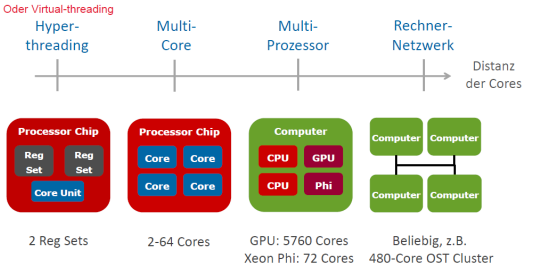
## 1 Multi-Threading Grundlagen




**Parallelität (Parallelism):** Mehrere Teilabläufe, welche gleichzeitig auf mehreren Prozessoren/Cores laufen. → Schnellere Programme
**Nebenläufigkeit (Concurrency):** Gleichzeitig oder verzahnt ausführbare Abläufe, welche auf gemeinsame Ressourcen zugreifen (Logisch unabhängig) → Einfachere Programme
**User-Level Threads:** Im Prozess implementiert (keine echte Parallelität)
**Kernel-Level Threads:** Im Kernel implementiert (Multi-Core Ausnutzung) → Kontextwechsel vom Prozess per SW-Interrupt

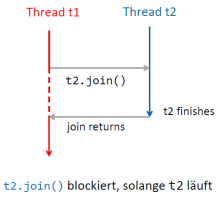
### 1.1 Thread Scheduling

**Processor Sharing:** Mehr Threads als Prozessoren und bei Wartebidingung Proz. an anderen bereiten Thread abgeben.
**Verzahnte Ausführung:** Prozessor führt Instruktionen von mehreren Threads in Teilsequenzen aus. → Quasiparallelität
**Synchron:** Warten auf Bedingung → Waiting Threads
**Asynchron:** Zeitablauf → Nach gewisser Zeit Proz. abgeben
**Kooperativ:** Threads müssen explizit beim Scheduler in Abständen Kontextwechsel synchron initiieren
**Preemptiv:** Scheduler kann per Timer-Interrupt den laufenden Thread asynchron unterbrechen

### 1.2 Multi Thread Programmierung

**JVM ist ein Prozess im Betriebssystem.** → Programmierer kann weitere Threads starten
Die JVM läuft, solange Threads laufen.
**Ausnahme:** Deamon Threads (z.B. Garbage Collector). Mit System.exit()/Runtime.exit() kann die JVM direkt terminiert werden (unsauber)

```
// A,B Ausgaben können durcheinander sein:
public class MultiThreadTest {
   public static void main (String[] args ) {
      var a = new Thread(Thread(() -> multiPrint("A"));
      var b = new Thread(Thread(() -> multiPrint("B"));
      a.start(); b.start();
      System.out.println("main finished");
   }
   static void multiPrint (String label) {
      for (int i = 0; i < 10; i++) {
         System.out.println(label + ": " + i);
      } } }
// Explizite Runnable-Implementation:
class SimpleLogic implements Runnable {
   @Override
   public void run () {
      // thread behavior
   } }
var myThread = new Thread(new SimpleLogic());
myThread.start();
// Sub-Klasse von Thread
class SimpleThread extends Thread {
   @Override
   public void run ()
      // thread behavior
   } }
var myThread = new SimpleThread(); myThread.start();
```




t1 wartet, bis t2 fertig ist.
**Warten:**
Thread.sleep(milliseconds)
**Prozessor freigeben:**
Thread.yield()
**Von aussen Unterbrechen:**
myThread.interrupt()
**Aktuelle Thread-Instanz:**
Thread currentThread()
**Als Deamon markieren:**
void setDeamon(boolean on)

## 2 Thread synchronisation

**Threads teilen sich Adressraum und Heap.**

### 2.1 Race Condition

Wenn mehrere Threads das Selbe Objekt lesen und anhand vom Resultat dieses überschreiben. (z.B. deposit: zuerst lesen dann += amount → Zwischen lesen und schreiben könnte ein anderer Thread die balance geändert haben)
**Lösung:** Gegenseitiger Ausschluss (Mutual Exclusion)
→ Geht nicht mit einfachem locked Boolean (Keine atomaren Instruktionen)

### 2.2 Synchronized (Monitor Lock)

Das Keyword synchronized belegt einen Lock für das Objekt.
→ Nur ein Thread kann eine synchronized Methode in derselben Instanz zur gleichen Zeit ausführen.

```
// deposit und withdraw sind im gegenseitigem Ausschluss
class BankAccount {
   private int balance = 0;
   public synchronized void deposit (int amount) {
      this.balance += amount }
   public synchronized boolean withdraw (int amount) {
      if (amount <= this.balance) {
         this.balance -= amount;
         return true; } {else {return false; } } }
// synchronized(object){ statements } ist eine explizite
      Angabe, auf welcher Instanz gelockt wird:
public void deposit(int amount) {
   synchronized(this) {this.balance += amount;} }
```

**Problem:** Wenn man auf Bedingung warten will. → sleep() und yield() geben den Monitor-Lock nicht frei.
**Lösung:** Wait & Signal Mechanismus. → Threads können im Monitor auf Bedingung warten oder können Wartende Threads aufwecken (Änderung signalisieren)
wait() gibt lock frei und wartet auf Signal. notify() signalisiert nur einen beliebigen (zufälligen), wartenden Thread. → Wartet vlt auf andere Bedingung und kann zu ewigem Warten führen
notifyAll() signalisiert alle wartenden Threads.
**Wichtig:**
- Signalisierender Thread behält Monitor
- Thread ist im inneren Warteraum, bis Signal kommt
- Bei notify() kommt Thread wieder in äusseren Warteraum

```
class BoundedBuffer <T> {
  private Queue<T> queue = new LinkedList<>();
  private int limit = 1; // or initialize in constructor
  public synchronized void put(T item) throws
        InterruptedException {
    while (queue.size () == limit) {
      wait(); // await non full
    } queue.add(item); notifyAll(); } // signal non empty
  public synchronized T get() throws
        InterruptedException {
    while (queue.size () == 0) {
      wait();// await non empty
    } var item = queue.remove(); notifyAll(); // non full
    return item; } }
```

## 3 Spezifische Synchronisationsprimitiven

### 3.1 Semaphor

**Ziel:** Vergabe einer beschränkten Anzahl freier Ressourcen. Semaphor ist also ein Objekt mit Zähler.
**acquire():** Bezieht freie Ressource. Wartet, falls keine verfügbar (Zähler <= 0). Dekrementiert Zähler wenn erfolgreich.
**release():** Ressource freigeben. Zähler inkrementieren.
**Verwendung:** new Semaphore(N); oder new Semaphore(N, true); → true für Fairness (FIFO-Prinzip), aber langsamer

```
// Mutex Semaphore als alternative zu synchronized
class BoundedBuffer <T> {
  private Queue<T> queue = new LinkedList<>();
  private Semaphore upperLimit=new Semaphore(cap, true);
  private Semaphore lowerLimit = new Semaphore(0, true);
  // private Semaphore mutex = new Semaphore(1, true);
  public void put(T item) throws InterruptedException {
    upperLimit.acquire();
    synchronized (queue) {queue.add (item);}
    // mutex.acquire(); queue.add(item); mutex.release();
    lowerLimit.release(); }
  public T get() throws InterruptedException {
    T item; lowerLimit.acquire();
    synchronized (queue) { item = queue.remove(); }
    // mutex.acquire(); T item = queue.remove(); mutex.
         release();
    upperLimit.release(); return item; } }
```

### 3.2 Lock & Condition

**Ziel:** Monitor mit mehreren Wartelisten für verschiedene Bedingungen. Braucht kein synchronized, wait, notify, notifyAll

```
class BoundedBuffer<T> {
  private Queue<T> queue = new LinkedList<>();
  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(); } }
```

### 3.3 Read-Write Lock

**Ziel:** Gegenseitiger Ausschluss ist unnötig streng für rein lesende Abschnitte. → Erlaube parallele Lese-Zugriffe, Gegenseitiger Auschluss bei Schreiben.

```
var rwLock = new ReentrantReadWriteLock(true);
rwLock.readLock().lock(); // read-only accesses
rwLock.readLock().unlock();
rwLock.writeLock().lock(); // read and write accesses
rwLock.writeLock().unlock();
```

### 3.4 Count Down Latch

**Ziel:** Synchronisationsprimitive mit Count Down Zähler. Threads können warten, bis Zähler <= 0 ist. countDown(), um Zähler zu dekrementieren aber kein countUp().

### 3.5 Cyclic Barrier

**Ziel:** Treffpunkt für fixe Anzahl Threads. Ist wiederverwendbar.

```
// CountDown Latch
var ready = new CountDownLatch(N); //Warte auf N Threads
var start = new CountDownLatch(1); // Einer gibt Signal
// Cyclic Barrier
var start = new CyclicBarrier(N); // Kein start nötig
```

## 4 Gefahren der Nebenläufigkeit

### 4.1 Race Condition

**Problem:** Ungenügend synchronisierte Zugriffe auf gemeinsame Ressourcen. → Falsche Resultate oder falsches Verhalten möglich. (meistens wegen Data-Race)
**Ohne Data Race weil:** Critical Sections nicht geschützt.
**Kombinationen:**
Data Race + Race Condition: Fehlerhaftes Programmverhalten
Data Race ohne Race Condition: Korrektes Programmverhalten, aber formal falsch
Race Condition ohne Data Race: Fehlerhaftes Prog.verhalten
Weder noch: Richtig
**Wann kann man auf Synchronisation verzichten?**
**Immutability** (Unveränderlichkeit): Instanzvariablen sind alle final, Methoden mit nur Lesezugriff → Konstruktor initialisiert die Instanzvariablen.
**Confinement** (Einsperrung): Objekt gehört nur einem Thread zu einer Zeit. Oder Objekt ist in anderem bereits synchronisiertem Objekt eingekapselt

### 4.2 Deadlocks

**Problem:** Gegenseitiges Aussperren von Threads.

```
class BankAccount {
  private int balance;
  public synchronized void transfer(Acc to, int amount)
       {
    balance -= amount;
    to.deposit(amount); } // implizit geschachtelter Lock
  public synchronized void deposit (int amount) {
    balance += amount; } }
// Thread 1          Thread 2
a.transfer(b, 20);   b.transfer(a, 50);
```

**Deadlock Vermeidung:**
- Lineare Sperrordnung der Ressourcen einführen → Nur geschachtelt in aufsteigender reihenfolge sperren
- Grobgranulare Locks wählen → Wenn lineare nicht möglich

### 4.3 Starvation

**Problem:** Kontinuierliche Fortschrittsbehinderung von Threads wegen Fairness-Problem. → Ist ein Liveness/Fairness Problem
**Starvation Vermeidung:**
- Länger wartende Threads haben Vortritt
- Fairness einschalten mit Semaphore, Lock & Condition, rtead-Write Lock
- Java Monitor hat ein Fairness-Problem

## 5 Thread Pools

### 5.1 Konzept und Funktionsweise

**Tasks:** Implementieren potentiell paralelle Arbeitspakete. Auszuführende Tasks werden in Warteschlange eingereiht.
**Thread Pool:** Beschränke Anzahl von Worker-Threads. Holen Tasks aus der Queue und führen sie aus.

### 5.2 Vorteile und Einschränkungen

**Vorteile:**
- Beschränkte Threadanzahl (Zu viele verlangsamen System)
- Recycling der Threads (Thread-Erzeugung und Freigabe)
- Höhere Abstraktion (Trenne TaskBeschreibung/Ausführung)
- Anzahl Threads pro System konfigurierbar

**Einschränkungen:**
- Tasks dürfen nicht aufeinander warten (Deadlock)
- Task muss zu Ende laufen, bevor Worker Thread anderen Task ausführen kann (Ausnahme: Geschachtelte Tasks)

### 5.3 Fork & Join Pool

**Future Konzept:** Repräsentiert ein zukünftiges Resultat. Proxy wartet auf Resultat, muss das Ende der Berechnung abwarten.

```
// Future Verwendung
var threadPool = new ForkJoinPool();
Future<Integer> future = threadPool.submit(() -> {
   return value; }); // Tasks können Rückgabe haben
int result = future.get() // Blockiert, bis Task beendet
// Einfaches Beispiel:
var left = threadPool.submit(() -> count(leftPart));
var right = threadPool.submit(() -> count(rightPart));
result = left.get() + right.get();
```

#### 5.3.1 Rekursive Tasks

Tasks können Untertasks starten und abwarten. Erben von RecursiveTask<T>
- T compute(): Task Implementierung
- fork(): Starte als Sub-Task in einem anderen Task
- T join(): Warte auf Task-Ende und frage Resultat ab
- T invoke(): Ein Sub-Task starten und abwarten
- invokeAll(): Mehrere Sub-Tasks starten und abwarten

```
// Eventuell THRESHOLD einbauen und zwischen parallel
     und sequentiell unterscheiden
class CountTask extends RecursiveTask<Integer> {
  private final int lower, upper;
  public CountTask(int lower, int upper) {
    this.lower = lower; this.upper = upper; }
  protected Integer compute() {
    if (lower == upper) { return 0; }
    if (lower+1 == upper) {return isPrime(lower)? 1 : 0;}
    int middle = (lower + upper) / 2;
    var left = new CountTask (lower, middle);
    var right = new CountTask (middle, upper);
    left.for(); right.fork();
    return right.join () + left.join(); } }
```

### 5.4 Asynchrone Programmierung

**Ziel:** Aufrufer soll während der Operation weiterarbeiten. → Operation in Thread oder Thread Pool auslagern

```
// Klassisch:
Future<int> future = threadPool.submit(() -> doSmth());
// other work
process(future.get()); // Resultat über future
// Modern: Starte asynchrone Aufgabe in Standard Pool
- ForkJoinPool.commonPool();
CompletableFuture<int> future = CompletableFuture
.supplyAsync(()->doSmth());//runAsync falls kein return
//other work
process(future.get());
```

#### 5.4.1 Continuation

**Ziel:** Folgeaufgabe an asynchrone Aufgabe anhängen. Ausführung der Continuation durch beliebigen Thread.

```
// Continuation:
future.thenAccept(result -> syso(result));
// Tasks verketten:
future.thenApplyAsync(second).thenAcceptAsync(third);
// Multi-Continuation:
CompletableFuture.allOf(future1, future2)
.thenAcceptAsync(continuation); //Warten aufeinander
CompletableFuture.any(future1, future2)
.thenAcceptAsync(continuation)//Sobald einer fertig ist
// runAsync() ist Fire and Forget. Workers sind Deamons
     und ignoriert Exceptions
```

## 6 Task Parallel Library

### 6.1 Threading in .NET

Keine Vererbung: Delegate bei Konstruktor. Exception in Thread führt zu Abbruch des Programms.
**.NET Monitor:** FIFO Warteschlange, wait() in schlaufe, PulseAll() für aufwecken, Synchronisation mit Hilfsobjekt ist Best Practice, Kein Fairness-Flag, Kein Lock & Condition.
**Zusätzlich:** ReadWriteLockSlim für Upgradeable Read/Write, Semaphoren auch auf OS-Stufe nutzbar, Mutex (Binärer Semaphore auf OS-Stufe)

```
var myThread = new Thread(() => {
  for (int i = 0; i < 100; i ++) {
    Console.WriteLine("MyThread step {0}", i); } });
myThread.Start(); myThread.Join();
// Monitor in .NET
class BankAccount {
  private decimal balance;
  private object syncObject = new() //Monitor
        Hilfsobjekt
  public void Withdraw(decimal amount) {
    lock (syncObject) { // Analog zu synchronized
      while (amount > balance) {
        Monitor.Wait(syncObject); }
      balance -= amount; } }
  public void Deposit(decimal amount) {
    lock (syncObject) {
      balance += amount;
      Monitor.PulseAll(syncObject)}}} // wie notifyAll
```

### 6.2 Task Parallelität

**Work Stealing Thread Pool** mit Abstraktionsstufen:
Task Parallelität: Explizite Tasks starten und warten
Data Parallelität: Parallele Statements und Queries
Asynchrone Programmierung: Mit Continuation Style

```
task task = Task.Run(() => { implementation });
task.Wait() // Warten auf task
Task<int> task = Task.Run(() => {return 2;});
Console.Write(task.Result) // Wartet auf Task Ende
```

### 6.3 Datenparallelität

```
// Parallele Statements wartet bis alle fertig sind
Parallel.Invoke(
  () => MergeSort(l,m), () => MergeSort(m,r));
// Parallele Loop
Parallel.ForEach(list, file => Convert(file));
// Falls Iteration unabhängig:
Parallel.For(0, array.Length, i => doSmth(array[i]));
```

### 6.4 Asynchrone Programmierung

```
var task = Task.Run(LongOperation); // ist asynchron
int result = task.Result;
// Task Continuations (Wie CompletableFutures
task1.ContinueWith(task2).ContinueWith(task3);
// Multi-Continuation
Task.WhenAll(task1, task2).ContinueWith(continuation);
Task.WhenAny(task1, task2).ContinueWith(continuation);
```

## 7 GUI und Threading

### 7.1 GUI & Threading

GUI Frameworks erlauben nur **Single-Threading**: Nur spezifischer UI-Thread darf auf UI-Komponente zugreifen.
**GUI Implikationen:** Keine langen Operat. in UI Events, Kein Zugriff durch fremde Threads (blockieren & Race Condition)
**UI Interaktion:** UI Operationen müssen als Events in die UI Event Queue eingereiht werden.
**Dispatching:** Benutzung der Klasse SwingUtilities

```
button.addActionListener(event -> {
  new Thread(() -> {
    var text = readHugeFile();
    SwingUtilities.invokeLater(() -> { // asynchron
      textArea.setText(text); });//synchron:invokeAndWait
    }).start(); });
// Sauberer Setup: frame.pack() und setVisible(true) (
     Auf JFrame bezogen) in SwingUtilities ausführen
// Background Worker:
class BackgrCalc extends SwingWorker<Integer, Void> {
  @Override // Int: Resultat, Void: Zwischenresultat
  public Integer doInBackground () {
    return longComputation (); }
  @Override // UI Thread
  protected void done() {
    try { int result = get();
      label.setText("Result: " + result);
    } catch (InterruptedException|ExecutionException e) {
    } } } // get() gibt Resultat von doInBackground
```

**.NET UI Thread Modell:** Gleiches Prinzip wie in Java.

```
// UI Thread ist der Aufrufen von Application.Run()
// UI Event Dispatching:
control.Dispatcher.InvokeAsync(action); // WPF
control.BeginInvoke(delegate) // WinForm
// Sind beide asynchron. Synchron mit Invoke
```

### 7.2 C# async/await

async für Methode (Aufrufer wird blockiert). await für Tasks (Warten auf Ende eines TPL Task).
**Rückgabetypen:** void: Fire & Forget, Task: Keine Rückgabe, erlaubt Warten, Task<T> Rückgabetyp T.
**Ausführungsmodell:** Aufrufer führt async Methode synchron aus, bis ein blockierendes await anliegt. Erst danach asynchron.

```
async Task<string> ConcatWebSitesAsync(string url1,
      string url2) {
  HttpClient client = new HttpClient();
  Task<string> download1 = client.GetStringAsync(url1);
  Task<string> download2 = client.GetStringAsync(url2);
  string site1 = await download1;
  string site2 = await download2;
  return site1 + site2; }
```

## 8 Memory Models

### 8.1 Java Memory Model

**Problem bei Weak Consistency:** Speicherzugriffe werden in verschiedenen Reihenfolgen von verschiedenen Threads gemacht. (Ausnahme: Synchronisationen/Speicherbarrieren)
**Problem bei Omptimierungen:** Betrifft Compiler, Laufzeitsystem und CPUs. Sie ordnen Instruktionen um
→ Keine sequentielle Konsistenz bei Nebenläufigkeit
**Atomicity:** Einzelnes lesen und schreiben ist atomar bei primitiven Datentypen bis 32 Bit → Sonst volatile Keyword.
**Visibility:** Sieht Änderungen eines anderen Thread eventuell nicht oder viel später (z.B. wegen Compiler-/JIT-Optimierung)
**Visibility Garantien:**

- Locks Release & Acquire: Änderungen vor Release werden bei Acquire sichtbar
- Volatile Variable: Änderungen bis zum write werden beim read sichtbar
- Thread/Task-Start und Join: Bei Start Eingabe und bei Join Ausgabe
- Final Variablen: Nach Ende des Konstruktors sichtbar

**Ordering Garantien:**

- Program Order: Sequentielles Verhalten jedes einzelnen Thread bleibt erhalten
- Synchronization Order: Syncbefehle werden zueinander nie umgeordnet (Locking, volatile, Thread start/join)
- Happens-Before Relation: Alles andere kann umgeordnet werden (ausser garantierte Sichtbarkeit unter Threads)

**Atomic Klassen:** Gibt es für Boolean, Integer, Long und Referenzen (auch für Array Elemente). Divere atomare Operationen wie addAndGet(), getAndAdd() etc.

```
public class SpinLock {
  private AtomicBoolean locked=new AtomicBoolean(false);
  public void acquire() {
    while (locked.getAndSet(true)) { }
  public void release() {
    locked.set(false); } }
```

**Lock-freie Datenstrukturen:** ConcurrentLinkedQueue<V>, ConcurrentLinkedDeque<V>, ConcurrentSkipListSet<V>, ConcurrentHashMap<K, V>, ConcurrentSkipListMap<K, V>

### 8.2 .NET Memory Model

**Unterschied zu Java Memory Model:**
Atomacity: long/double nicht mit volatile atomar. Visibility: Nicht definiert, implizit durch Ordering. Ordering: Nur Half und Full Fences → Atomare Instruktionen mit Interlocked Klasse
**.NET Volatile Half Fences:**
**Volatile Write:** Vorangehende Zugriffe bleiben davor **Volatile Read:** Nachfolgende Zugriffe bleiben danach
**.NET Volatile Full Fences:**
Thread.MemoryBarrier(); → Verbietet Umordnung in beide Richtungen.

## 9 Actor Model

Aktive Objekte: Objekte haben nebenläufiges Innenleben
Kommunikation: Objekte senden und empfangen Nachrichten
Kein Shared Memory: Nur Austausch von Nachrichten über Kanäle/Mailboxen
**Akka Empfangsverhalten:**
**Reaktion auf ankommende Nachricht:** Spezielle Behandlungs Methode wird ausgeführt. **Effekte per Behandlung:** Ändere privaten Zustand, Sende nachrichten, Erzeuge neue Actors. **Intern sequentiell:** Nur eine Nachricht auf einmal bedienbar (Buffer)
Einfacher Akka Actor

```
public class NumberPrinter extends UntypedActor {
  public void onReceive(final Object message) {
    if (message instanceof Integer) {
      System.out.println(message); } }
// Erzeugen und Senden
ActorSystem system = ActorSystem.create("System");
ActorRef printer = system.actorOf(Props.create(
      NumberPrinter.class));
for (int i = 0; i < 100; i++) {
  printer.tell(i, ActorRef.noSender()); }
system.shutdown();
```

## 10 GPU Parallelisierung

## 11 GPU Parallelisierung 2

## 12 Cluster Parallelisierung

## 13 Concurrency in Python & JavaScript