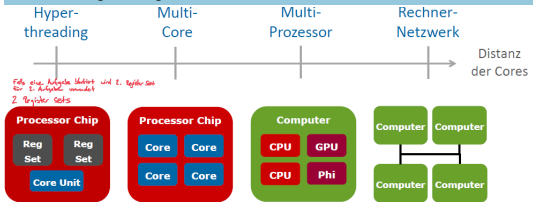
Multithreading Grundlagen



Parallelität: Aufteilung in Teilabläufe, laufen gleichzeitig auf mehreren Prozessoren. **Nebenläufigkeit:** Gleichzeitig oder verzahnt ausführbare Abläufe, greifen au gemeinsame Ressourcen zu. **Prozess:** Parallel laufende Programm-Instanz im System. Eigener Adressraum. **Thread:** Parallele Ablaufsequenz innerhalb eines Programms. Teilen gleichen Adressraum.

Thread-Implementationen

User-Level Threads: Im Prozess implementiert. Keine echte Parallelität durch mehrere Prozessoren. **Kernel-Level Threads:** Im Kernel implementiert (Multi-Core Ausnutzung). Kontextwechsel vom Prozess per SW-Interrupt. **Thread Scheduling:** Processor Sharing - #Threads >#Prozessoren.

Prozessor Multiplexing

Verzahnte Ausführung: Instruktionen von mehreren Threads in Teilsequenzen. Illusion der Parallelität. **Kontextwechsel:** *Synchron* (Freiwillige abgabe), Thread wechselt zu wait. *Asynchron:* (gezwungene Abgabe) Begrenzte Laufzeit für Threads.

Multi-Tasking:

Kooperativ: Threads initiieren Kontextwechsel synchron (freiwillig). Scheduler kann Thread nicht unterbrechen. **Preemtiv:** Scheduler kann Thread mit Timer-Interrupt asynchron unterbrechen (Time-Sliced-Scheduling)(*Standart heute*). **Thread Zustände:** Ready, Waiting, Running.

Multi-Thread Programmierung

JVM Thread Modell

Java ist ein Single Process System. JVM ist ein Prozess im Bsys. **Main-Thread** wird beim Aufstarten der JVM anhand *main()* Methode erzeugt. JVM läuft, solange Threads laufen (Ausnahme Daemon Threads).

```
var myThread = new Thread(() -> { /* ... */ });
myThread.start();
```

Thread wird erst bei *start()* erzeugt. Führt *run()*-Methode des Runnable Interface aus. Thread endet beim Verlassen von *run()*. **Nicht-Determinismus:** Threads laufen ohne Vorkehrungen beliebig verzahnt oder parallel.

Explizite Runnable-Implementation:

```
class SimpleLogic implements Runnable {
   @Override
   public void run() { /* ... */ }
}
var myThread = new Thread(new SimpleLogic()).start();
```

Sub-Klasse von Thread

```
class SimpleThread extends Thread {
   @Override
   public void run() { /* ... */ }
}
var myThread = new SimpleThread().start();
```

Thread Join

Warten auf Beendigung eines Threads. *t2.join()* blockiert, solange t2 läuft.

Thread Passivierung

Thraed.sleep(ms): Laufender Thread geht in Wartezustand, dann ready. **Thread.yield():** Gibt Prozesor frei, direkt ready.

Monitor Synchronisation

Synchronisation: Einschränkung der Nebenläufigkeit. **Gemeinsame Ressourcen:** Threads teilen sich Adressraum und Heap.

Java Synchronized Methoden

synchronized: Modifier für Methoden. Body ist ein kritischer Abschnitt. Wird unter gegenseitigem Ausschluss ausgeführt. **Funktionsweise:** Jedes Objekt hat einen Lock (Monitor-Lock). Max 1 Thead hat Lock. *synchronized* belegt den Lock des Obj. Besetzt bei Eintritt oder warten bis frei. Beim Austritt der Methode wieder freigegeben.

```
synchronized void f() { /* ... */ } // Object Lock
static synchronized void g() { /* ... */ } // Class Lock
```

Monitor

Objekt mit internem gegenseitigem Ausschluss. Nur 1 Thread operiert im Monitor. Alle äusseren Methoden synchronized. **Wait & Signal Mechanismus:** Threads können im Monitor auf Bedingung warten und wartende aufwecken (signal).

```
public synchronized void withdraw(int a) {
   while (amout > balance) { wait(); }
   balance -= a;
}
public synchronized void deposit(int a) {
   balance+= amount; notifyAll();
}
```

wait(): gibt Monitor-Lock temp. frei damit anderer Thread Bedingung erfüllen kann. **notify() / notifyAll():** Weckt beliebigen / alle Threads die warten. Notify: wenn Bedingung jeden Thread interessiert. **Pauschales wait & signal:** Wartende müssen selber schauen, ob sie ein Signal interessiert. **Signal and Continue:** Signalisierender Thread behält Monitor nach notify. Aufgeweckter Thread muss um Monitor-Eintritt kämpfen.

Spezifische Synchronisationsprimitiven

Semaphoren

Vergabe einer beschränkten Anzahl freier Ressourcen. Objekt mit Zähler (Anzahl freier Ressourcen). **aquire():** Bezieht Ressource. Warten falls keie Verfügbar, sonst Zähler - 1. **release():** Ressource freigeben, Zähler + 1.

Arten

Allgemeine: Zähler zwischen 0 bis N. *new Semaphore(N).* **Binäre:** Zähler 0 oder 1. *new Semaphore(1).* (Gegenseitiger Ausschluss) **Faire Semaphoren:** *new Semaphore(N, true)*, FIFO Warteschlange, langsamer.

```
private Semaphore upperL = new Semaphore(CAP, true);
private Semaphore lowerL = new Semaphore(0, true);
public void put(T item) throws InterruptedException {
   upperL.acquire();
   synchronized (queue) { queue.add(item); }
   lowerL.release();
}
public T get() throws InterruptedException {
   T item; lowerL.aquire();
   synchronized (queue) { item = queue.remove(); }
   upperL.release(); return item;
}
```

Multi-Acquire/Release: *acquire(N).*

Lock & Condition

Monitor mit mehreren Wartelisten für verschiedene Bedingungen. **Lock-Objekt:** Sperre für Eintritt in Monitor. **Condition-Objekt:** Wait & Signal für bestimmte Bedingung.

```
private Lock monitor = new ReentrantLock(true); // fair
private Condition nonFull = monitor.newCondition();
private Condition nonEmpty = monitor.newCondition();
public void put(T item) throws InterruptedException {
   monitor.lock();
   try {
      while(queue.size() == Capacity) { nonFull.await(); }
      queue.add(item);
      nonEmpty.signal();
   } finally { monitor.unlock(); }
}
public T get() throws InterruptedException {
   monitor.lock();
   try {
      while(queue.size() == 0) { nonEmpty.await(); }
      T item = queue.remove();
      nonFull.signal();
      return item;
   } finally { monitor.unlock(); }
}
```

Read-Write Locks

Gegenseitiger Ausschluss ist unnötig streng für lesende Abschnitte. Erlaube parallele Lese-Zugriffe.

```
private Collection<String> names = new HashSet<>();
private ReadWriteLock rwLock = new ReentrantReadWriteLock();
public boolean exists(String pattern) { // Read-only accesses
   rwLock.readLock().lock();
   try {
      return names.steram().anyMatch(n -> n.matches(pattern));
   } finally { rwLock.readLock().unlock(); }
}
public void insert(String name) { // Write / Read accesses
   rwLock.writeLock().lock();
   try {
      names.add(name);
   } finally { rwLock.writeLock().unlock(); }
}
```

Count Down Latch

Synchronisationsprimitive mit Count Down Zähler. Threads können warten, bis Zähler <= 0 wird. **await():** warten bis Count Down 0 ist. **countDown():** Zähler - 1.

```
var ready = new CountDownLatch(N); // Warte auf N cars
var start = new CountDownLatch(1); // Einer gibt signal
// N Cars:
ready.countDown(); start.await();
// RaceControl:
ready.await(); start.countDown();
```

Cyclic Barrier

Treffpunkt für fixe Anzahl Threads. Anzahl treffender Threads muss vorgegeben sein. Ist wiederverwendbar (mehrere Runden).

```
var start = new CyclicBarrier(N); // Treffende Autos
// N Cars:
start.await(); // braucht kein Race Control mehr

var gameRound = new CyclicBarrier(N);
// N Players:
while(true) {
   gameRound.await(); // play concurrently with others
}

// Mit Austausch
Exchanger.exchange(something);
// Blockiert bis anderer Thread auch exchange() aufruft.
```

Gefahren der Nebenläufigkeit

Neue Arten von Programmierfehler, die es bei single-Threading nicht gibt. Können sporadisch oder selten auftreten. Sehr schwierig durch Tests zu finden.

Race Condition

Mehrere Threads greifen auf gemeinsame Ressourcen ohne genügend synchronisation zu. Mögliche falsche Resultate oder falsches Verhalten. Ursache oft ein Data Race, nicht immer.

Data Race

Unsynchronisierter Zugriff auf gleichen Speicher. Selbe Variable oder Array Element (min. 1 schreibender Zugriff).

Race Condition ohne Data Race

Critical Sections nicht geschützt. Data Races mit Synchronisation eliminiert, aber nicht genügend grosse synchronisierte Blöcke.

```
synchronized int getBalance() { return balance; }
synchronized void setBalance(int x) { balance = x; }
// Mehrere Threads, Kein Atomares Inc — Lost Update moeglich
accout.setBalance(account.getBalance() + 100);
```

Kombinationen

	Race Condition	keine Race Condition
Data Race	Fehlerhaftes Programmverhalten	Programm verhält sich zwar korrekt, dennoch formal falsch
kein Data Race	Fehlerhaftes Programmverhalten	Richtig

Alles Synchronisieren? Hilft nichts. Race Condition trotzdem möglich. Weitere Nebenläufigkeitsfehler. Synchronisationskosten sind relativ teuer.

Synchronisation: Verzichtbare Fälle

Immutability (Unveränderlicheit): Objekte mit nur lesendem Zugriff. **Confinement (Einsperrung):** Objekt gehört nur einem Thread zu einer Zeit.

Immutable Objects

Instanzvariablen alle *final*. Primitive Datentypen. Referenzen wiederum auf Immutable Objekte. Methoden mit nur lesendem Zugriff. Konstruktor initialisiert Instanzvariablen. Nach Konstruktor kann Objekt ohne Synchronisation von Threads verwendet werden.

Confinement

Struktur garantiert, dass auf ein Objekt nur durch einen Thread zur gleichen Zeit zugegriffen wird. **Thread Confinement:** Objekt gehört nur einem Thread und wird nur von demjenigen verwendet. **Object Confinement:** Objekt in anderem bereits synchronisierten Objekt eingekapselt.
Kapselungsbrüche: 1. Inneres Objekt ist aussen zugreifbar. 2. Rückgabe einer Referenz auf inneres Objekt. 3. Holder installiert selber Referenz ausserhalb. 4. Inneres Objekt gibt selber *this* raus.

Thread Safety

Klassen / Methoden, die intern synchronisiert sind. Keine Race Conditions innerhalb dieses Codes. Kritischer Abschnitt nur pro Methode erfüllt. **Aber:** Kein kritischer Abschnitt über mehrere Methodenaufrufe. Andere Nebenläufigkeitsfehler möglich.

Java Collections - Thread Safety

Alte Java 1.0 Collections (Vector, Stack, Hashtable): **JA**. Moderne Collections (HashSet, TreeSet, ArrayList, etc.): **NEIN**. Concurrent Collections (ConcurrentHashMap, etc.): **JA**.

Verstecktes Multi-Threading

Finalizers: Laufen über separaten Finalizer-Thread. **Timers:** Handler durch separaten Thread ausgeführt (ausser GUI). **Externe Libraries & Frameworks:** z.B. Abarbeitung von Web-Service Aufrufen.

Deadlock

Beide Threads sperren sich gegenseitig aus:

```
syncrhonized(listA) { // Thread 1
   synchronized(listB) {
      listB.addAll(listA);
   }
}
synchronized(listB) { // Thread 2
   synchronized(listA) {
      listA.addAll(listB);
   }
}
```

Spezialfall: Livelocks

Threads haben sich gegenseitig permanent blockiert. Führen aber noch Warteinstruktionen aus. Verbrauchen CPU während Deadlock.

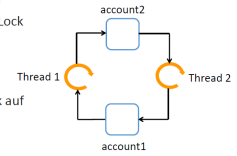
```
// Thread 1
b = false; while (!a) { } b = true;
// Thread 2
a = false; while (!b) { } a = true;
```

Deadlock Erkennung

Betriebsmittelgraph

- Thread T wartet auf Lock von Ressource R

- Thread T besitzt Lock auf Ressource R



Deadlock = Zyklus im Betriebsmittelgraph
Deadlock Voraussetzungen: Geschachtelte Locks, Zyklische Warteabhänigkeiten

Deadlock Vermeidung

Lineare Sperrordnung der Ressourcen einführen. Nur geschachtelt in aufsteigender Reihenfolge sperren. Eliminiert zyklische Warteabhänigkeiten.
Grobgranulare Locks wählen. Wenn lineare Sperrordnung nicht möglich/sinvoll ist. Sperre gesamte Bank bei Kontenzugriff. Eliminiert Schachtelung von Locks.

Starvation

Ein Thread kriegt nie die Chance, auf eine Ressource zuzugreifen, obwohl sie immer wieder frei wird. Andere Threads überholen andauernd. Liveness/Fairness Problem.

```
do { // Starvation moeglich
   success = account.widthdraw(100);
} while (!success);
```

Vermeidung

Faire Synchronisationskonstrukte (bei Semaphore, Lock & Condition, ReadwriteLock möglich). Java Monitor hat ein Fairness Problem (Starvation anfällig).

Parallelität Korrektheitskriterien

Safety: Keine Race Conditions, Keine Deadlocks. **Liveness:** Keine Starvation.

Thread Pool

Tasks: Implementieren potentiell parallele Arbeitspakete. Werden in Warteschlange eingereiht. **Thread Pool:** Beschränkte Anzahl von Worker-Threads. Holen Tasks aus der Warteschlange und führen sie aus.

Vorteile

Beschränkte Anzahl von Threads: Viele Threads verlangsamen das System oder überschreiten Speicherlimit. **Recycling der Threads:** Spare Thread-Erzeugung und Freigabe. **Höhere Abstraktion:** Trenne Task-Beschreibung von Task-Ausführung. **Anzahl Threads pro System konfigurierbar:** #Worker Threads = #Prozessoren + #I/O-Aufrufe

Einschränkung

Tasks dürfen nicht aufeinander Warten, sonst Deadlock. **Run to Completion:** Task muss zu Ende laufen, bevor Worker Thread anderen Task ausführen kann. **Ausnahme:** geschachtelte Tasks.

Java Fork-Join-Pool

```
var threadPool = new ForkJoinPool();
Future<Integer> future = threadPool.submit(() -> { });
Int result = future.get(); // Blockiert bis Task beendet
```

Future Konzept

Repräsentiert ein zukünftiges Resultat. Proxy auf Resultat, das evtl. noch nicht bekannt ist. Muss Ende der Berechnung abwarten, bevor Resultat zurückgegeben wird.

Rekursive Task Erstellung

```
class CountTask extends RecursiveTask<Integer> {
   // Constructor
   @Override
   protected Integer compute() {
      // no / single element => return result
      // Calculate lower, middle, upper
      var left = new CountTask(lower, middle);
      var right = new CountTask(middle, upper);
      left.fork(); right.fork();
      return right.join() + left.join();
   }
```

```
}
// Ausfuehrung
var threadPool = new ForkJoinPool();
int res = threadPool.invoke(new CountTask(2, N)); // blockiert
```

Keine Über-Parallelisierung

Tuning mit Schwellwert durch Programmierer. Verhältnis zwischen Arbeitspaketgrösse und Anzahl Tasks optimieren.

Fork Join Pool Internals

Automatischer Parallelitätsgrad: Default: #Worker Threads = #Prozessoren Dynamisches Hinzufügen / Wegnehmen von Threads
Common Pool: Verhindert Engpässe durch zu viele Thread Pools.

Asynchrone Programmierung

Unnötige Synchronität: Langlaufende Rechnungen, I/O Aufrufe.
Asynchroner Aufruf: Aufrufer soll während der Operation weitermachen.

```
// Klassisch
Future<long> future = threadPool.submit(() -> { });
   // other work
process(future.get());
// Modern
CompletableFuture<long> future =
              CompletableFuture.supplyAsync(() -> { });
   // other work
process(future.get());
```

Ende des async Aufrufs

Caller-zentrisch (Pull): Caller warted auf Task-Ende und holt sich Resultat, Future abfragen. **Callee-zentrisch (Push):** Async Operation informiert direkt über Resultat. Completion Callback.

Continuation

Folgeaufgabe an asynchrone Aufgabe anhängen.

```
// thenApply() fuer Continuation mit Rueckgabe
future.thenAccept(res -> System.out.println(res));
```

Ausführung: durch beliebigen Thread, durch Initiator, wenn Future bereits Resultat hat. **Asynchrone Continuations:** *thenAcceptAsync()* bzw. *thenApplyAsync()*.

Multi-Continuation

```
CompletableFuture.allOf(f1, f2).thenAcceptAsync(() -> { }));
CompletableFuture.any(f1, f2).thenAcceptAsync(() -> { }));
```

Fire and Forget

Task starten, ohne das Ende abzuwarten. Submitter ruft kein *get()* oder *join()* auf.

```
CompletableFuture.runAsync(() -> { });
```

Daemon Workers: Workers Threads in Fork-Join-Pools sind Daemon. Anwendung kann vor Task-Ende stoppen.
Ingorierte Exceptions: Exceptions in Fire & Forget Task werden ignoriert.