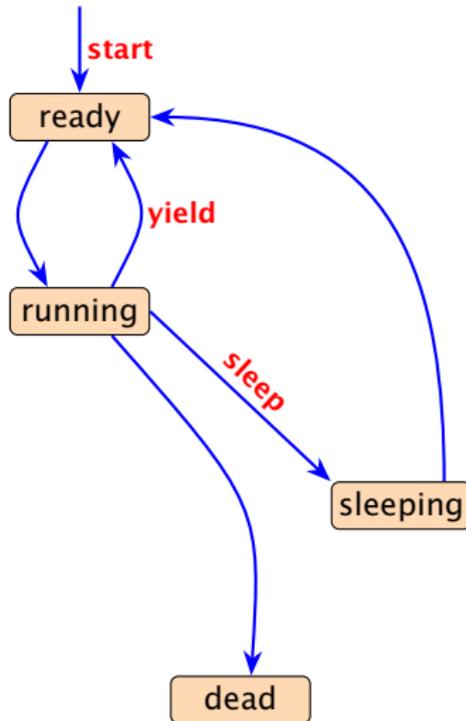
Faires Scheduling mit Zeitscheibenverfahren würde z.B. liefern:

```
I'm running...  
main is running...  
I'm running...  
I'm running...
```

Implementierung in Java

- ▶ **Java** legt nicht fest, wie intelligent der Scheduler ist.
 - ▶ Die aktuelle Implementierung unterstützt **fares** Scheduling.
 - ▶ Programme sollten aber für jeden Scheduler das **gleiche Verhalten** zeigen. Das heißt:
 - ▶ ... Threads, die aktuell nichts sinnvolles zu tun haben, z.B. weil sie auf Verstreichen der Zeit oder besseres Wetter warten, sollten stets ihre CPU anderen Threads zur Verfügung stellen.
 - ▶ ... Selbst wenn Threads etwas Vernünftiges tun, sollten sie ab und zu andere Threads laufen lassen.
- Achtung:** Threadwechsel ist teuer!!!
- ▶ Dazu verfügt jeder Thread über einen **Zustand**, der bei der Vergabe von Rechenzeit berücksichtigt wird.

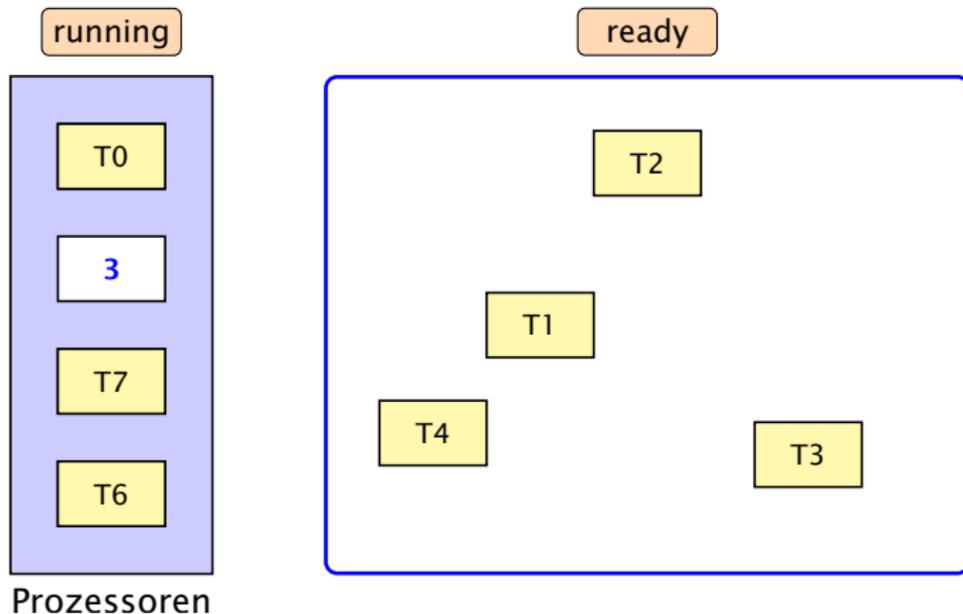
Threadzustände



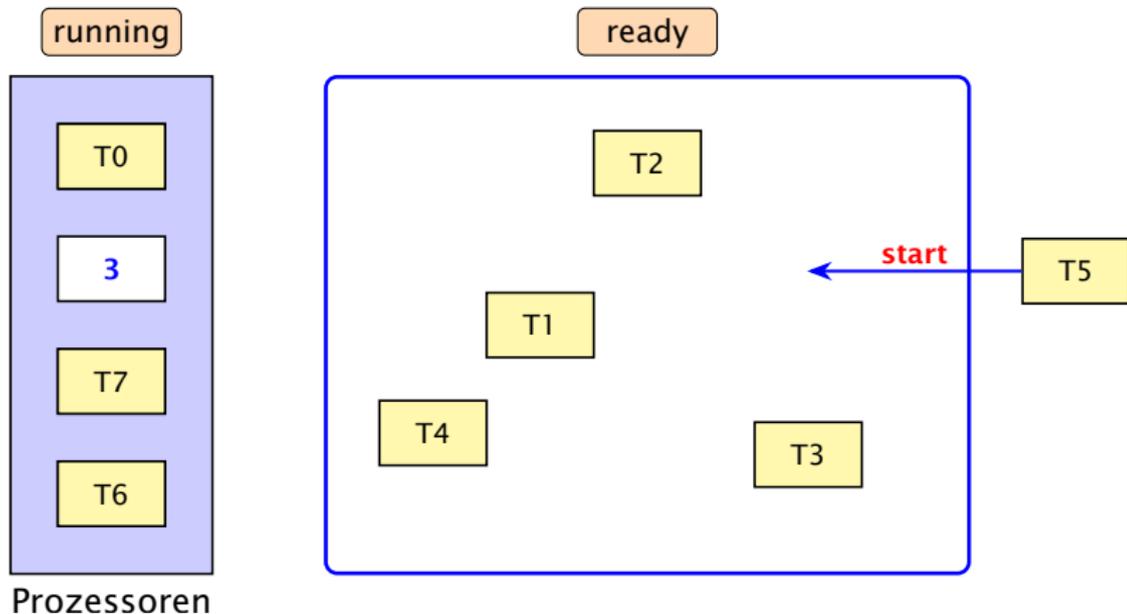
Threadzustände

- ▶ `public void start();` legt einen neuen Thread an, setzt den Zustand auf `ready` und übergibt damit den Thread dem Scheduler zur Ausführung.
- ▶ Der Scheduler ordnet den Threads, die im Zustand `ready` sind, Prozessoren zu („dispatching“). Aktuell laufende Threads haben den Zustand `running`.
- ▶ `public static void yield();` setzt den aktuellen Zustand zurück auf `ready` und unterbricht damit die aktuelle Programmausführung. Andere ausführbare Threads erhalten die Gelegenheit zur Ausführung.
- ▶ `public static void sleep(int msec) throws InterruptedException;` legt den aktuellen Thread für `msec` Millisekunden schlafen, indem der Thread in den Zustand `sleeping` wechselt.

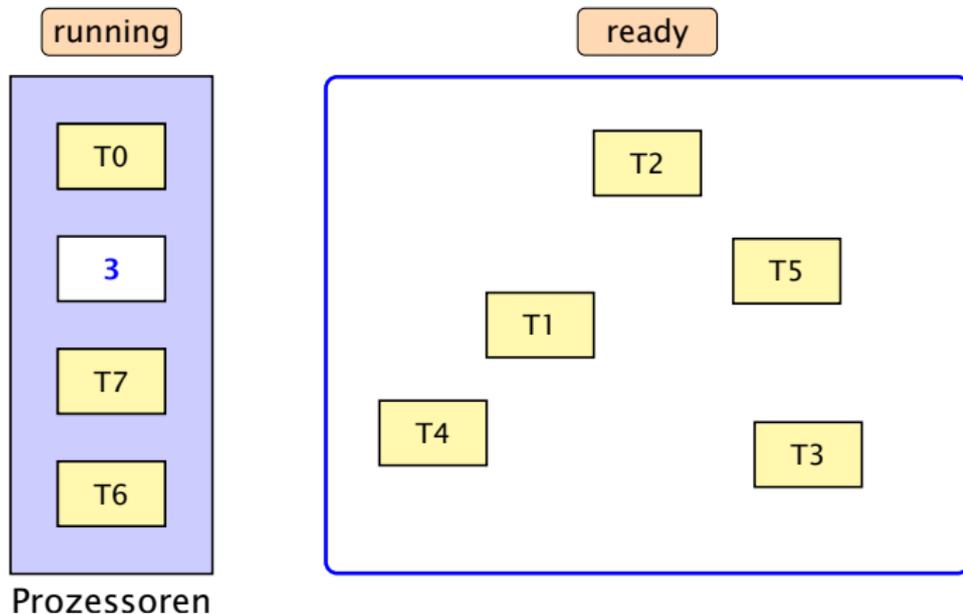
Threadzustände



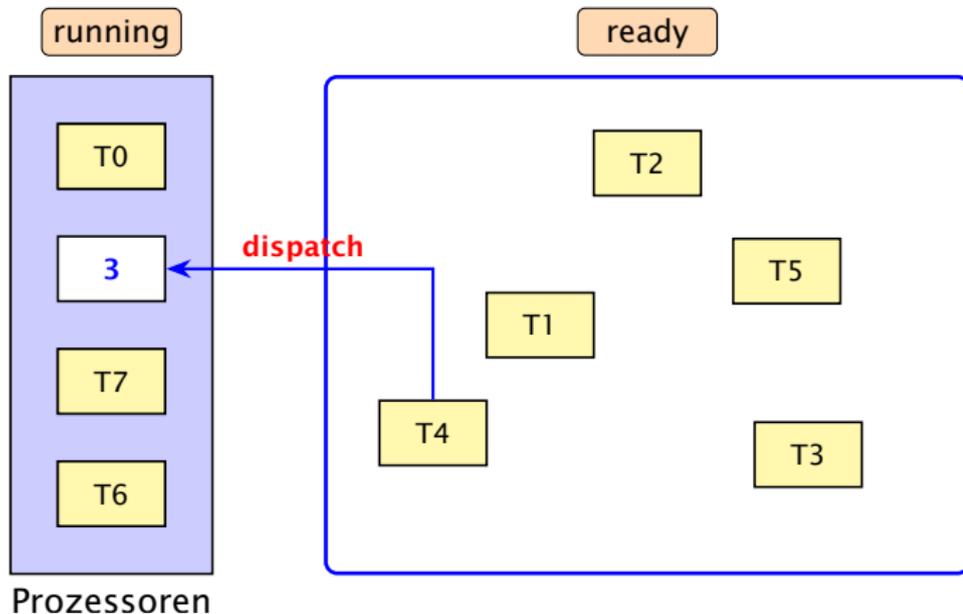
Threadzustände



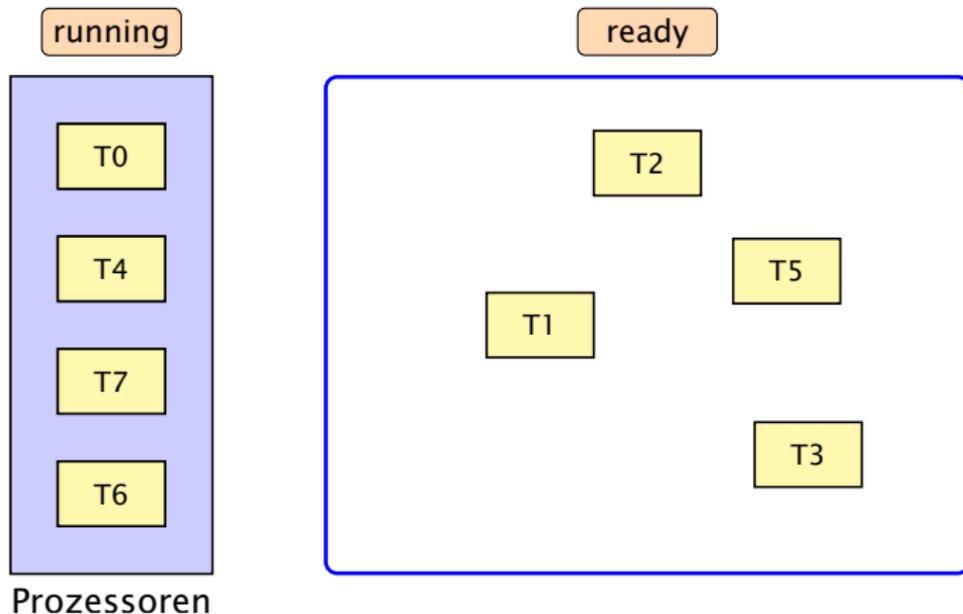
Threadzustände



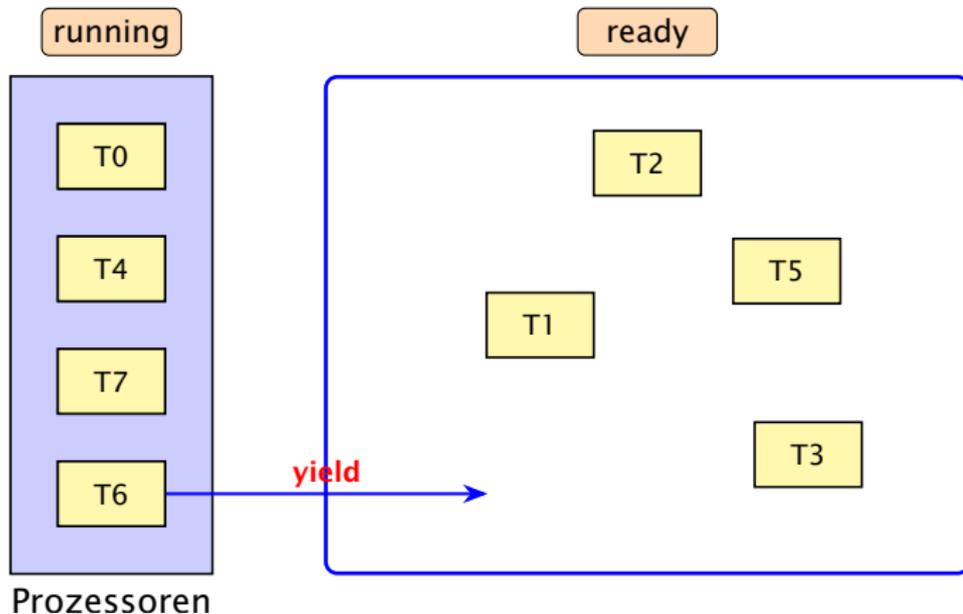
Threadzustände



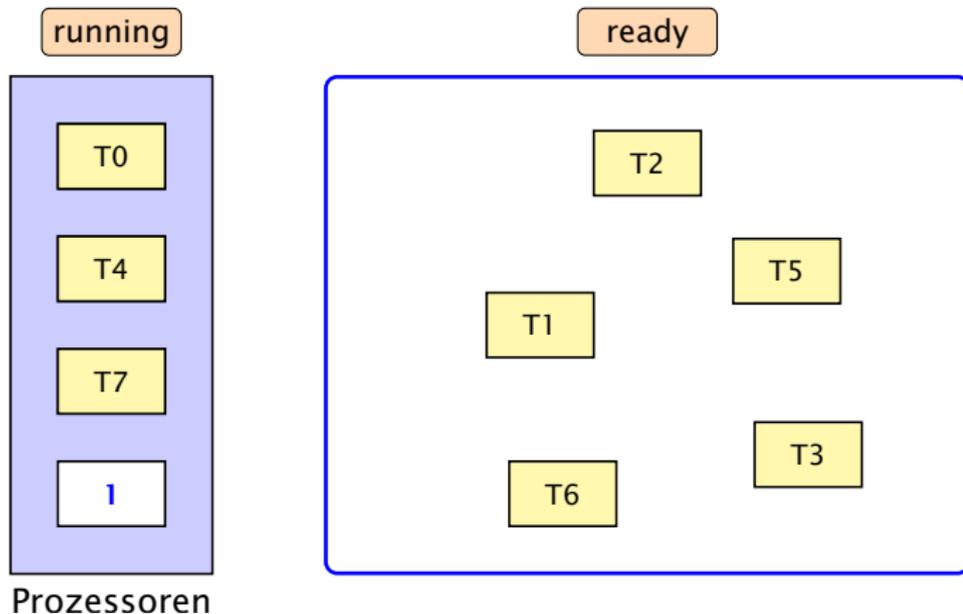
Threadzustände



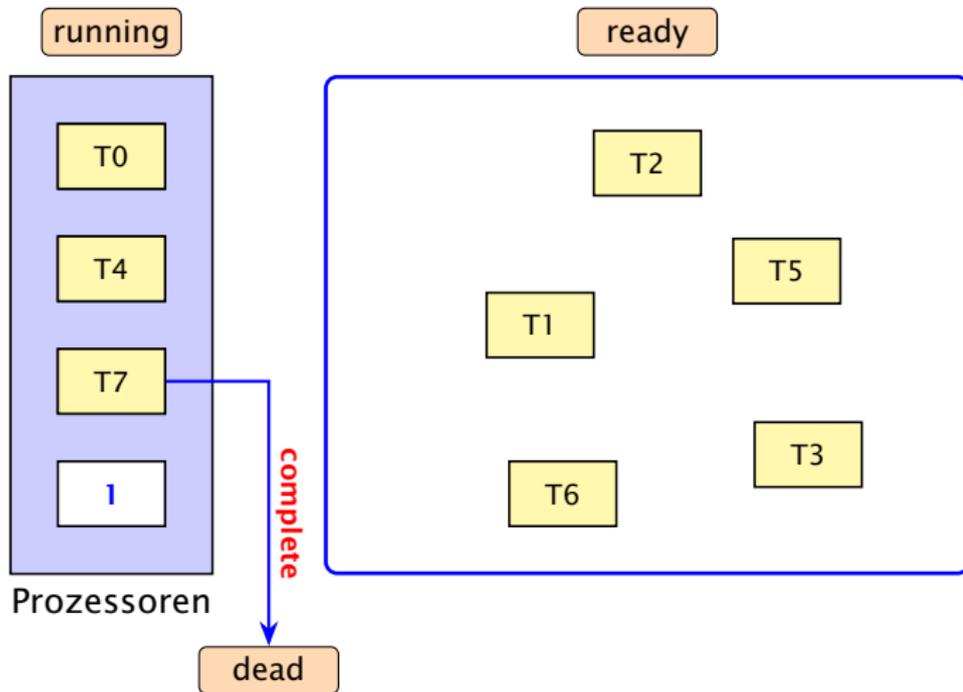
Threadzustände



Threadzustände



Threadzustände



16.1 Futures

- ▶ Die Berechnung eines Zwischenergebnisses kann lange dauern.
- ▶ Während dieser Berechnung kann möglicherweise etwas anderes Sinnvolles berechnet werden.

Idee:

- ▶ Berechne das Zwischenergebnis in einem eigenen Thread.
- ▶ Greife auf den Wert erst zu, wenn sich der Thread beendet hat.

16.1 Futures

Eine **Future** startet die Berechnung eines Werts, auf den später zugegriffen wird. Das generische Interface

```
public interface Callable<T> {  
    T call () throws Exception;  
}
```

aus `java.util.concurrent` beschreibt Klassen, für deren Objekte ein Wert vom Typ `T` berechnet werden kann.

```
1 public class Future<T> implements Runnable {  
2     private T value = null;  
3     private Exception exc = null;  
4     private Callable<T> work;  
5     private Thread task;  
6 // continued...
```

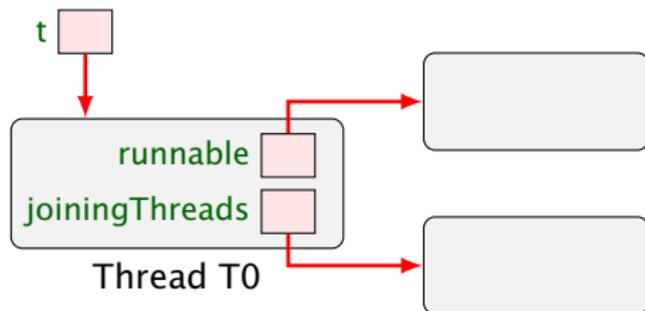
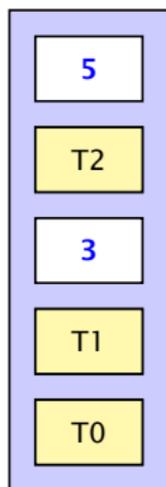
Implementierung

```
7     public Future<T>(Callable<T> w) {
8         work = w;
9         task = new Thread (this);
10        task.start();
11    }
12    public void run() {
13        try {value = work.call();}
14        catch (Exception e) { exc = e;}
15    }
16    public T get() throws Exception {
17        task.join();
18        if (exc != null) throw exc;
19        return value;
20    }
21 }
```

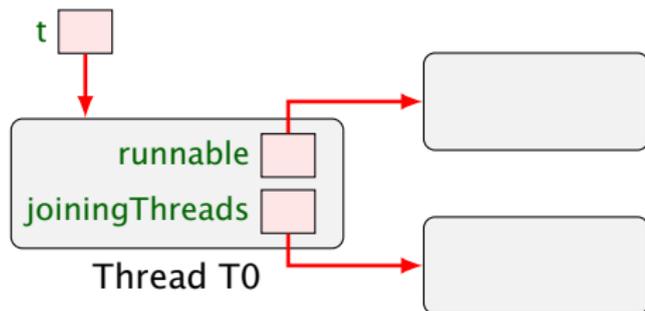
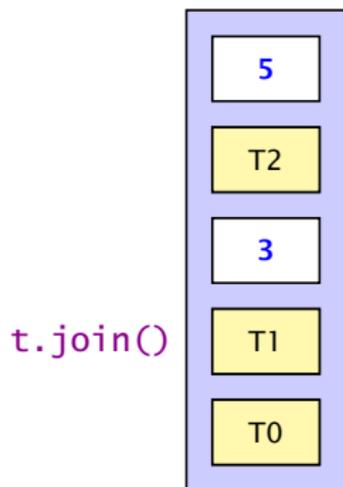
Erläuterungen

- ▶ Der Konstruktor erhält ein `Callable`-Objekt.
- ▶ Die Methode `run()` ruft für dieses Objekt die Methode `call()` auf und speichert deren Ergebnis in dem Attribut `value` — bzw. eine geworfene Exception in `exc` ab.
- ▶ Der Konstruktor legt ein Thread-Objekt für die Future an und startet diesen Thread, der dann `run()` ausführt.
- ▶ Die Methode `get()` wartet auf Beendigung des Threads. Dazu verwendet sie die Objekt-Methode `public final void join() throws InterruptedException` der Klasse `Thread...`
- ▶ Dann liefert `get()` den berechneten Wert zurück — falls keine Exception geworfen wurde. Andernfalls wird die Exception `exc` erneut geworfen.

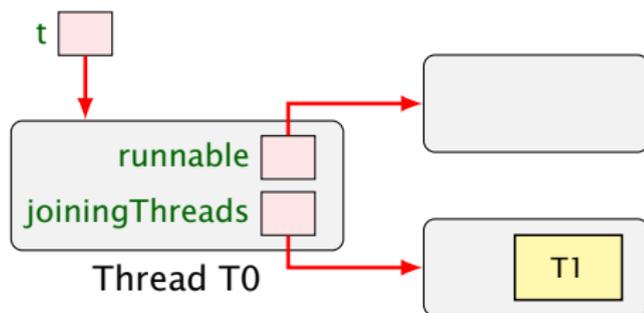
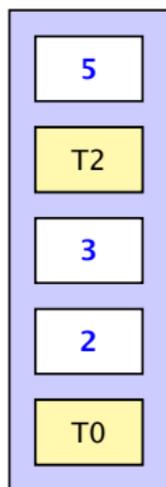
Die Join-Operation



Die Join-Operation



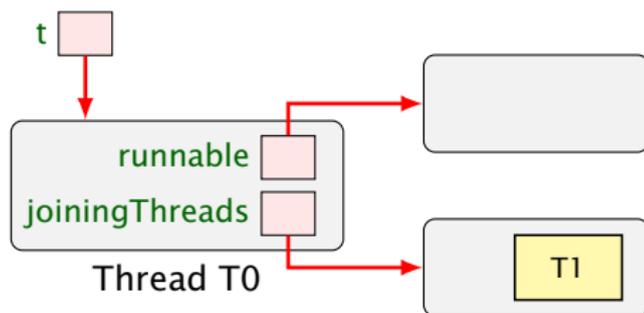
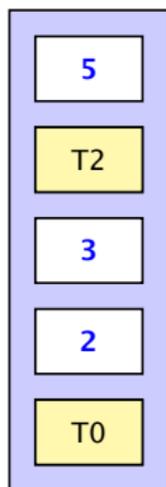
Die Join-Operation



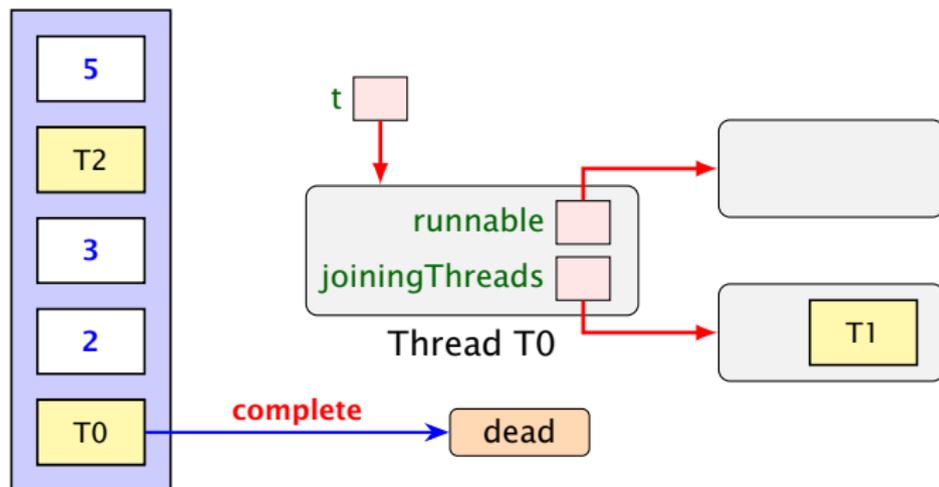
Erläuterungen

- ▶ Für jedes Threadobjekt `t` gibt es eine Schlange `ThreadQueue joiningThreads`.
- ▶ Threads, die auf Beendigung des Threads `t` warten, werden in diese Schlange eingefügt.
- ▶ Dabei gehen sie konzeptuell in einen Zustand `joining` über und werden aus der Menge der ausführbaren Threads entfernt.
- ▶ Beendet sich ein Thread, werden alle Threads, die auf ihn warteten, wieder aktiviert. . .

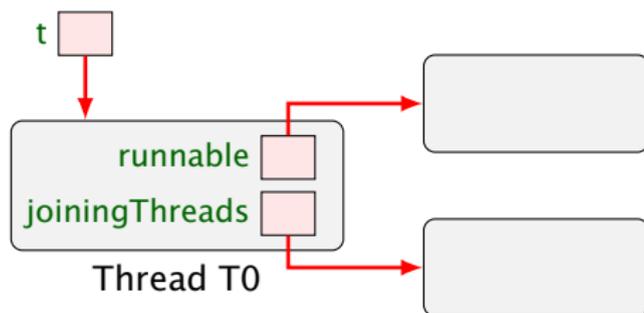
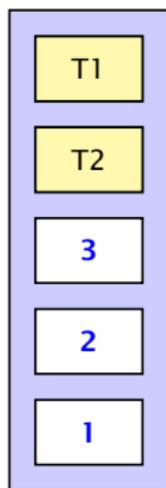
Die Join-Operation



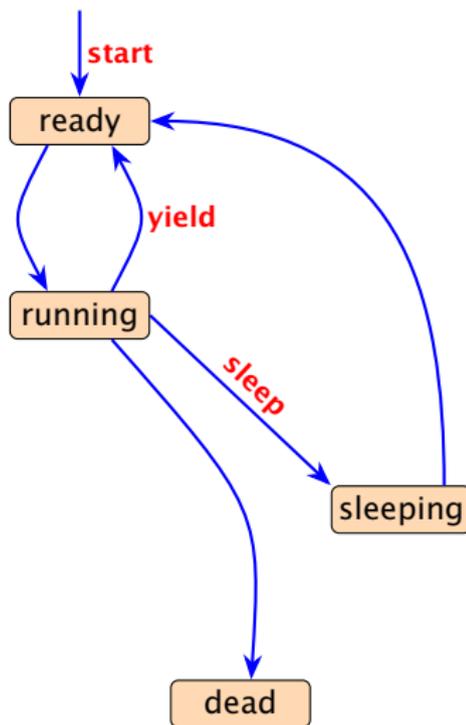
Die Join-Operation



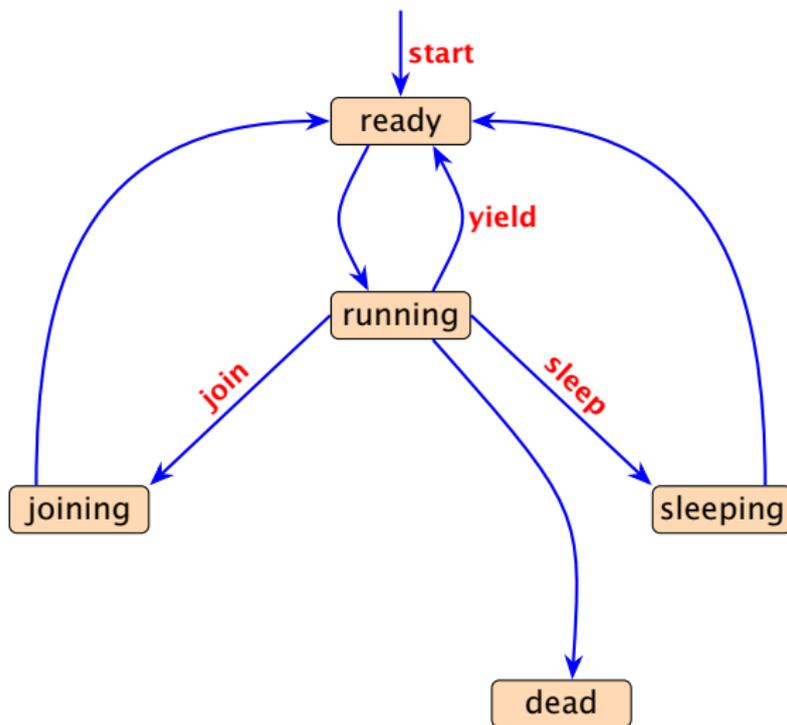
Die Join-Operation



Threadzustände



Threadzustände



Weiteres Beispiel

```
1 public class Join implements Runnable {
2     private static int count = 0;
3     private int n = count++;
4     private static Thread[] task = new Thread[3];
5     public void run() {
6         try {
7             if (n>0) {
8                 task[n-1].join();
9                 System.out.println("Thread-"+n+
10                    " joined Thread-"+(n-1));
11             }
12         } catch (InterruptedException e) {
13             System.err.println(e.toString());
14         }
15     } // continued...
```

Weiteres Beispiel

```
16     public static void main(String[] args) {
17         for(int i=0; i<3; i++)
18             task[i] = new Thread(new Join());
19         for(int i=0; i<3; i++)
20             task[i].start();
21     }
22 } // end of class Join
```

liefert:

```
> java Join
Thread-1 joined Thread-0
Thread-2 joined Thread-1
```

Variation

```
1 public class CW implements Runnable {
2     private static int count = 0;
3     private int n = count++;
4     private static Thread[] task = new Thread[3];
5     public void run() {
6         try { task[(n+1) % 3].join(); }
7         catch (InterruptedException e) {
8             System.err.println(e.toString());
9         }
10    }
11    public static void main(String[] args) {
12        for(int i=0; i<3; i++)
13            task[i] = new Thread(new CW());
14        for(int i=0; i<3; i++) task[i].start();
15    }
16 } // end of class CW
```

Variation

- ▶ Das Programm terminiert möglicherweise nicht...
- ▶ `task[0]` wartet auf `task[1]`,
`task[1]` wartet auf `task[2]`,
`task[2]` wartet auf `task[0]`

ist möglich...

`t.join` angewendet auf einen nicht gestarteten Thread, hat keine Auswirkungen. Deshalb kann das Programm je nach Scheduling auch durchlaufen...

Deadlock

- ▶ Jeder Thread geht in einen Wartezustand (hier: **joining**) über und wartet auf einen anderen Thread.
- ▶ Dieses Phänomen heißt auch **Circular Wait** oder **Deadlock** oder Verklemmung — eine unangenehme Situation, die man in seinen Programmen tunlichst vermeiden sollte.

Die Vermeidung von Deadlocks ist ein sehr schwieriges Problem.

16.2 Monitore

- ▶ Damit Threads sinnvoll miteinander kooperieren können, müssen sie miteinander Daten austauschen.
- ▶ Zugriff mehrerer Threads auf eine gemeinsame Variable ist problematisch, weil nicht feststeht, in welcher Reihenfolge die Threads auf die Variable zugreifen.
- ▶ Ein Hilfsmittel, um geordnete Zugriffe zu garantieren, sind **Monitore**.

Beispiel — Erhöhen einer Variablen

```
1 public class Inc implements Runnable {
2     private static int x = 0;
3     private static void pause(int t) {
4         try {
5             Thread.sleep((int) (Math.random()*t*1000));
6         } catch (InterruptedException e) {
7             System.err.println(e.toString());
8         }
9     }
10    public void run() {
11        String s = Thread.currentThread().getName();
12        pause(3); int y = x;
13        System.out.println(s+ " read "+y);
14        pause(4); x = y+1;
15        System.out.println(s+ " wrote "+(y+1));
16    }
17 // continued...
```

Beispiel

```
18     public static void main(String[] args) {
19         (new Thread(new Inc())).start();
20         pause(2);
21         (new Thread(new Inc())).start();
22         pause(2);
23         (new Thread(new Inc())).start();
24     }
25 } // end of class Inc
```

- ▶ `public static Thread currentThread();` liefert (eine Referenz auf) das ausführende Thread-Objekt.
- ▶ `public final String getName();` liefert den Namen des Thread-Objekts.
- ▶ Das Programm legt für 3 Objekte der Klasse `Inc` Threads an.
- ▶ Die Methode `run()` inkrementiert die Klassen-Variable `x`.

Beispiel

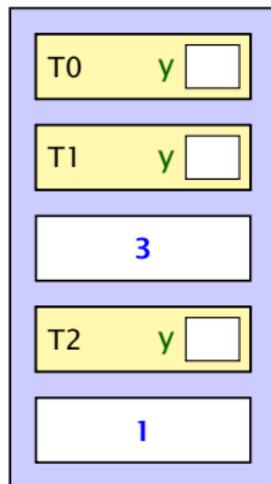
Mögliche Ausführung

```
> java Inc  
Thread-0 read 0  
Thread-0 wrote 1  
Thread-1 read 1  
Thread-2 read 1  
Thread-1 wrote 2  
Thread-2 wrote 2
```

x wurde dreimal erhöht, hat aber am Ende den Wert 2!!!

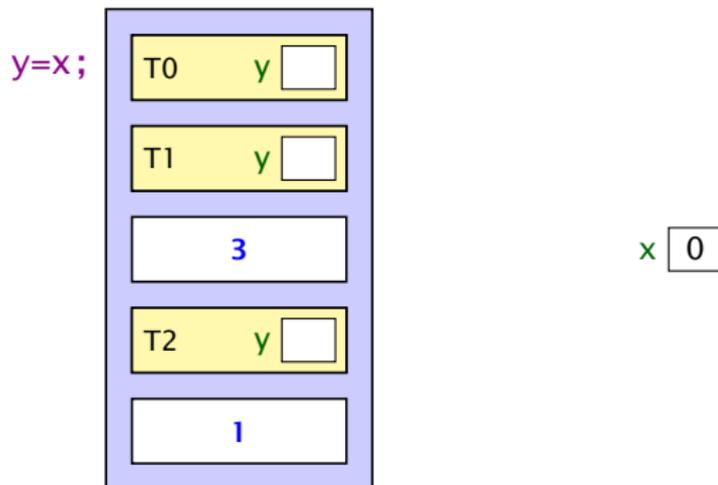
Beachte, dass das gleiche auch passieren könnte, wenn wir in der Methode `run()`, direkt `x=x+1` schreiben würden.

Erklärung

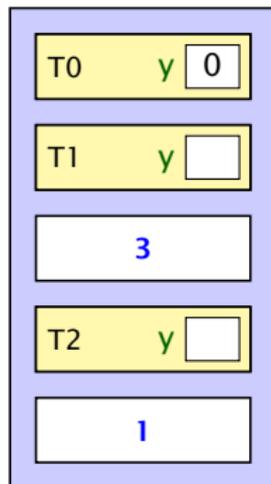


x 0

Erklärung

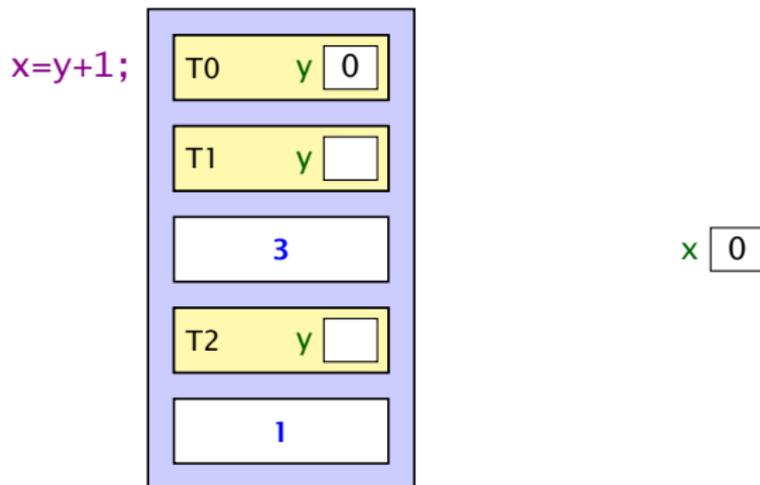


Erklärung

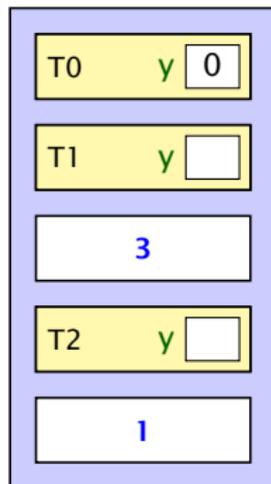


x

Erklärung

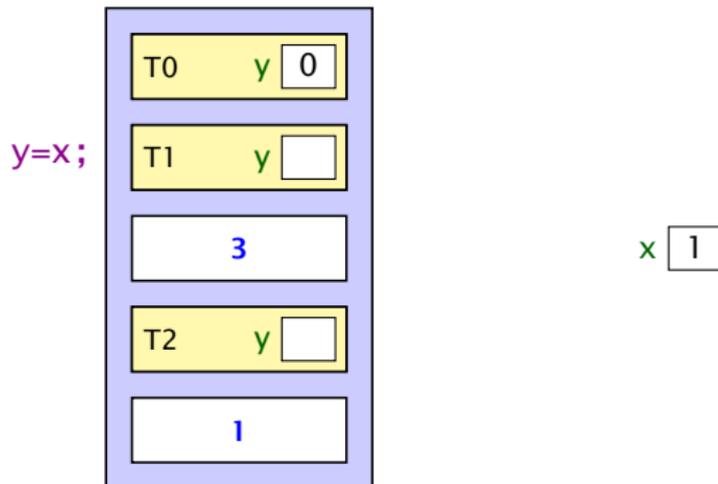


Erklärung

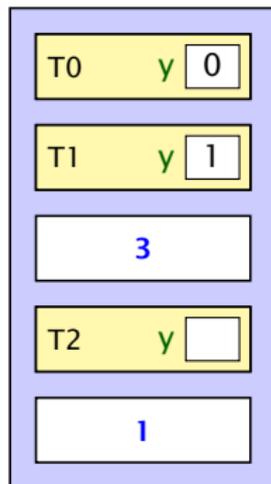


x 1

Erklärung

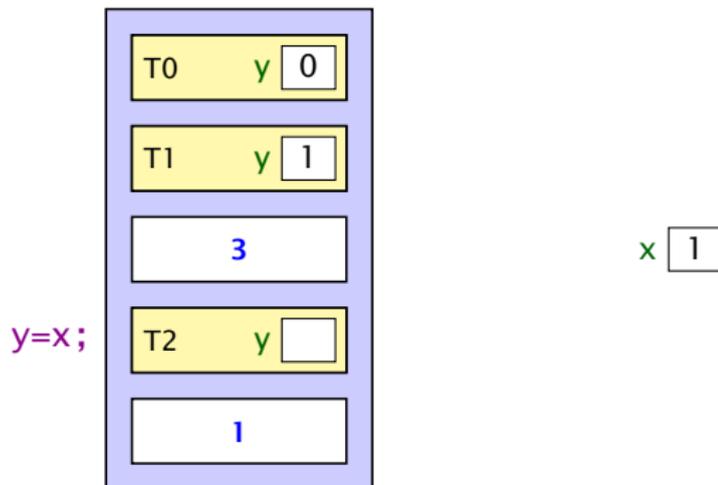


Erklärung

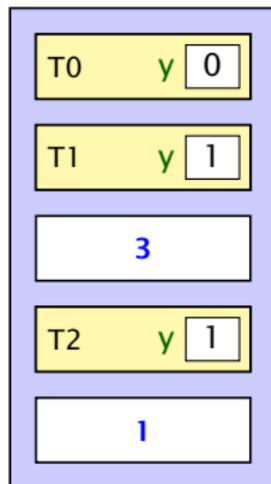


x 1

Erklärung

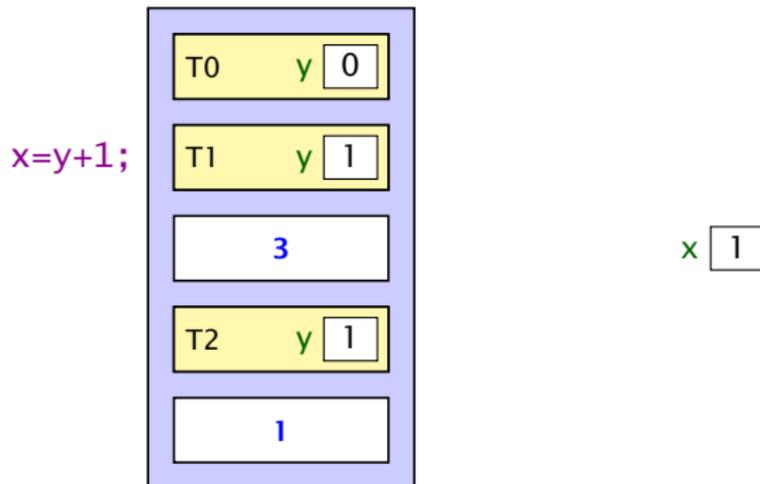


Erklärung

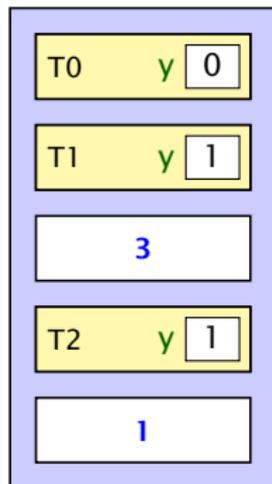


x 1

Erklärung

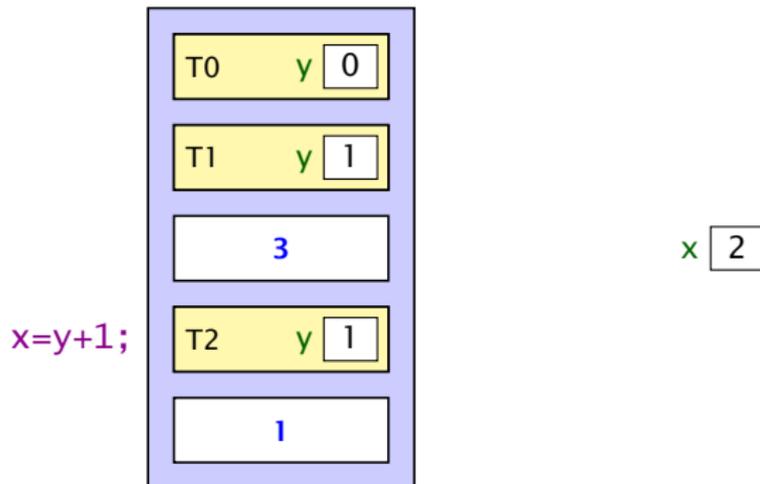


Erklärung

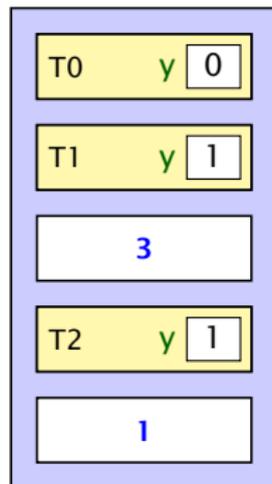


x 2

Erklärung



Erklärung

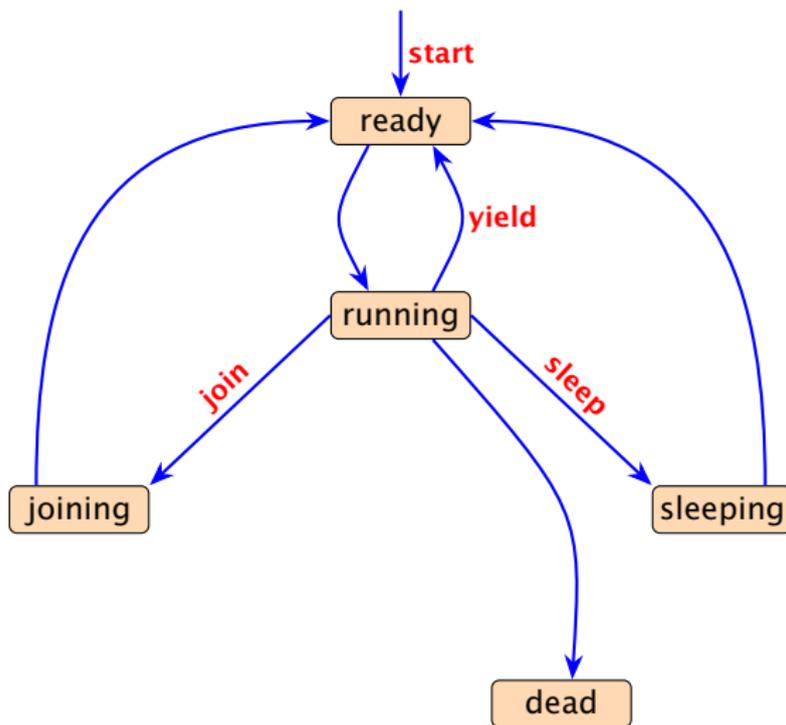


x 2

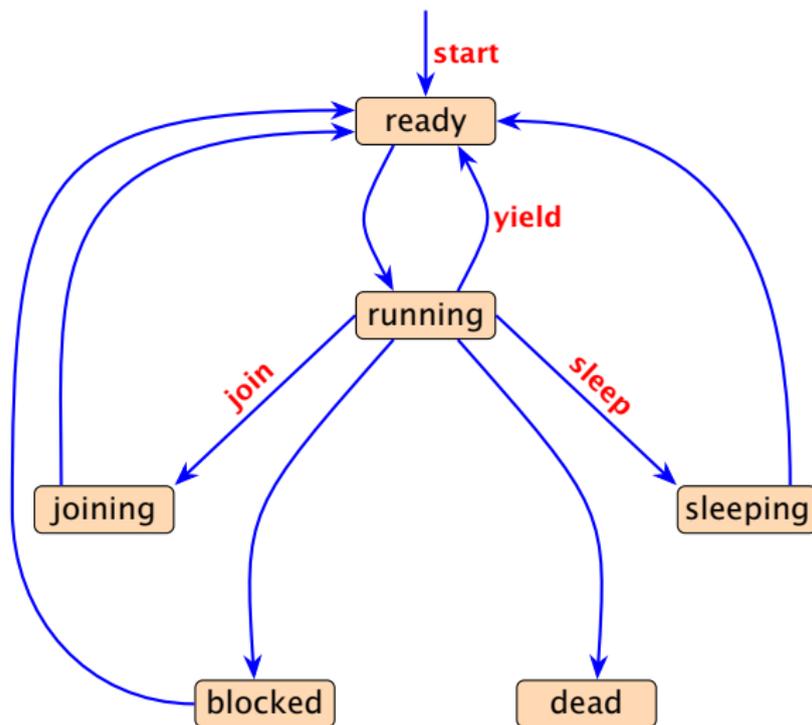
Monitore — Idee

- ▶ Inkrementieren der Variable `x` sollte ein **atomarer Schritt** sein, d.h. nicht von parallel laufenden Threads unterbrochen werden können.
- ▶ Mithilfe des Schlüsselworts **synchronized** kennzeichnen wir Objekt-Methoden einer Klasse `L` als ununterbrechbar.
- ▶ Für jedes Objekt `obj` der Klasse `L` kann zu jedem Zeitpunkt nur ein Aufruf `obj.synchMeth(...)` einer **synchronized**-Methode `synchMeth()` ausgeführt werden. Die Ausführung einer solchen Methode nennt man **kritischen Abschnitt** („critical section“) für die gemeinsame Resource `obj`.
- ▶ Wollen mehrere Threads gleichzeitig in ihren kritischen Abschnitt für das Objekt `obj` eintreten, werden alle bis auf einen **blockiert**.

Threadzustände



Threadzustände



Locks

Dieses ist nur eine mentales Modell dafür was bei Eintritt/Austritt aus einer synchronized Methode passiert. Man kann diese Attribute nicht direkt zugreifen, und die Implementierung könnten in der Realität ganz anders aussehen.

- ▶ Ein Objekt `obj` mit `synchronized`-Methoden verfügt über:
 1. boolesches Flag `boolean locked`; sowie
 2. eine Warteschlange `ThreadQueue blockedThreads`.
- ▶ Vor Betreten seines kritischen Abschnitts führt ein Thread (`implizit`) die atomare Operation `obj.lock()` aus:

```
private void lock() {  
    if (!locked) locked = true; // betrete krit. Abschnitt  
    else { // Lock bereits vergeben  
        Thread t = Thread.currentThread();  
        blockedThreads.enqueue(t);  
        t.state = blocked; // blockiere  
    }  
} // end of lock()
```

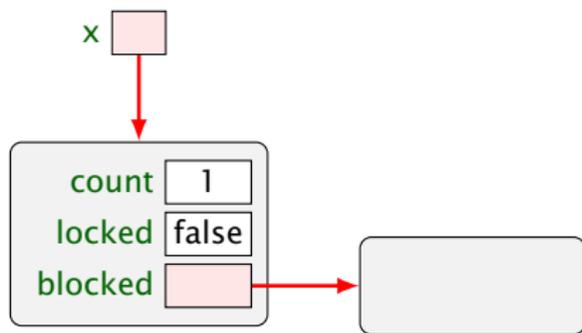
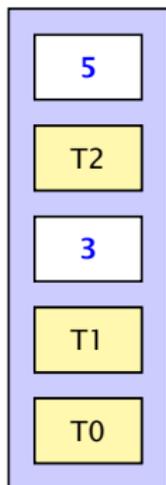
Locks

- ▶ Verlässt ein Thread seinen kritischen Abschnitt für `obj` (evt. auch mittels einer Exception), führt er (implizit) die atomare Operation `obj.unlock()` aus:

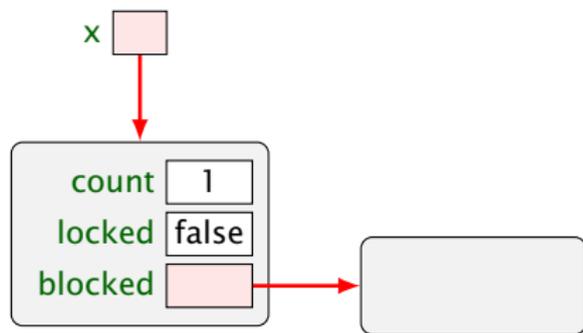
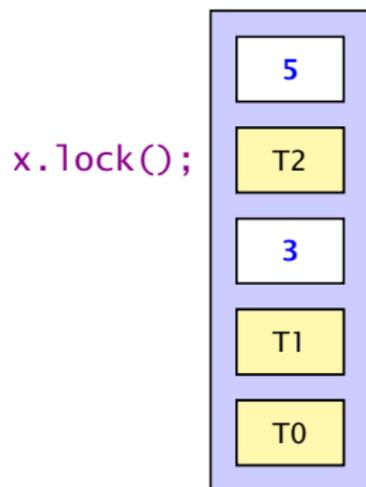
```
1 private void unlock() {
2     if (blockedThreads.empty())
3         locked = false; // Lock frei geben
4     else { // Lock weiterreichen
5         Thread t = blockedThreads.dequeue();
6         t.state = ready;
7     }
8 } // end of unlock()
```

- ▶ Dieses Konzept nennt man **Monitor**.

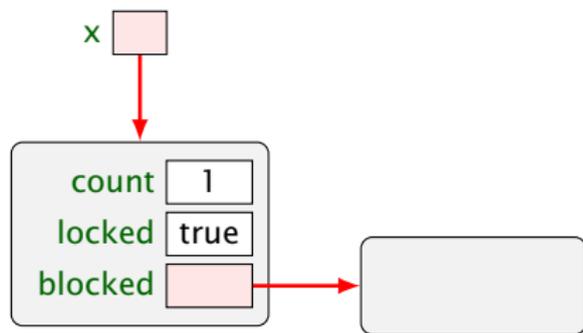
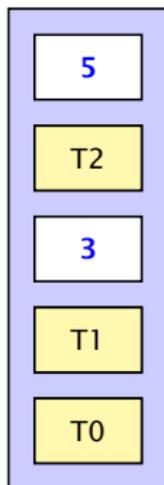
Beispiel



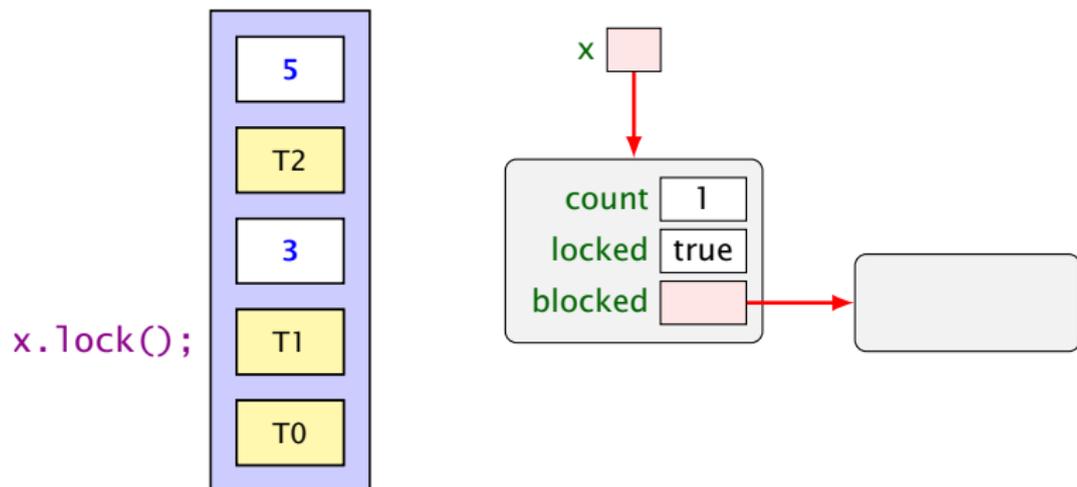
Beispiel



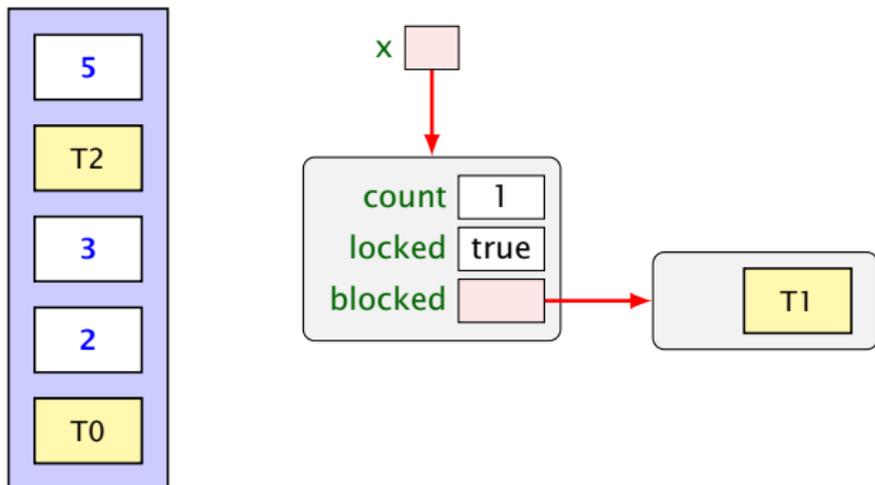
Beispiel



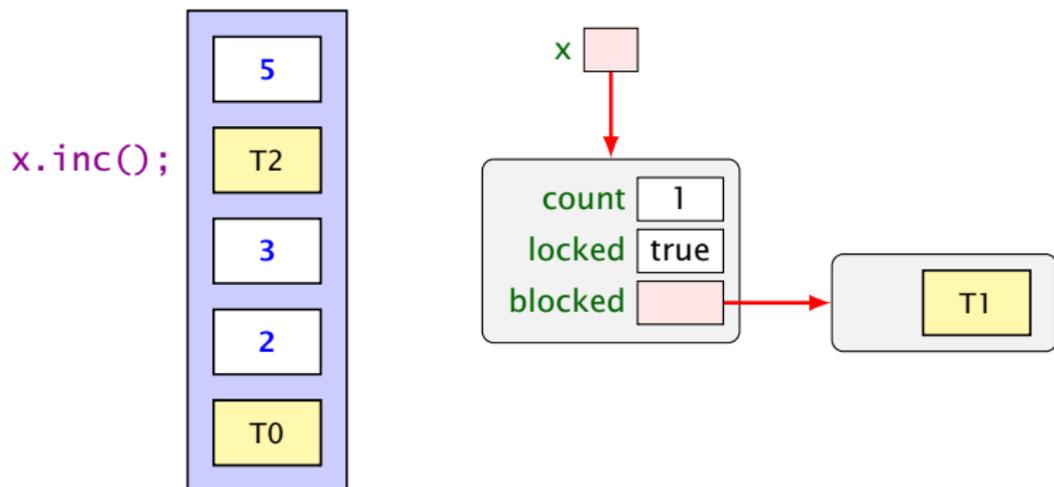
Beispiel



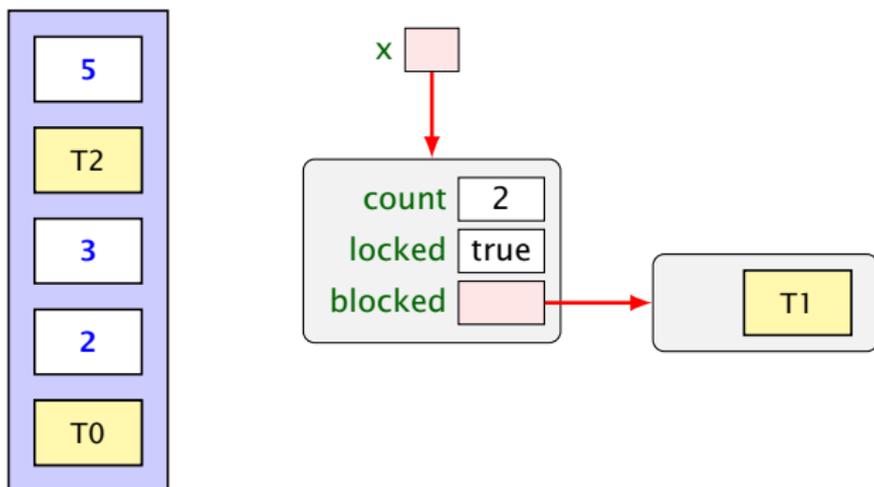
Beispiel



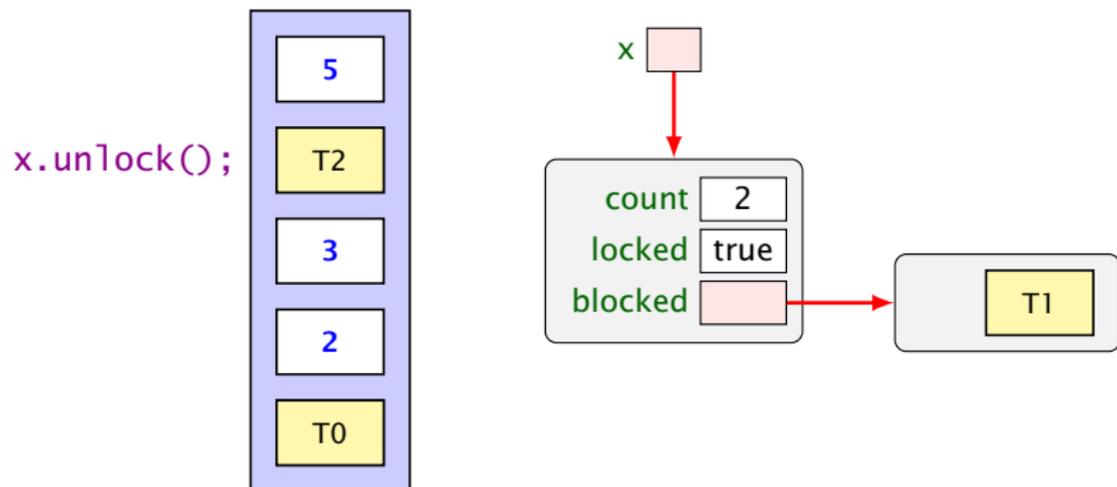
Beispiel



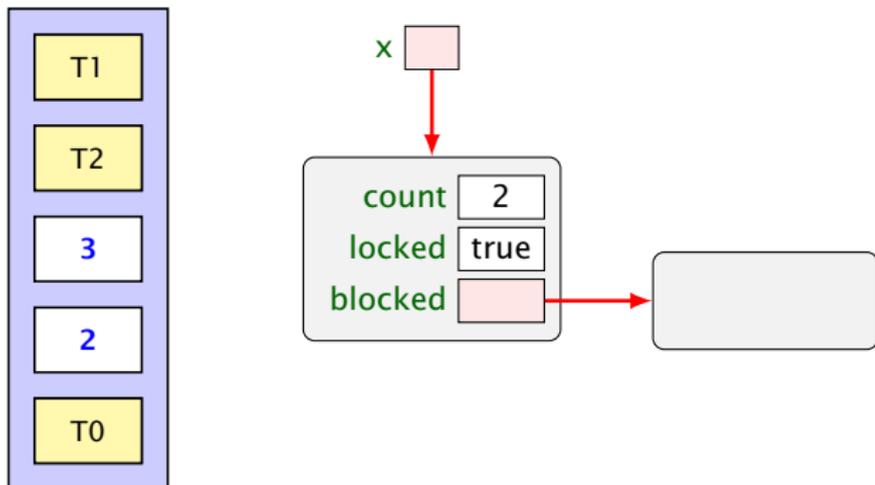
Beispiel



Beispiel

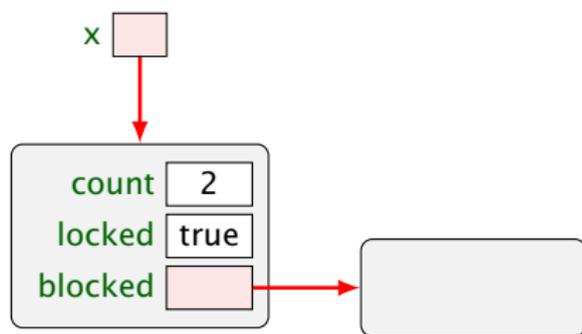
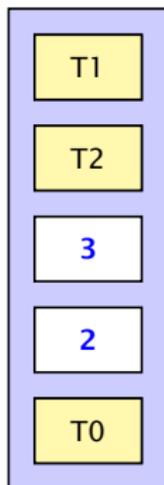


Beispiel

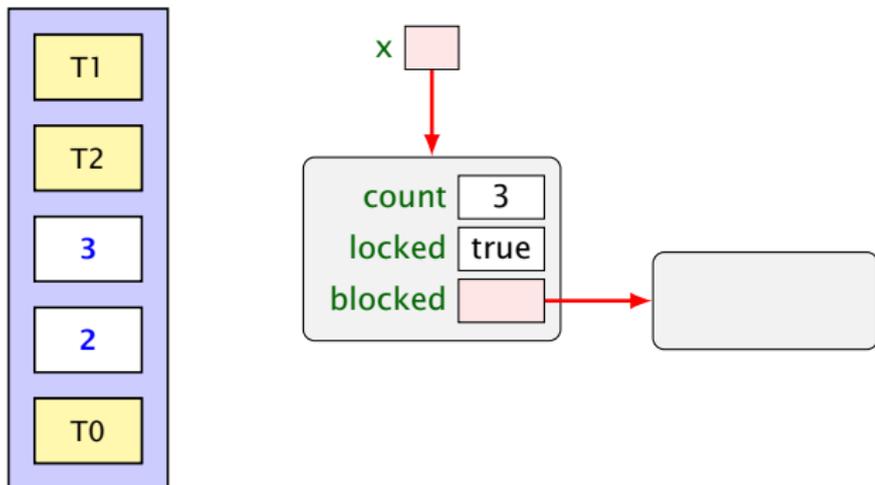


Beispiel

x.inc();

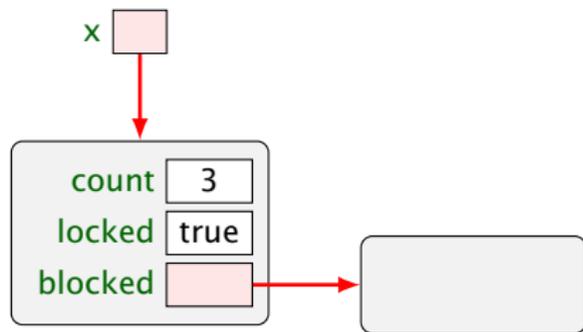
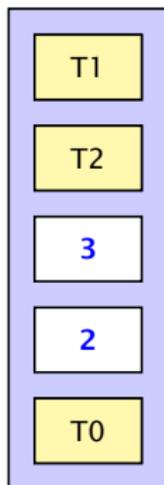


Beispiel

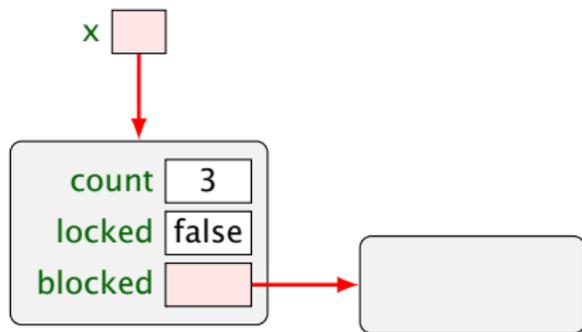
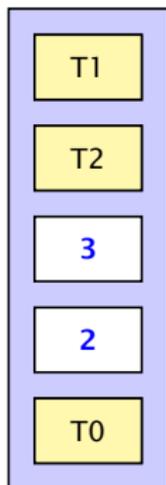


Beispiel

x.unlock();



Beispiel



Implementierung

```
class Count {
    private int count = 0;
    public synchronized void inc() {
        String s = Thread.currentThread().getName();
        int y=count; System.out.println(s+" read "+y);
        count=y+1; System.out.println(s+" wrote "+count);
    }
} // end of class Count

public class IncSync implements Runnable {
    private static Count x = new Count();
    public void run() { x.inc(); }
    public static void main(String[] args) {
        (new Thread(new IncSync())).start();
        (new Thread(new IncSync())).start();
        (new Thread(new IncSync())).start();
    }
} // end of class IncSync
```

Beispiel

liefert:

```
> java IncSync  
Thread-0 read 0  
Thread-0 wrote 1  
Thread-1 read 1  
Thread-1 wrote 2  
Thread-2 read 2  
Thread-2 wrote 3
```

Achtung:

- ▶ Die Operation `lock()` erfolgt nur, wenn der Thread nicht bereits **vorher** das Lock des Objekts erworben hat.
- ▶ Ein Thread, der das Lock eines Objekts `obj` besitzt, kann **weitere** Methoden für `obj` aufrufen, ohne sich selbst zu blockieren.

Locks — im Detail

Diese Art von Locks heißen auch **Reentrant Locks** oder **Rekursive Locks**. Sie haben teilweise einen schlechten Ruf.

- ▶ Um das zu garantieren, legt ein Thread für jedes Objekt `obj`, dessen Lock er nicht besitzt, aber erwerben will, einen neuen Zähler an:

```
int countLock[obj] = 0;
```

- ▶ Bei jedem Aufruf einer **synchronized**-Methode `m(...)` für `obj` wird der Zähler inkrementiert, für jedes Verlassen (auch mittels Exceptions) dekrementiert:

```
if (0 == countLock[obj]++) lock();  
obj.m(...)  
if (--countLock[obj] == 0) unlock();
```

- ▶ `lock()` und `unlock()` werden nur ausgeführt, wenn

```
(countLock[obj] == 0)
```

Beispiel: synchronized

```
1 public class StopThread extends Thread {
2     private static boolean stopRequested;
3
4     public void run() {
5         int i = 0;
6         while (!stopRequested)
7             i++;
8     }
9     public static void main(String[] args) {
10        Thread background = new StopThread();
11        background.start();
12        try {Thread.sleep(5);}
13        catch (InterruptedException e) {};
14        stopRequested = true;
15    }
16 }
```

Beispiel: synchronized

Das Programm terminiert (eventuell) nicht.

Die Änderung der Variablen `stopRequested` wird dem anderen Prozess nie mitgeteilt.

Wenn man auf die Variable durch `synchronized`-Methoden zugreift, ist sichergestellt, dass die Kommunikation korrekt durchgeführt wird.

Beispiel: synchronized

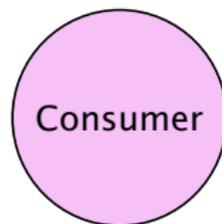
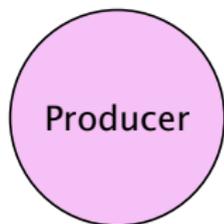
```
1 public class StopThreadCorrect extends Thread {
2     private static boolean stopRequested;
3     private static synchronized void setStop() {
4         stopRequested = true;
5     }
6     private static synchronized boolean getStop() {
7         return stopRequested;
8     }
9     public void run() {
10        int i = 0;
11        while (!getStop()) i++;
12    }
13    public static void main(String[] args) {
14        Thread background = new StopThreadCorrect();
15        background.start();
16        try {Thread.sleep(5);}
17        catch (InterruptedException e) {};
18        setStop();
19    }
20 }
```

16.3 Semaphore

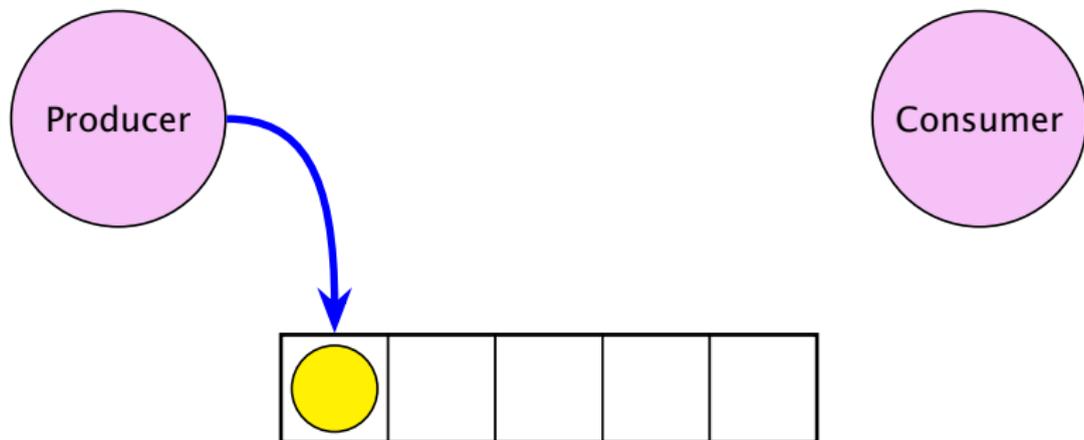
Aufgabe:

- ▶ Zwei Threads möchten mehrere/viele Daten-Objekte austauschen.
- ▶ Der eine Thread erzeugt die Objekte einer Klasse **Data** (**Producer**).
- ▶ Der andere konsumiert sie (**Consumer**).
- ▶ Zur übergabe dient ein Puffer, der eine feste Zahl **N** von **Data**-Objekten aufnehmen kann.

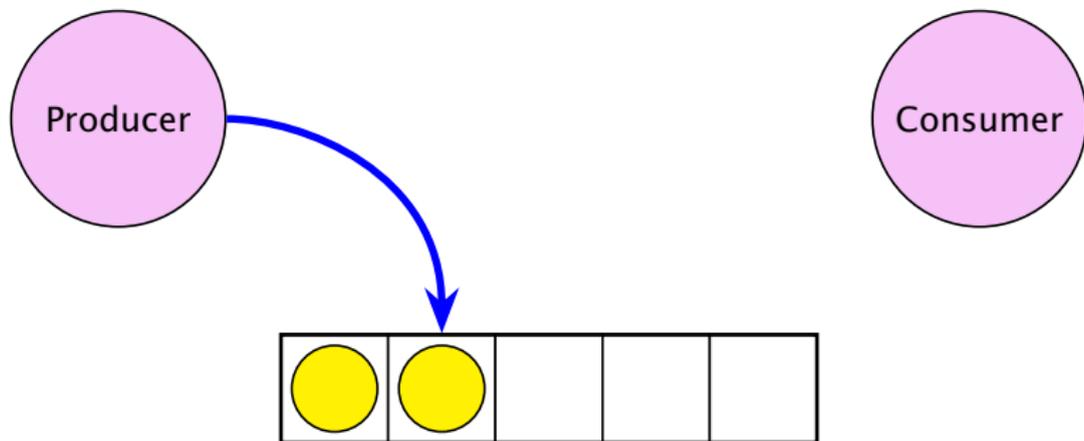
Beispiel



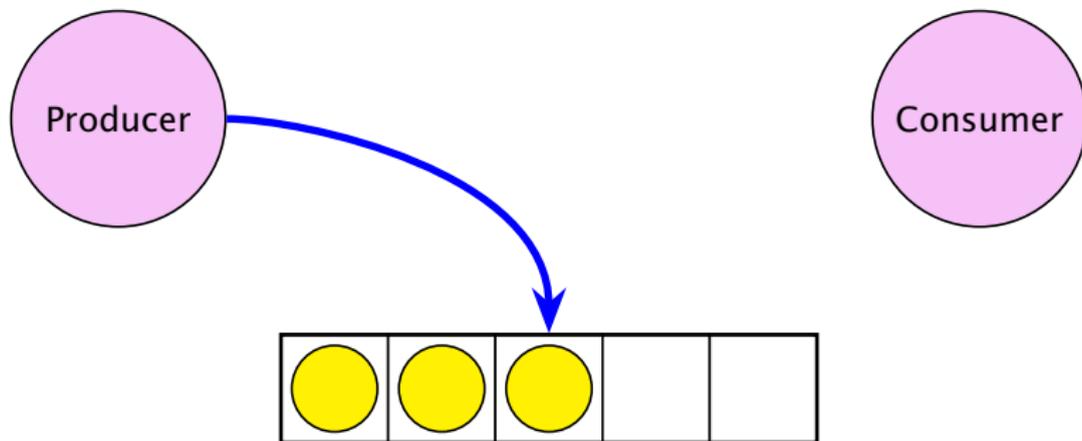
Beispiel



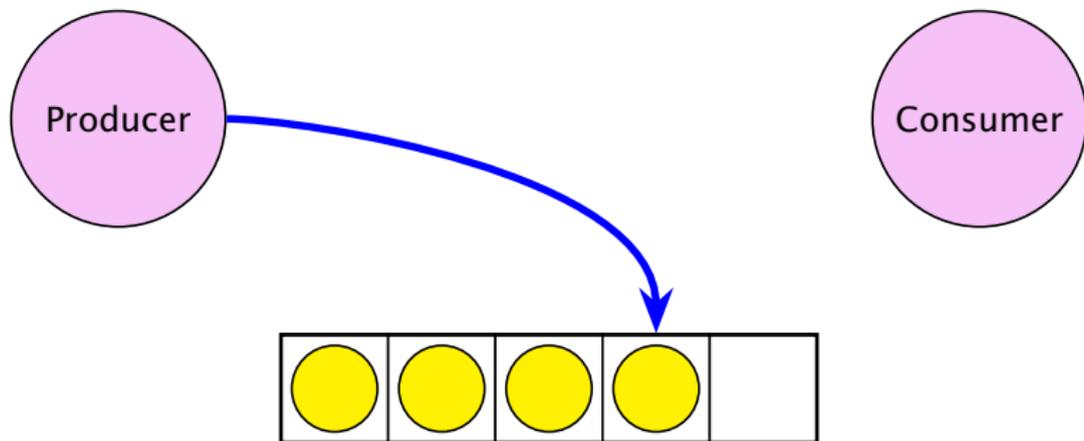
Beispiel



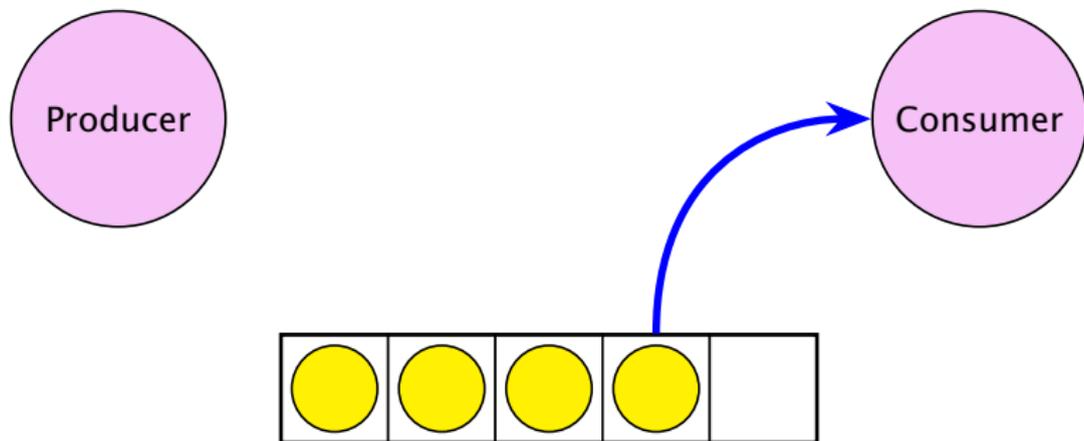
Beispiel



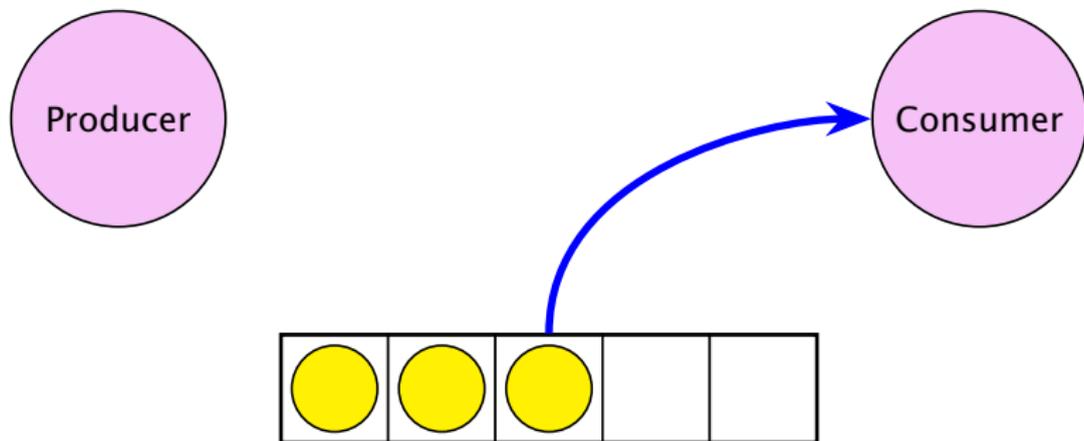
Beispiel



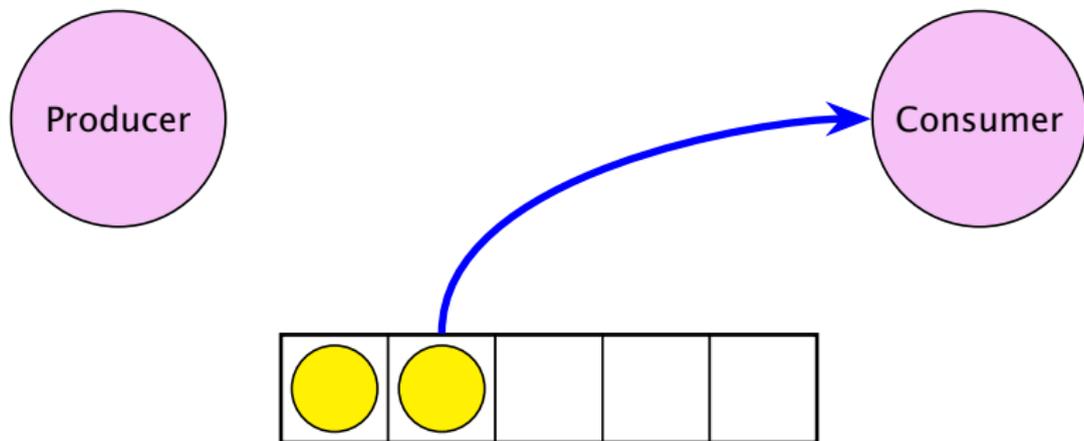
Beispiel



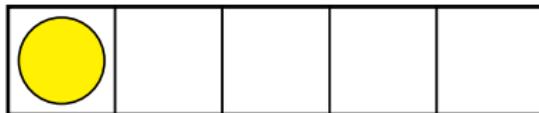
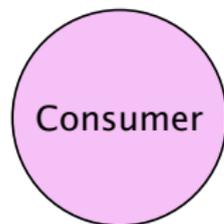
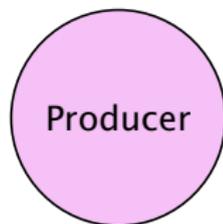
Beispiel



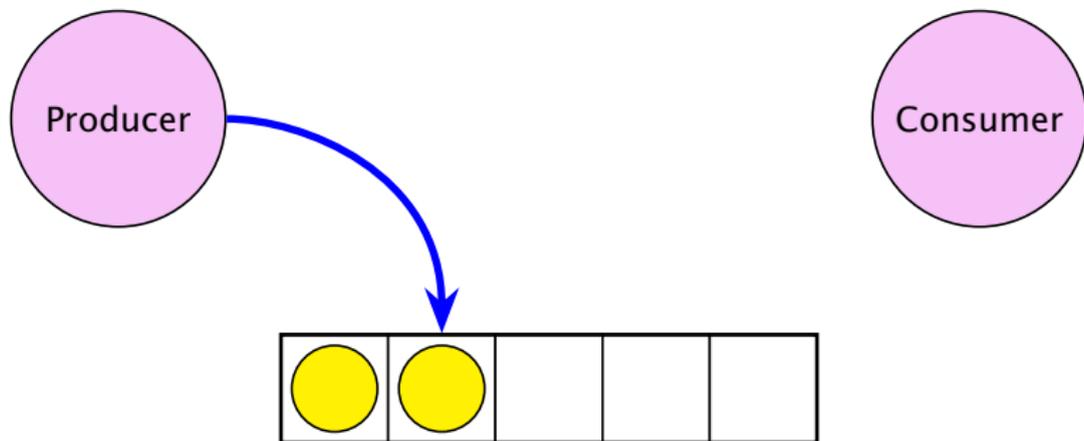
Beispiel



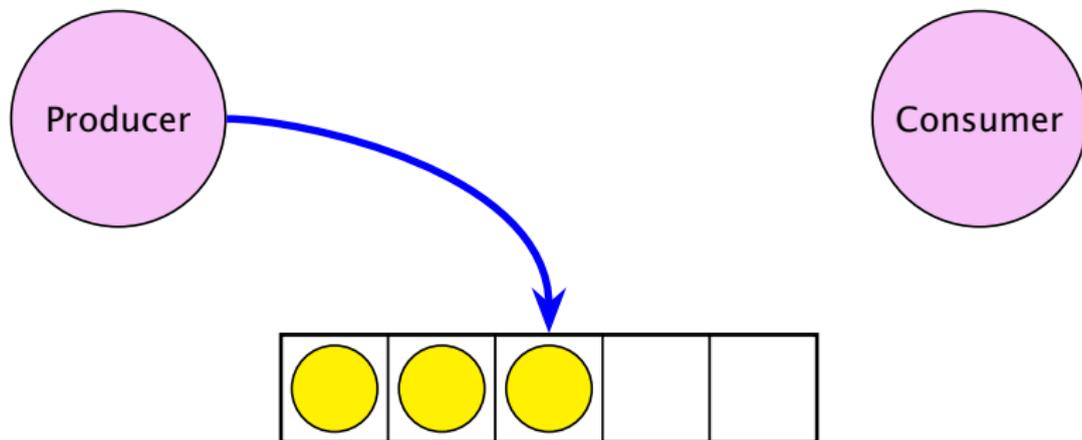
Beispiel



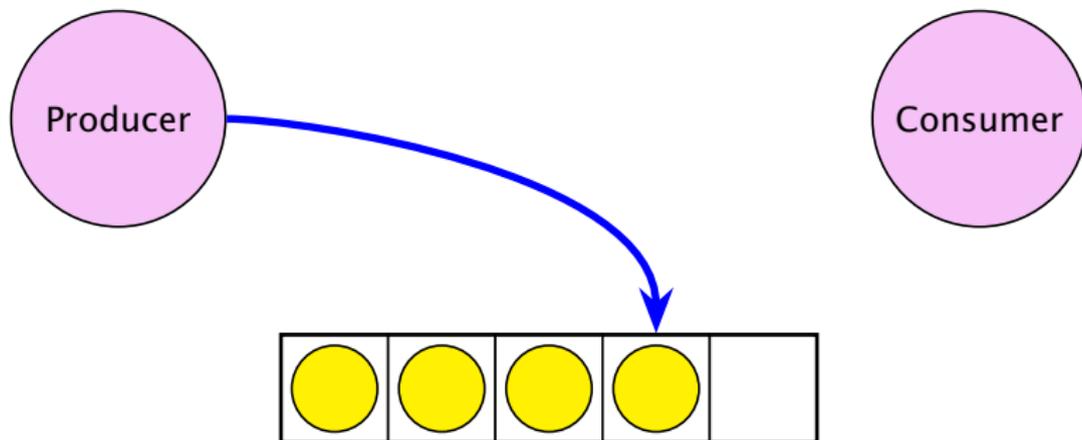
Beispiel



Beispiel



Beispiel



Consumer/Producer

1.Idee

- ▶ Wir definieren eine Klasse `Buffer`, die (im wesentlichen) aus einem Feld der richtigen Größe, sowie zwei Verweisen `int first`, `last` zum Einfügen und Entfernen verfügt:

```
1 public class Buffer {  
2     private int cap, free, first, last;  
3     private Data[] a;  
4     public Buffer(int n) {  
5         free = cap = n; first = last = 0;  
6         a = new Data[n];  
7     }  
8 // continued...
```

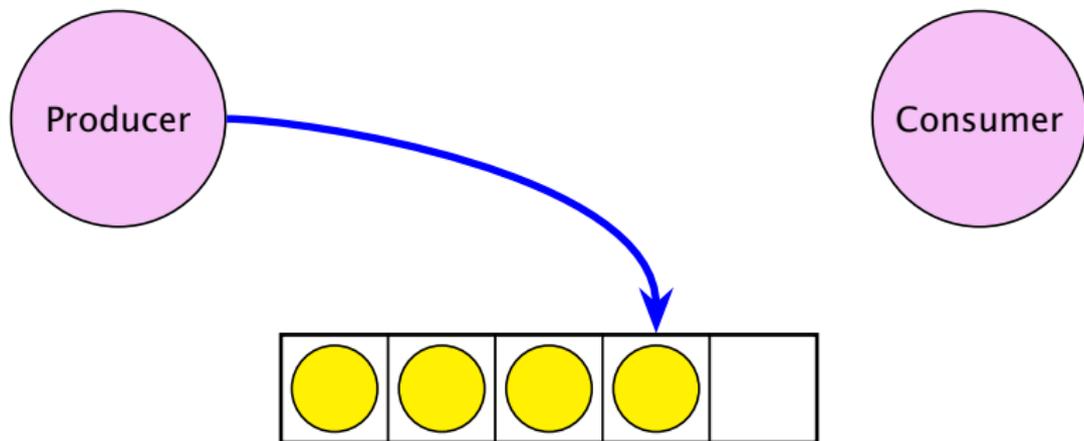
- ▶ Einfügen und Entnehmen sollen synchrone Operationen sein...

Probleme

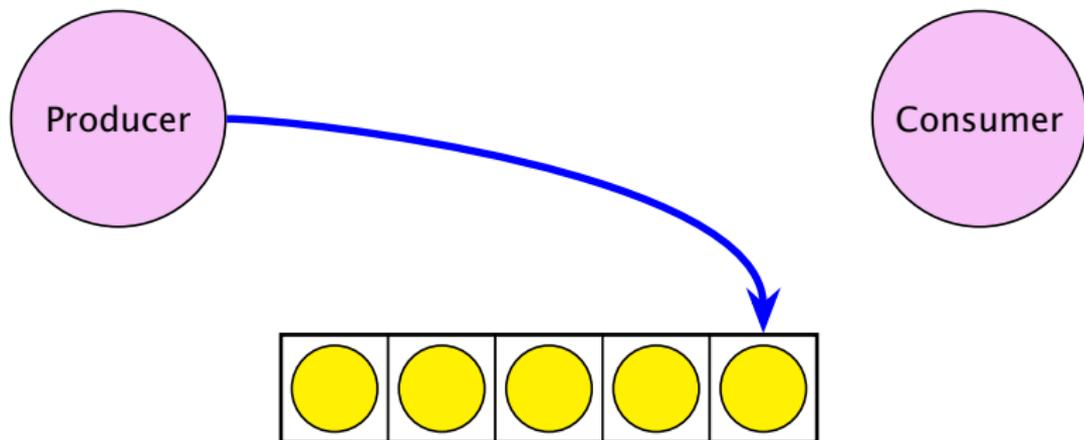
- ▶ Was macht der Consumer, wenn der Producer mit der Produktion nicht nachkommt, d.h. der Puffer leer ist?
- ▶ Was macht der Producer, wenn der Consumer mit der Weiterverarbeitung nicht nach kommt, d.h. der Puffer voll ist?

Lösungsvorschlag: **Warten...**

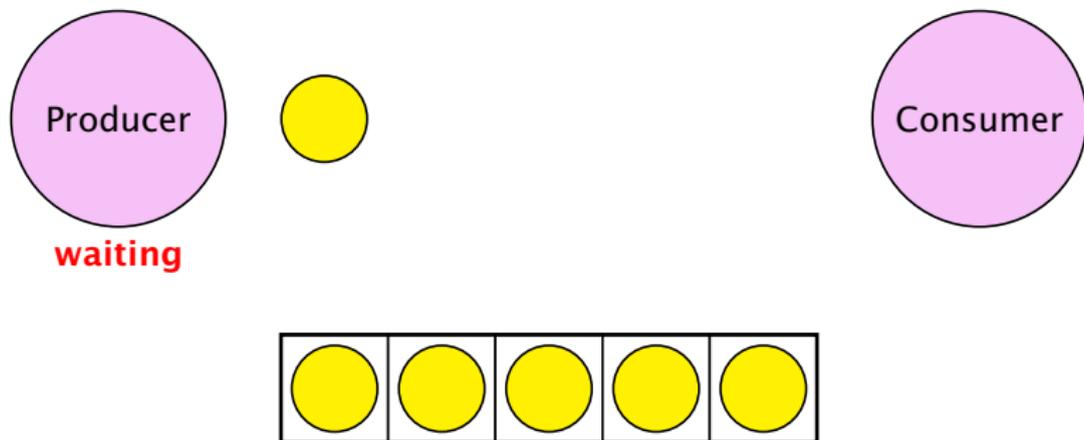
Beispiel



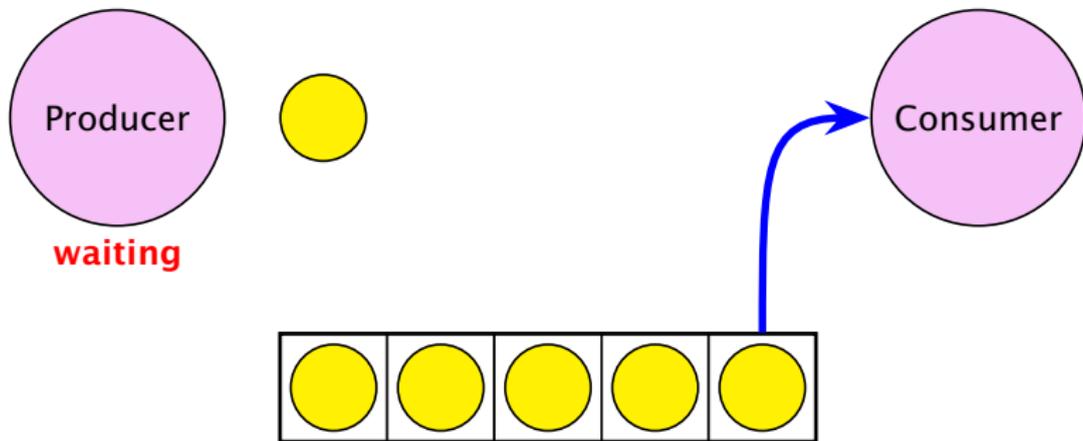
Beispiel



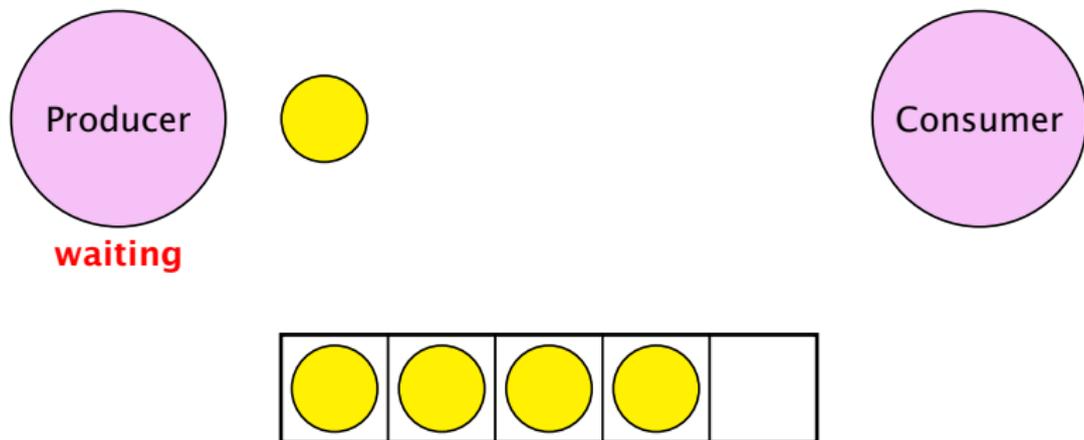
Beispiel



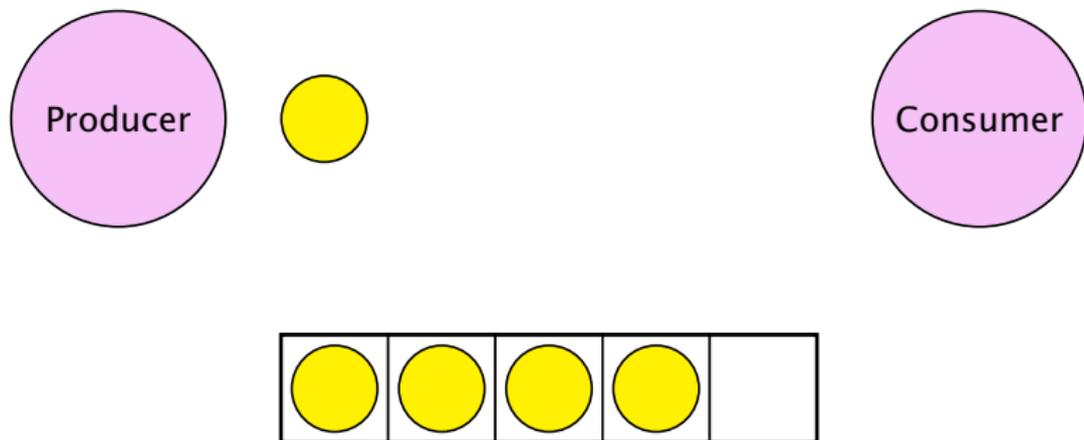
Beispiel



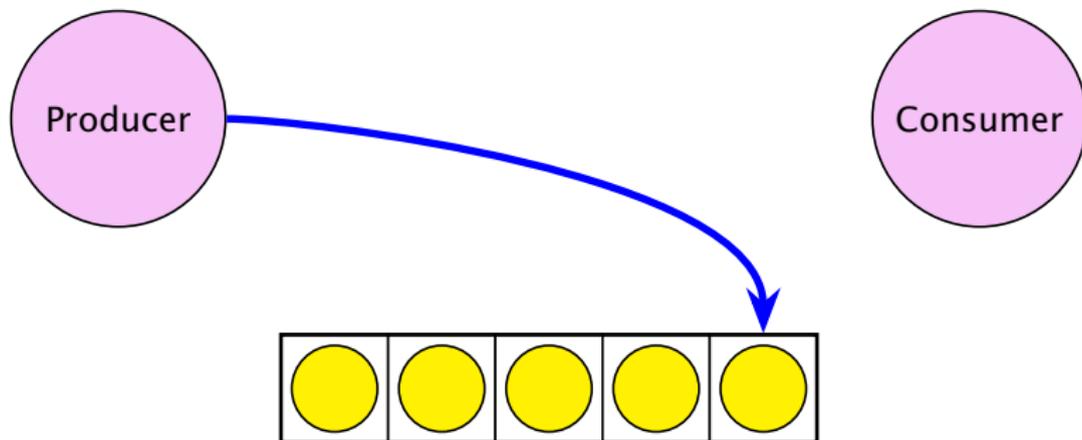
Beispiel



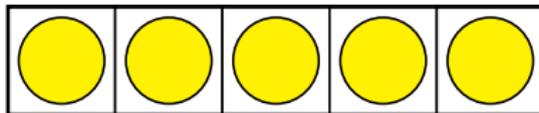
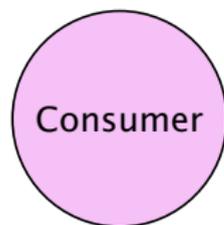
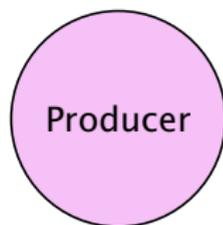
Beispiel



Beispiel



Beispiel



Umsetzung

- ▶ Jedes Objekt (mit `synchronized`-Methoden) verfügt über eine weitere Schlange `ThreadQueue` `waitingThreads` am Objekt wartender Threads sowie die Objekt-Methoden:

```
public final void wait() throws InterruptedException;  
public final void notify();  
public final void notifyAll();
```

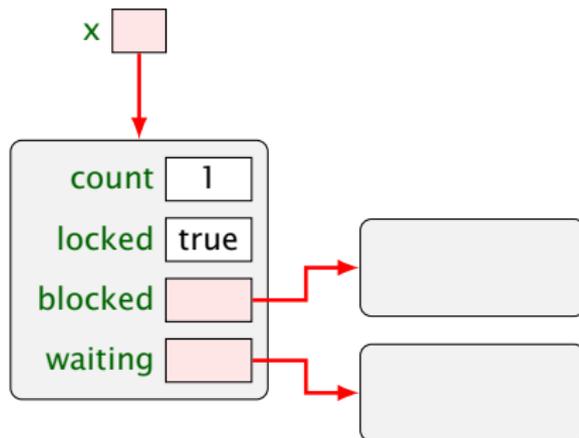
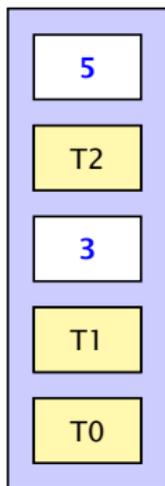
- ▶ Diese Methoden dürfen nur für Objekte aufgerufen werden, über deren Lock der Thread verfügt!!!

Umsetzung

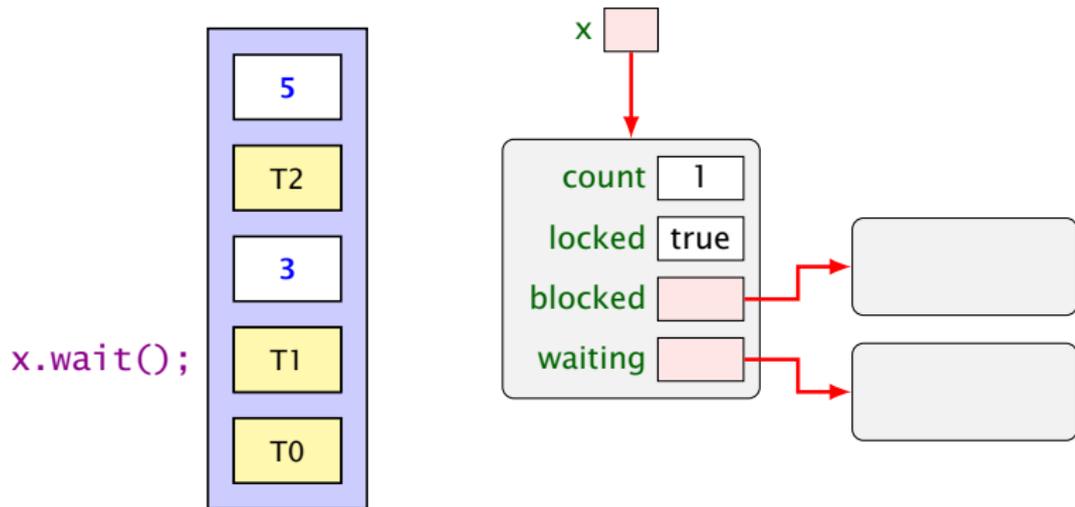
- ▶ Ausführen von `wait()`; setzt den Zustand des Threads auf `waiting`, reiht ihn in eine geeignete Warteschlange ein, und gibt das aktuelle Lock frei:

```
public void wait() throws InterruptedException {  
    Thread t = Thread.currentThread();  
    t.state = waiting;  
    waitingThreads.enqueue(t);  
    unlock();  
}
```

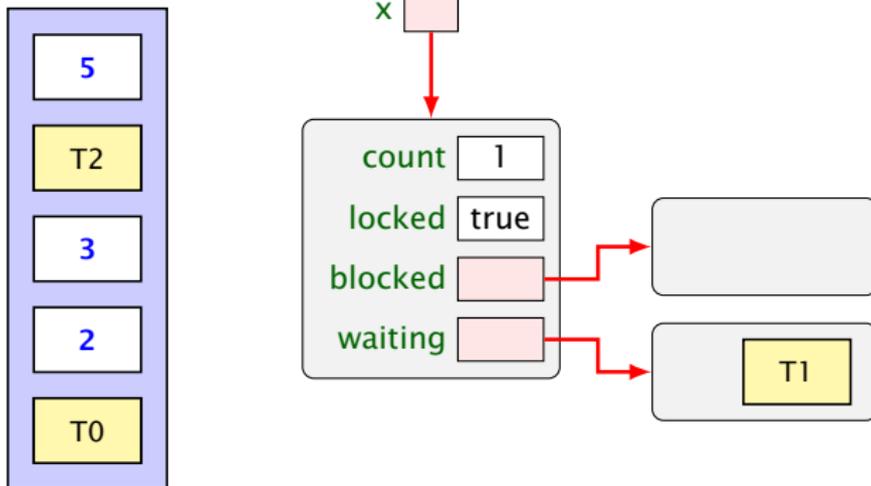
Beispiel



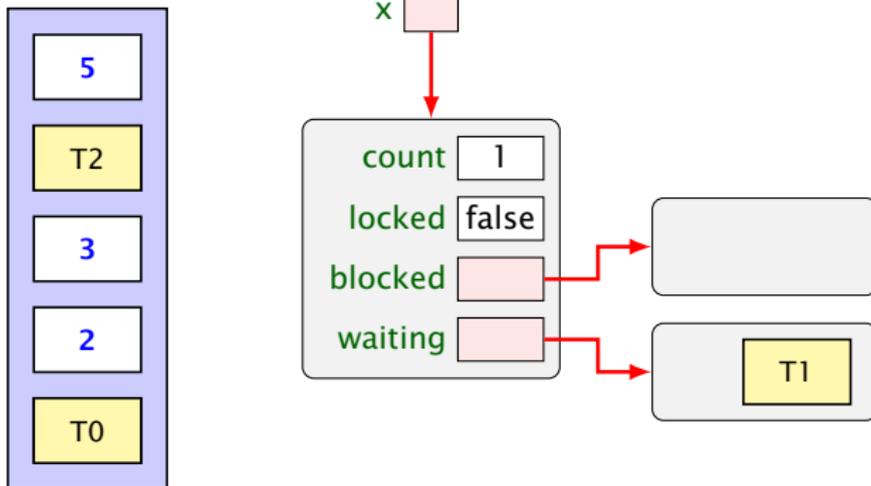
Beispiel



Beispiel



Beispiel



Umsetzung

- ▶ Ausführen von `notify()`; weckt den ersten Thread in der Warteschlange auf, d.h. versetzt ihn in den Zustand `blocked` und fügt ihn in `blockedThreads` ein:

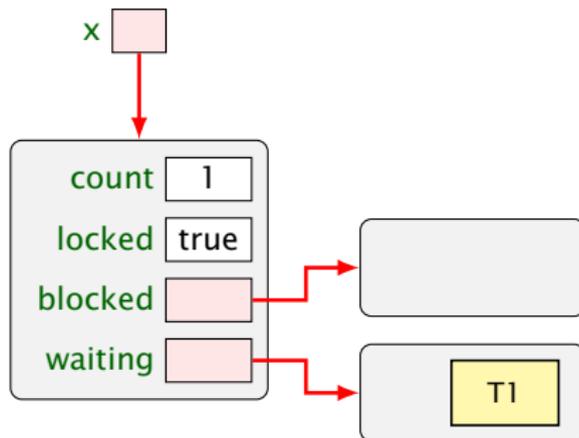
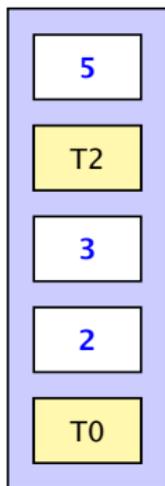
```
public void notify() {  
    if (!waitingThreads.isEmpty()) {  
        Thread t = waitingThreads.dequeue();  
        t.state = blocked;  
        blockedThreads.enqueue(t);  
    }  
}
```

- ▶ `notifyAll()`; weckt alle wartenden Threads auf d.h. fügt alle in `blockedThreads` ein:

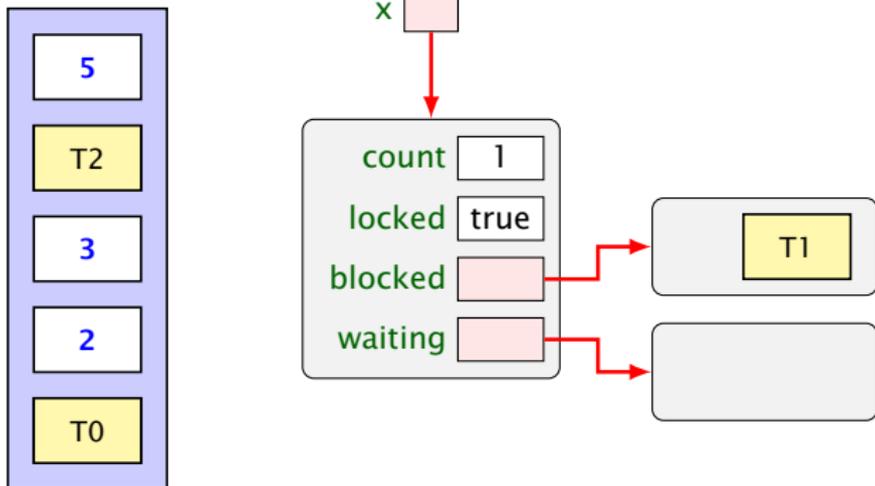
```
public void notifyAll() {  
    while (!waitingThreads.isEmpty()) notify();  
}
```

Beispiel

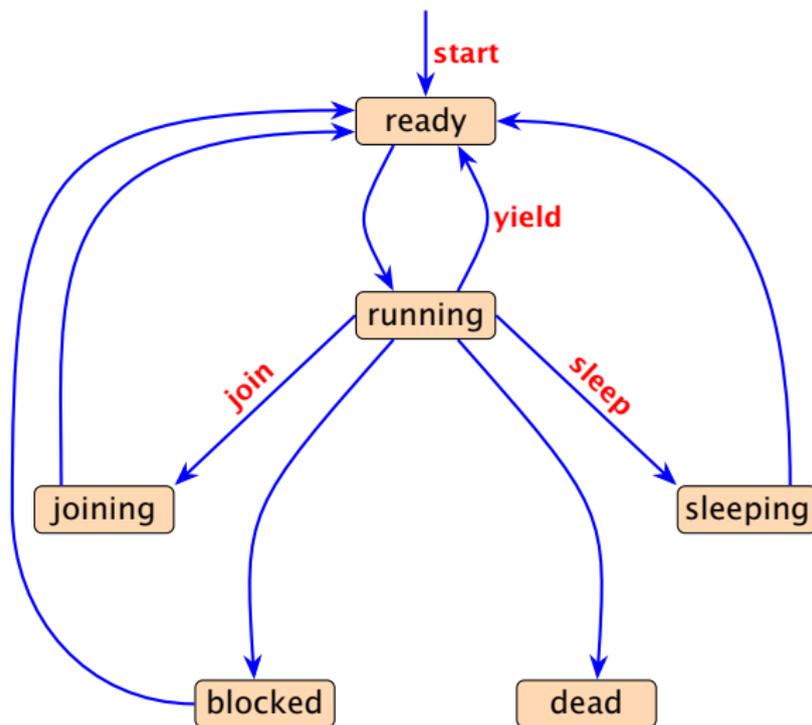
x.notify();



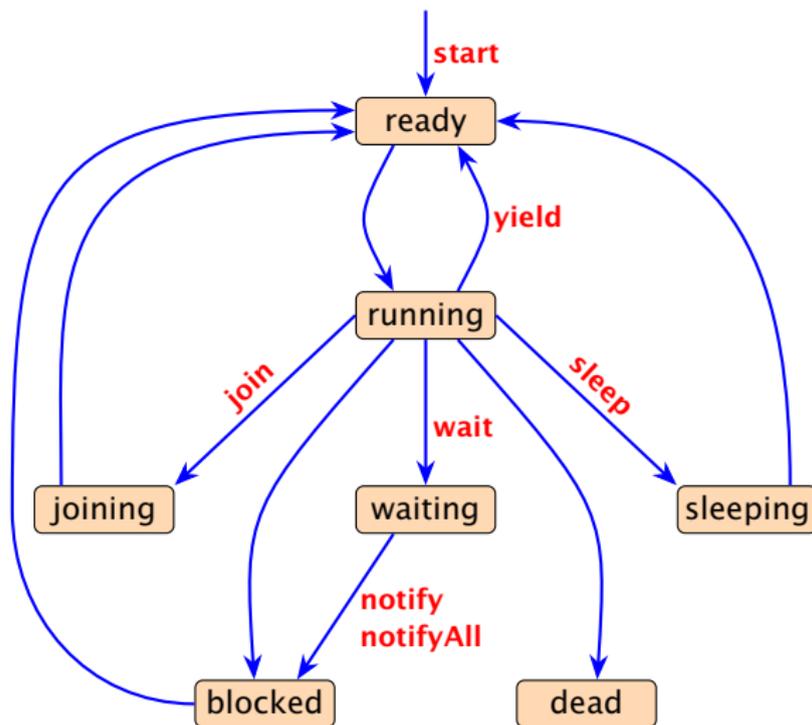
Beispiel



Threadzustände



Threadzustände



Implementierung

```
9     public synchronized void produce(Data d)
10         throws InterruptedException {
11         if (free==0) wait(); free--;
12         a[last] = d;
13         last = (last+1) % cap;
14         notify();
15     }
16     public synchronized Data consume()
17         throws InterruptedException {
18         if (free==cap) wait(); free++;
19         Data result = a[first];
20         first = (first+1) % cap;
21         notify();
22         return result;
23     }
24 } // end of class Buffer2
```

Erläuterungen

- ▶ Ist der Puffer voll, d.h. keine Zelle frei, legt sich der Producer schlafen.
- ▶ Ist der Puffer leer, d.h. alle Zellen frei, legt sich der Consumer schlafen.
- ▶ Gibt es für einen Puffer genau einen Producer und einen Consumer, weckt das `notify()` des Consumers stets den Producer (und umgekehrt).
- ▶ Was aber, wenn es **mehrere** Producers gibt? Oder **mehrere** Consumers?

Consumer/Producer

2. Idee: Wiederholung des Tests

- ▶ Teste nach dem Aufwecken erneut, ob Zellen frei sind.
- ▶ Wecke nicht einen, sondern alle wartenden Threads auf. . .

```
9     public synchronized void produce(Data d)
10         throws InterruptedException {
11         while (free==0) wait();
12         free--;
13         a[last] = d;
14         last = (last+1) % cap;
15         notifyAll();
16     }
```

Consumer/Producer

```
16     public synchronized Data consume()
17         throws InterruptedException {
18         while (free==cap) wait();
19         free++;
20         Data result = a[first];
21         first = (first+1) % cap;
22         notifyAll();
23         return result;
24     }
25 } // end of class Buffer2
```

- ▶ Wenn ein Platz im Puffer frei wird, werden **sämtliche** Threads aufgeweckt — obwohl evt. nur einer der Producer bzw. nur einer der Consumer aktiv werden kann.

Consumer/Producer

3. Idee: Semaphore

- ▶ Producers und Consumers warten in **verschiedenen** Schlangen.
- ▶ Die Producers warten darauf, dass **free > 0** ist.
- ▶ Die Consumers warten darauf, dass **cap-free > 0** ist.

```
1 public class Sema {
2     private int x;
3     public Sema(int n) { x = n; }
4     public synchronized void up() {
5         x++; if (x <= 0) this.notify();
6     }
7     public synchronized void down()
8         throws InterruptedException {
9         x--; while (x < 0) this.wait();
10    }
11 } // end of class Sema
```

Semaphore

- ▶ Ein **Semaphor** enthält eine private **int**-Objekt-Variable und bietet die **synchronized**-Methoden **up()** und **down()** an.
- ▶ **up()** erhöht die Variable, **down()** erniedrigt sie.
- ▶ Ist die Variable positiv, gibt sie die Anzahl der verfügbaren Ressourcen an.
Ist sie negativ, zählt sie die Anzahl der wartenden Threads.
- ▶ Eine **up()**-Operation weckt genau einen wartenden Thread auf.

Anwendung - 1. Versuch

```
1 public class BufferFaulty {
2     private int cap, first, last;
3     private Sema free, occupied;
4     private Data[] a;
5     public BufferFaulty(int n) {
6         cap = n;
7         first = last = 0;
8         a = new Data[n];
9         free = new Sema(n);
10        occupied = new Sema(0);
11    }
12 // continued...
```

Anwendung - 1. Versuch

```
12     public synchronized void produce(Data d)
13         throws InterruptedException {
14         free.down();
15         a[last] = d;
16         last = (last+1) % cap;
17         occupied.up();
18     }
19     public synchronized Data consume()
20         throws InterruptedException {
21         occupied.down();
22         Data result = a[first];
23         first = (first+1) % cap;
24         free.up();
25         return result;
26     }
27 }
```

- ▶ Gut gemeint — aber leider **fehlerhaft**...
- ▶ Jeder Producer benötigt **zwei** Locks gleichzeitig, um zu produzieren:
 1. dasjenige für den Puffer;
 2. dasjenige für einen Semaphor.
- ▶ Muss er für den Semaphor ein **wait()** ausführen, gibt er das Lock für den Semaphor wieder zurück... nicht aber dasjenige für den Puffer!!!
- ▶ Die Folge ist, dass niemand mehr eine Puffer-Operation ausführen kann, insbesondere auch kein **up()** mehr für den Semaphor ⇒ **Deadlock**

2. Versuch – Entkopplung der Locks

```
12 // Methoden sind nicht synchronized
13 public void produce(Data d) throws
14         InterruptedException {
15     free.down();
16     synchronized (this) {
17         a[last] = d; last = (last+1) % cap;
18     }
19     occupied.up();
20 }
21 public Data consume() throws
22         InterruptedException {
23     Data result; occupied.down();
24     synchronized (this) {
25         result = a[first]; first = (first+1) % cap;
26     }
27     free.up(); return result;
28 }
29 } // end of corrected class Buffer
```

Erläuterung

- ▶ Das Statement `synchronized (obj) { stmts }` definiert einen kritischen Bereich für das Objekt `obj`, in dem die Statement-Folge `stmts` ausgeführt werden soll.
- ▶ Threads, die die neuen Objekt-Methoden `void produce(Data d)` bzw. `Data consume()` ausführen, benötigen zu jedem Zeitpunkt nur genau ein Lock.

Man kann sich eine `synchronized`-Methode vorstellen, als hätte sie solch einen `synchronized (this)`-Block um den gesamten Funktionsrumpf.

16.4 RW-Locks

Ziel:

- ▶ eine Datenstruktur soll gemeinsam von mehreren Threads benutzt werden.
- ▶ Jeder Thread soll (gefühl) **atomar** auf die Datenstruktur zugreifen.
- ▶ Lesende Zugriffe sollen die Datenstruktur nicht verändern, schreibende Zugriffe dagegen können die Datenstruktur modifizieren.

1. Idee: Synchronisiere Methodenaufrufe

```
1 public class HashTable<K,V> {
2     private List2<K,V> [] a;
3     private int n;
4     public HashTable (int n) {
5         a = new List2[n];
6         this.n = n;
7     }
8     public synchronized V lookup (K k) {...}
9     public synchronized void update (K k, V v) {...}
10 }
```

Arrays und Generics

Wir sagen `a = new List2[n]` anstatt `a = new List2<K,V>[n]`. Letzteres führt zu einem Compilerfehler.

```
1 // nicht moeglich...
2 List<Dog>[] a = new List<Dog>[100];
3 Object[] b = a;
4 List<Cat> cats = new List<Cat>();
5 cats.insert(new Cat("Garfield"));
6 // keine ArrayStoreException wegen Type-Erasure
7 b[0] = cats;
8 // das sollte eigentlich ok sein...
9 Dog d = a[0].remove(0);
```

Man sollte (wenn möglich) Generics und Arrays in **Java** nicht miteinander mischen.

Diskussion

- ▶ Zu jedem Zeitpunkt darf nur ein Thread auf die HashTable zugreifen.
- ▶ Für schreibende Threads ist das evt. sinnvoll.
- ▶ Threads, die nur lesen, stören sich gegenseitig aber überhaupt nicht!

⇒ **ReaderWriterLock**

- ▶ ist entweder im Lese-Modus, im Schreibmodus oder frei.
- ▶ Im Lese-Modus dürfen beliebig viele Leser eintreten, während sämtliche Schreiber warten müssen.
- ▶ Haben keine Leser mehr Interesse, ist das Lock wieder frei.
- ▶ Ist das Lock frei, darf ein Schreiber eintreten. Das RW-Lock wechselt nun in den Schreib-Modus.
- ▶ Im Schreib-Modus müssen sowohl Leser als auch weitere Schreiber warten.
- ▶ Ist ein Schreiber fertig, wird das Lock wieder frei gegeben. . .

Implementierung

```
1 public class RW {
2     private int countReaders = 0;
3
4     public synchronized void startRead ()
5         throws InterruptedException {
6         while (countReaders < 0) wait ();
7         countReaders++;
8     }
9
10    public synchronized void endRead () {
11        countReaders--;
12        if (countReaders == 0) notifyAll ();
13    }
14    //continued...
```

Implementierung

```
15     public synchronized void startWrite ()
16         throws InterruptedException {
17         while (countReaders != 0) wait ();
18         countReaders = -1;
19     }
20
21     public synchronized void endWrite () {
22         countReaders = 0;
23         notifyAll ();
24     }
25 }
```

Diskussion

- ▶ Die Methoden `startRead()`, und `endRead()` sollen eine Leseoperation eröffnen bzw. beenden.
- ▶ Die Methoden `startWrite()`, und `endWrite()` sollen eine Schreiboperation eröffnen bzw. beenden.
- ▶ Die Methoden sind `synchronized`, damit sie selbst atomar ausgeführt werden.
- ▶ Die unterschiedlichen Modi eines RW-Locks sind mit Hilfe des Zählers `count` implementiert.
- ▶ Ein negativer Zählerstand entspricht dem Schreib-Modus, während ein positiver Zählerstand die Anzahl der aktiven Leser bezeichnet. . .

Diskussion

- ▶ `startRead()` führt erst dann kein `wait()` aus, wenn das RW-Lock entweder frei oder im Lese-Modus ist. Dann wird der Zähler inkrementiert.
- ▶ `endRead()` dekrementiert den Zähler wieder. Ist danach das RW-Lock frei, werden alle wartenden Threads benachrichtigt.
- ▶ `startWrite()` führt erst dann kein `wait()` aus, wenn das RW-Lock definitiv frei ist. Dann wird der Zähler auf -1 gesetzt.
- ▶ `endWrite()` setzt den Zähler wieder auf 0 zurück und benachrichtigt dann alle wartenden Threads.

Die HashTable mit RW-Lock

```
1 public class HashTable<K,V> {
2     private RW rw;
3     private List2<K,V> [] a;
4     private int n;
5     public HashTable (int n) {
6         rw = new RW();
7         a = new List2 [n];
8         this.n = n;
9     }
10 // continued...
```

Die HashTable mit RW-Lock

```
11     public V lookup (K key) throws
12         InterruptedException {
13         rw.startRead();
14         int i = Math.abs(key.hashCode() % n);
15         V result = (a[i] == null) ? null :
16             a[i].lookup(key);
17         synchronized (rw) {
18             rw.endRead();
19             return result;
20         }
21     }
22 //continued
```

- ▶ Da `lookup()` nicht weiß, wie mit einem interrupt umzugehen ist, wird die Exception weiter geworfen.
- ▶ Damit zwischen Freigabe des RW-Locks und der Rückgabe des Ergebnisses kein Schreibvorgang möglich ist, wird die Rückgabe des RW-Locks mit dem `return` gekoppelt.

Die HashTable mit RW-Lock

```
23     public void update (K key, V value) throws
24                             InterruptedException {
25         rw.startWrite();
26         int i = Math.abs(key.hashCode() % n);
27         if (a[i] == null)
28             a[i] = new List2<K,V> (key,value,null);
29         else
30             a[i].update(key,value);
31         rw.endWrite();
32     }
33 }
```

- ▶ Die Methode `update(K key, V value)` der Klasse `List2<K,V>` sucht nach Eintrag für `key`. Wird dieser gefunden, wird dort das Wert-Attribut auf `value` gesetzt. Andernfalls wird ein neues Listenobjekt für das Paar `(key,value)` angefügt.

Diskussion

- ▶ Die neue Implementierung unterstützt nebenläufige Lesezugriffe auf die HashTable.
- ▶ Ein einziger Lesezugriff blockiert aber Schreibzugriffe — selbst, wenn sie sich letztendlich auf **andere Teillisten** beziehen und damit unabhängig sind...
- ▶ Genauso blockiert ein einzelner Schreibzugriff sämtliche Lesezugriffe, selbst wenn sie sich auf **andere Teillisten** beziehen...

⇒ Eingrenzung der kritischen Abschnitte...

Erst suchen der richtigen Liste (**nicht synchronisiert**), dann Lese/Schreiben dieser Liste (**synchronisiert**).

Realisierung

```
1 class ListHead<K,V> {
2     private List2<K,V> list = null;
3     private RW rw = new RW();
4     public V lookup (K key) throws InterruptedException {
5         rw.startRead();
6         V result= (list==null) ? null : list.lookup(key);
7         synchronized (rw) {
8             rw.endRead();
9             return result;
10    } }
11    public void update (K key, V value) throws
12        InterruptedException {
13        rw.startWrite();
14        if (list == null)
15            list = new List2<K,V>(key,value,null);
16        else list.update(key,value);
17        rw.endWrite();
18    } }
```

Diskussion

- ▶ Jedes Objekt der Klasse `ListHead` enthält ein eigenes RW-Lock zusammen mit einer Liste (eventuell `null`).
- ▶ Die Methoden `lookup()` und `update` wählen erst (unsynchronisiert) die richtige Liste aus, um dann geordnet auf die ausgewählte Liste zuzugreifen...

```
// in der Klasse HashTable:  
public V lookup (K key) throws InterruptedException {  
    int i = Math.abs(key.hashCode() % n);  
    return a[i].lookup(key);  
}  
public void update (K key, V value)  
    throws InterruptedException {  
    int i = Math.abs(key.hashCode() % n);  
    a[i].update (key, value);  
}
```

Lock Support in Java

- ▶ **ReentrantLock**

`lock()`, `unlock()`, `tryLock()`, `newCondition()`

`wait()`, `notify()` heißen `await()` und `signal()` und werden auf einem `Condition`-Objekt ausgeführt.

- ▶ Ein `ReentrantLock` kann in einer anderen Funktion/einem anderen Block (anders als `synchronized`) freigegeben werden.
- ▶ **Achtung:** Ein `Reentrant-Lock` kann nicht von einem anderen Thread freigegeben werden.

Lock Support in Java

```
1 class Test {
2     synchronized void put() throws
3         InterruptedException {
4         ...
5         while (...) wait();
6         ...
7     }
8 }
```

Lock Support in Java

```
1 class Test {
2     Lock lock = new ReentrantLock();
3     Condition cond = lock.newCondition();
4     void put() {
5         lock.lock();
6         try {
7             ...
8             while (...) cond.await()
9             ...
10        }
11        finally {
12            lock.unlock();
13        }
14    }
15 }
```

Semaphore Support in Java

- ▶ Klasse `Semaphore`,
- ▶ Konstruktor `Semaphore(int permits)`
- ▶ Hauptmethoden: `acquire()`, `release()`

Kann von einem anderen Thread `release()`d werden als von dem, der `acquire()` aufgerufen hat.

RW-Locks in Java

- ▶ Klasse `ReentrantReadWriteLock`
- ▶ `readLock()`, `writeLock` gibt das zugehörige `readLock`, bzw. `writeLock` zurück.

```
1 ...
2 ReentrantReadWriteLock rw;
3 rw.readLock().lock();
4 try {
5     ...
6 }
7 finally { rw.readLock().unlock(); }
8 ...
```

Warnung

Threads sind nützlich, sollten aber nur mit Vorsicht eingesetzt werden. Es ist besser,

- ▶ ... **wenige** Threads zu erzeugen als mehr.
- ▶ ... **unabhängige** Threads zu erzeugen als sich wechselseitig beeinflussende.
- ▶ ... kritische Abschnitte zu **schützen**, als nicht synchronisierte Operationen zu erlauben.
- ▶ ... kritische Abschnitte zu **entkoppeln**, als sie zu schachteln.

Warnung

Finden der Fehler bzw. Überprüfung der Korrektheit ist ungleich schwieriger als für sequentielle Programme:

- ▶ Fehlerhaftes Verhalten tritt eventuell nur gelegentlich auf. . .
- ▶ bzw. nur für bestimmte Scheduler.
- ▶ Die Anzahl möglicher Programm-Ausführungsfolgen mit potentiell unterschiedlichem Verhalten ist gigantisch.
- ▶ Heisenbugs.

Ein Heisenbug ist ein Bug, der verschwindet wenn man das System beobachtet...