

Application Performance Management

Frühling 2022

Garbage Collection

Zoltán Majó

Vorstellung

Berufserfahrung

- Seit 2017: Senior Software Engineer / Technical Consultant / Projekt Manager
Ergon Informatik AG, Zürich
- 2014-2017: Compileringenieur Java Virtuelle Maschine
Oracle Corporation

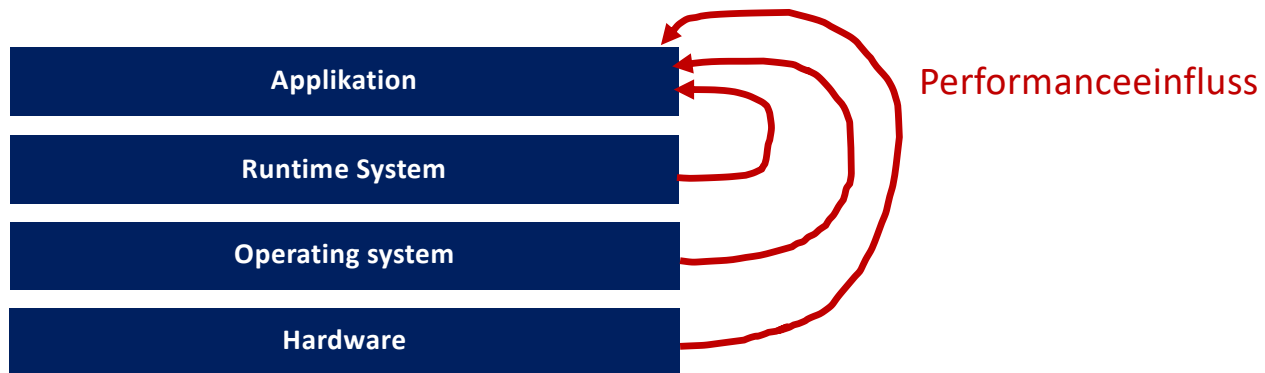
Studium

- 2008-2014: Doktorat an der ETH Zürich
- 2002-2007: Informatikstudium, TU Cluj, Rumänien

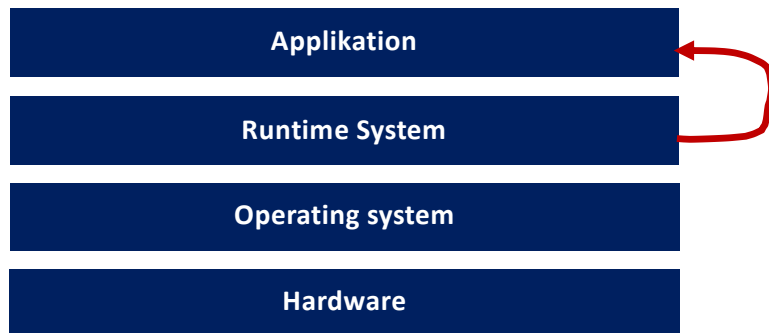
Lehre

- 2017: Vorlesung Compilerbau an der ETH Zürich
- Seit 2018: APM an der FHNW

Aufbau einer typischen Applikation



Unser Fokus



Performanceeinfluss

Einflussfaktoren durch einen Managed Runtime

- | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| • Garbage Collection | Wird im heutigen APM Modul betrachtet |
| • Just-in-Time Kompilierung | Wird im nächsten APM Modul betrachtet |
- Class Loading
 - Optimierungstechniken für Managed Runtimes
 - z.B. Inline Caching
 - ...

Basis für praxisnahe Diskussion: Java Hotspot VM

- **Konkretes Beispiel eines Managed Runtime**
- **Breite Verwendung weltweit**
- **Besprochene Prinzipien gelten auch für Systeme**

Garbage Collection

- **Was ist GC?**
- **Wie beeinflusst die Performanz von GC?**
 - Komplexität des GC-Algorithmus (Beispiele)
 - Implementierung des Algorithmus (konstante Faktoren)
 - Generational GC
 - Serielle, parallele und nebenläufige GC
- **Wie beeinflusst GC die Performanz von Applikationen**
 - Wichtige Performanzmerkmale
 - Performanzerhöhung durch GC Tuning

Danke an Prof. Dr. Thomas R. Gross (ETH Zürich) für Teil der Folien

Speicherverwaltung

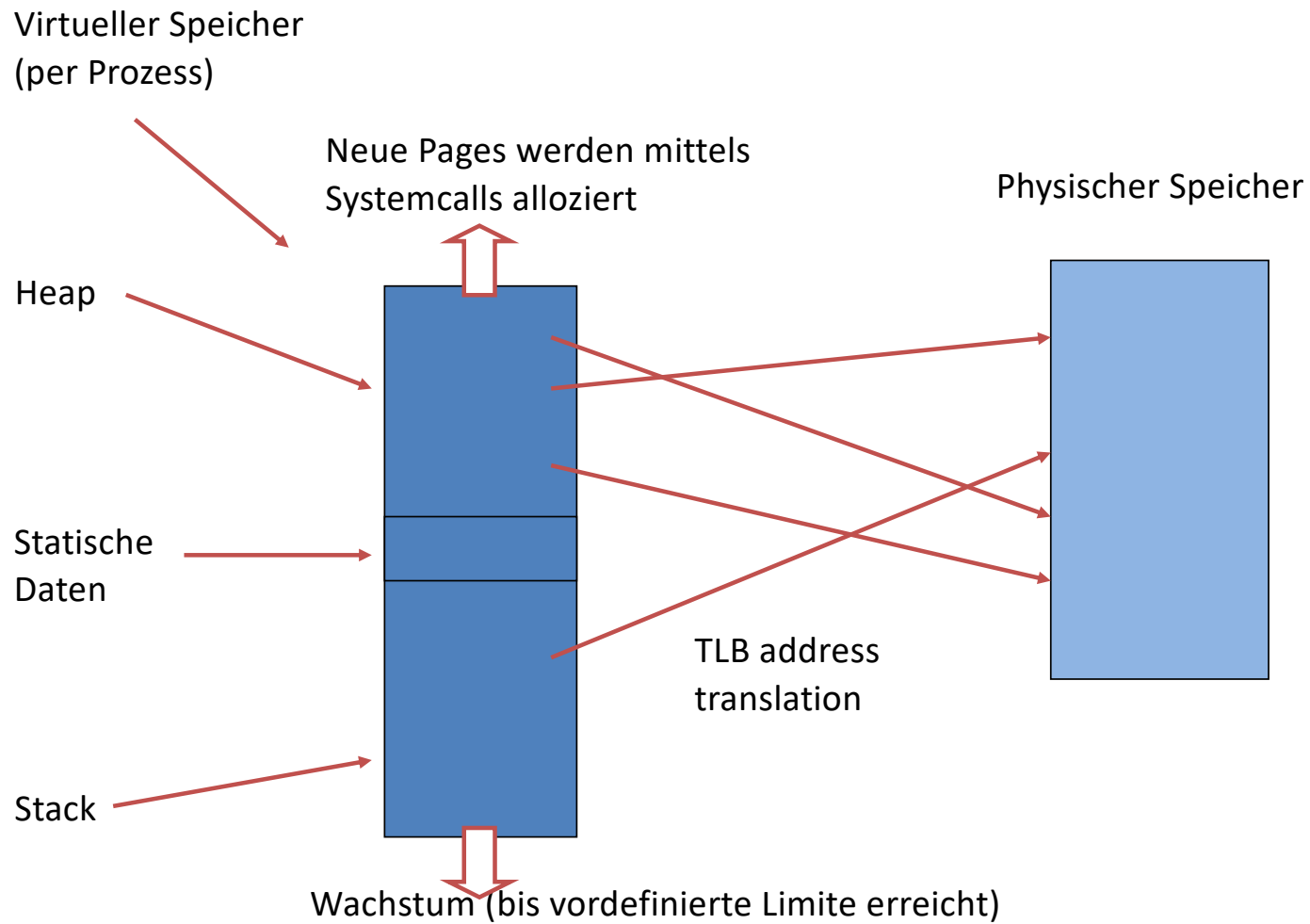
Viele moderne Programmiersprachen unterstützen dynamische Speicherallokation

- Programme können z.B. Records, Arrays und Objekte zur Laufzeit allozieren

Die Programmiersprache muss mit der Zurückforderung und Recycling allozierter Speicher umgehen können

- Teil der Spezifikation der Programmiersprache
- Aufgabe dem Runtime System (z.B., der Java Virtuelle Maschine) überlassen

Speicherlayout



Speicherplatz

Virtueller Speicher ist unbegrenzt

- Zumindest konzeptuell

Physischer Speicher ist begrenzt

- Limite kann vom Betriebssystem gesetzt werden
- Limite kann beim Prozessstart gesetzt werden (wegen anderen Prozessen)
- Adressraum ist limitiert

Performanz ist wichtig

- Festplatten sind weniger performant als Hauptspeicher

Unbenutzte Daten müssen entfernt werden

→ «Garbage Collection» (GC)

GC (Forts.)

Da es schwierig ist festzustellen, welche Objekte Müll sind, unterstützen Programmiersprachen unterschiedliche Ansätze

Ansatz 1: Der Programmierer muss sich darum kümmern

- Explizite Allokation/Deallokation

Ansatz 2: Das Laufzeitsystem muss sich darum kümmern

- Automatisch
- Viele Algorithmen

Ansatz 1: Explizite Speicherverwaltung

Verwaltung des Speichers mittels einer Bibliothek

Programmierer entscheidet wann und wo Speicher alloziert/dealloziert wird

```
void* malloc(long n)  
void free(void *addr)
```

Wenn nötig, die Bibliothek beantragt mehr Pages vom Betriebssystem

- Mittels Systemcalls

Vorteile/Nachteile der expliziten Speicherverwaltung

Vorteile:

- Programmierer sind schlau
- Programmierer entscheidet, wann der Mehraufwand der Allokierung akzeptabel ist

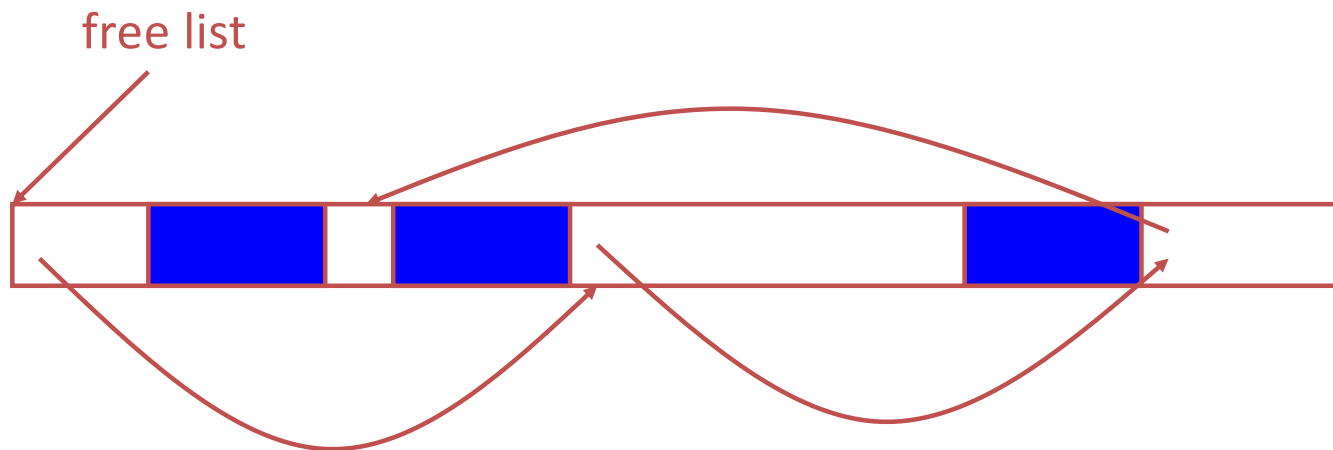
Nachteile:

- Auch schlaue Programmierer machen Fehler
- Programmierer möchten sich nicht unbedingt mit solchen Details beschäftigen
- Automatische Speicherverwaltung kann günstig sein

Explizite Speicherverwaltung: Details

Wie funktioniert malloc/free?

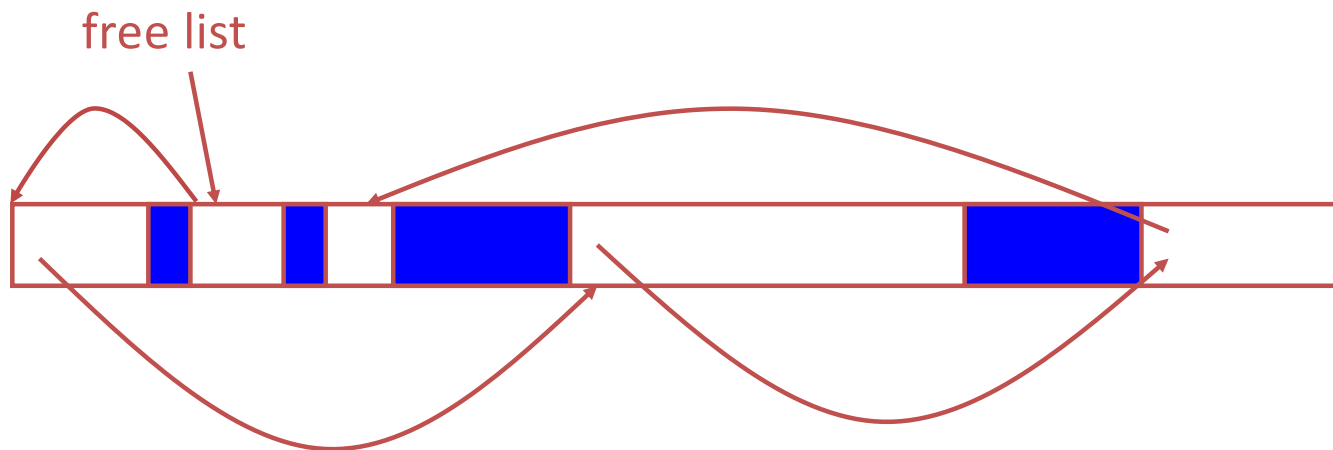
- Nicht (mehr) verwendete Speicherblöcke befinden sich in der “free list”
- `malloc`: sucht in der free list nach einem genug grossen Speicherblock
- `free`: platziert Speicherblock zum Anfang der free list



Explizite Speicherverwaltung: Details

Wie funktioniert malloc/free?

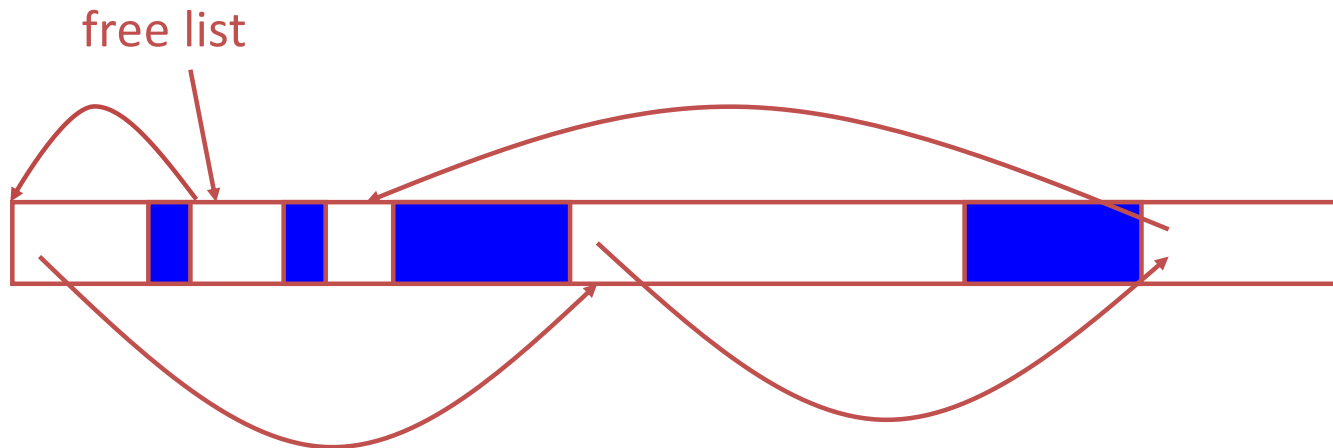
- Nicht (mehr) verwendete Speicherblöcke befinden sich in der “free list”
- `malloc`: sucht in der free list nach einem genug grossen Speicherblock
- `free`: platziert Speicherblock zum Anfang der free list



Explizite Speicherverwaltung: Details

Nachteile

- `malloc` is nicht für umsonst: Aufwand der Suche nach einem Block, der gross genug ist, kann signifikant sein
- Der Heap wird fragmentiert, während das Programm ausgeführt wird



Mögliche Lösungen

Mehrere free lists

- Eine free list für jede gegebene Blockgrösse
- Malloc und free sind beide $O(1)$
- Mögliches Problem: Liste mit Blöcken der Grösse 4 ist verbraucht, auch wenn Blöcke der Grösse 2 und 6 verfügbar ist

Blöcke sind Zweierpotenzen

- Blöcke werden aufgeteilt um richtige Grösse zu erreichen
- Bei Freigabe werden angrenzende Blöcke zusammengeschmolzen

Fragmentierung in jedem Fall vorhanden

- Verschwendeter Speicherplatz
- «No magic bullet»: Speicherverwaltung kostet immer was

Automatische Speicherverwaltung – wieso?

Programmieren mit expliziter Speicherverwaltung viel schwieriger ist als mit automatischer Speicherverwaltung

- Konstante Sorge wegen «Dangling Pointers»
 - Instabilität, Maintenance
- Es ist unmöglich ein sicheres System zu entwickeln
 - System gibt keine Garantien
- Programmieren mit Sprachen, die automatische Speicherverwaltung unterstützen, ist einfacher
- Unterliegendes Laufzeitsystem kann den Speicher immer noch explizit verwalten

Ansatz 2: Automatische Speicherverwaltung

Zentrale Frage:

Wie wird entschieden, welche Objekte Müll sind?

- (Ein Objekt im Programm ist Müll, wenn keine Berechnung im Programm dieses Objekt wieder verwendet.)

Übliche Lösung: Ein Objekt ist Müll, wenn es von den "Roots" aus nicht mehr erreichbar ist

- Roots = Register, Stack, globale statische Daten
 - Falls es vom Root aus zu einem Objekt keinen Pfad gibt, das Objekt kann nicht mehr im Programm verwendet werden und kann daher zurückgefordert werden.
- Zurückhaltende Approximation
 - Engl. «conservative approximation»

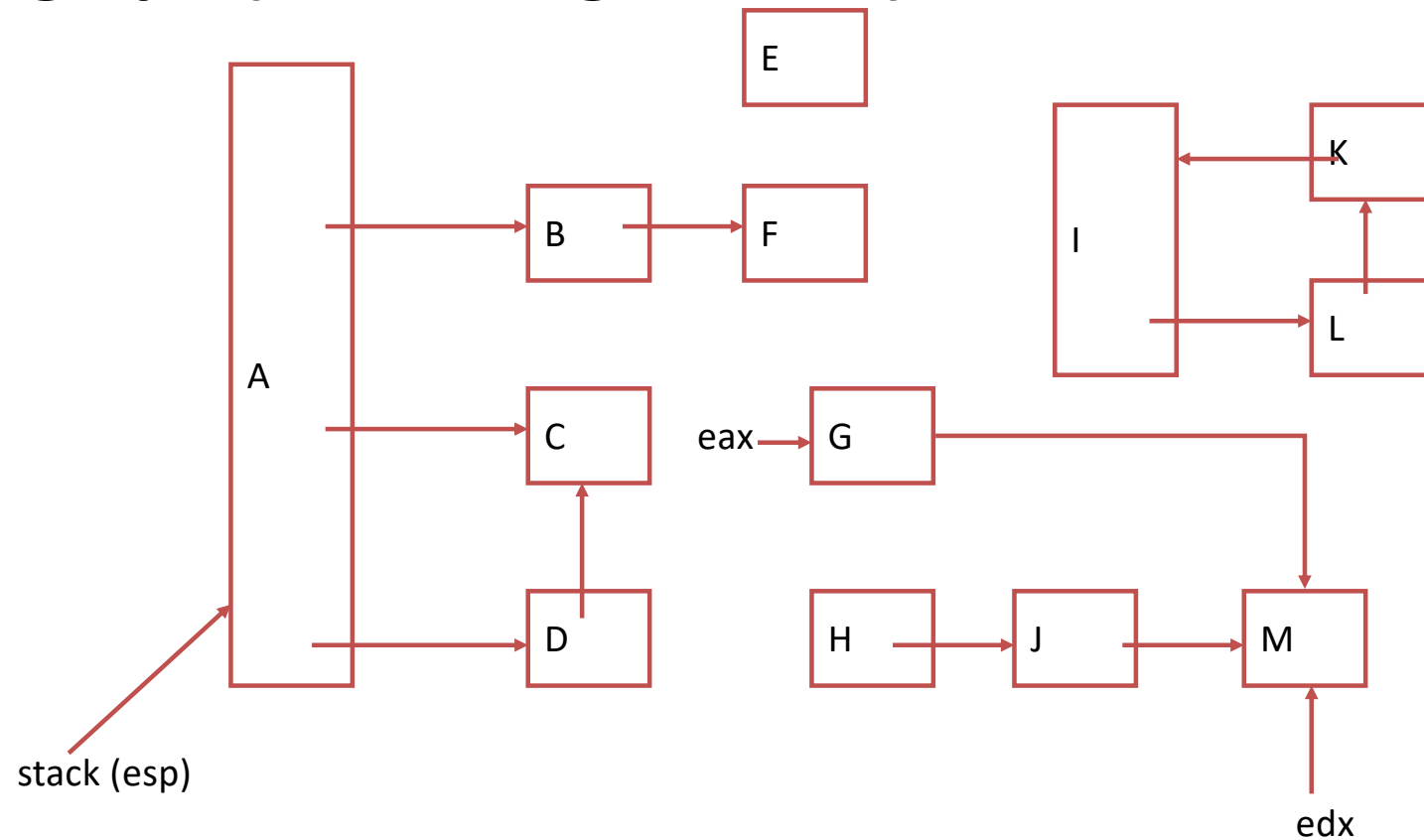
Ansatz 2: Automatische Speicherverwaltung (Forts.)

Es gibt verschiedene Ansätze um automatische Speicherverwaltung zu realisieren

Die meisten Differenzen sind bezüglich

- Wie wird entschieden, welche Objekte nicht erreichbar sind
- Wie werden (nicht) erreichbare Objekte behandelt

Objektgraph (eines Programmes)



Welche Objekte sind erreichbar (von den Roots aus)?

Diskussion: Wann kann GC passieren?

Beispielprogramm

```
class Foo {  
    public static void main(String args[]) {  
        Object v;  
        v = new Object();  
        System.out.println(v);  
        System.gc();  
    }  
}
```

Heute diskutierte Algorithmen

Mark & Sweep GC

Mark & Copy GC

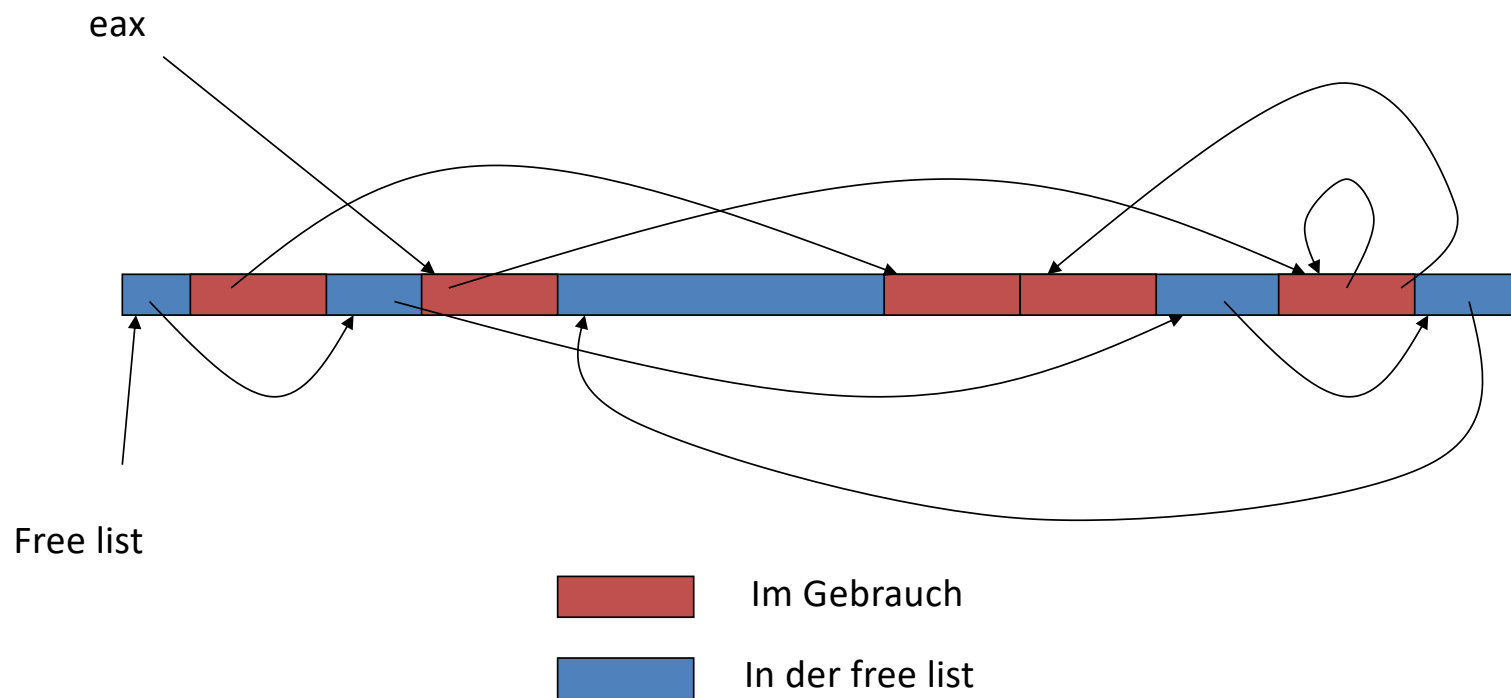
Mark & Compact GC

Mark & Sweep GC

Algorithmus besteht aus zwei Phasen

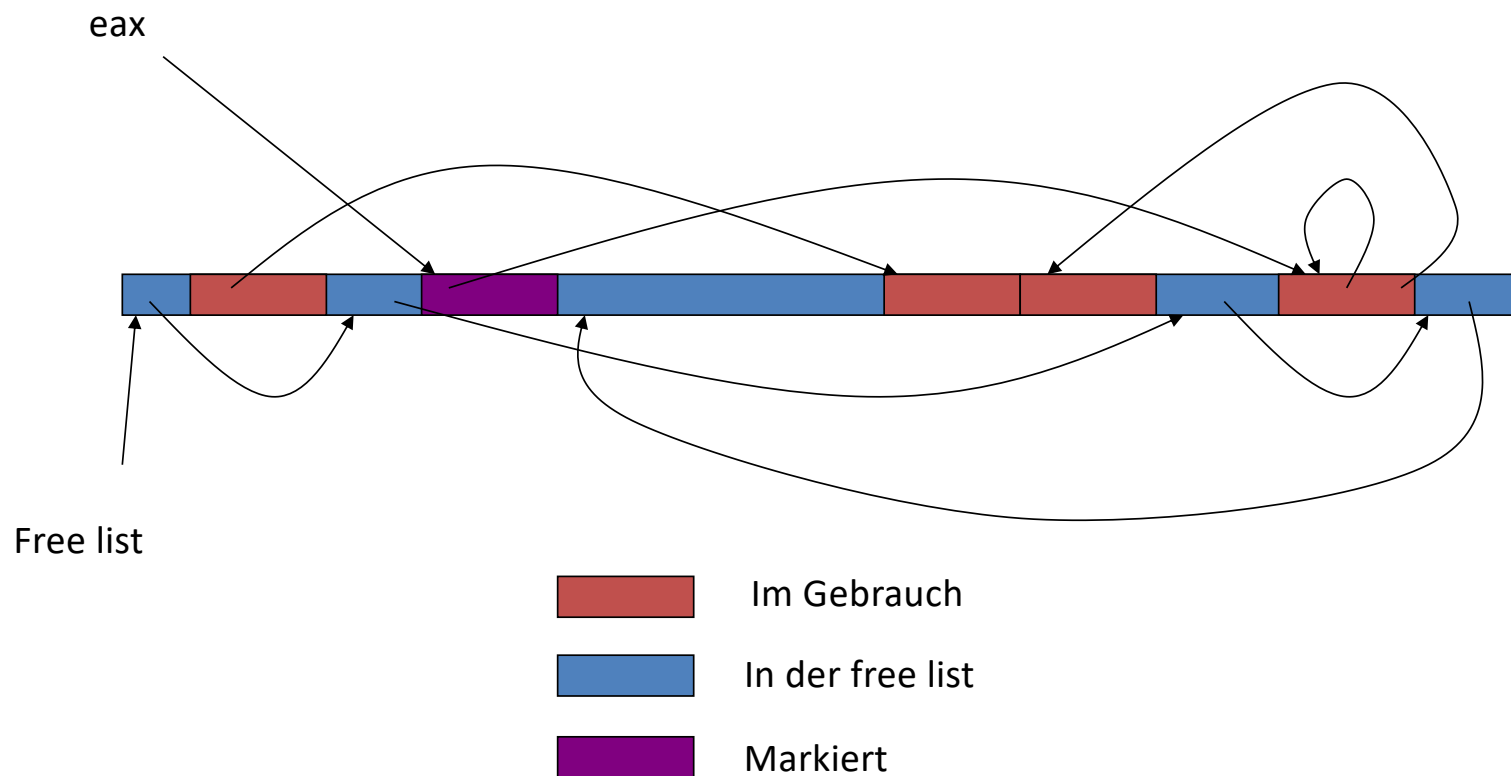
- **Mark:** Objektgraph wird "depth-first" durchquert und vom Root aus erreichbare Objekte werden markiert
- **Sweep:** Der ganze Heap wird durchquert, nicht markierte Objekte werden der free list zugefügt, die Markierung aller Objekte wird gelöscht

Mark & Sweep: Zeitlupe



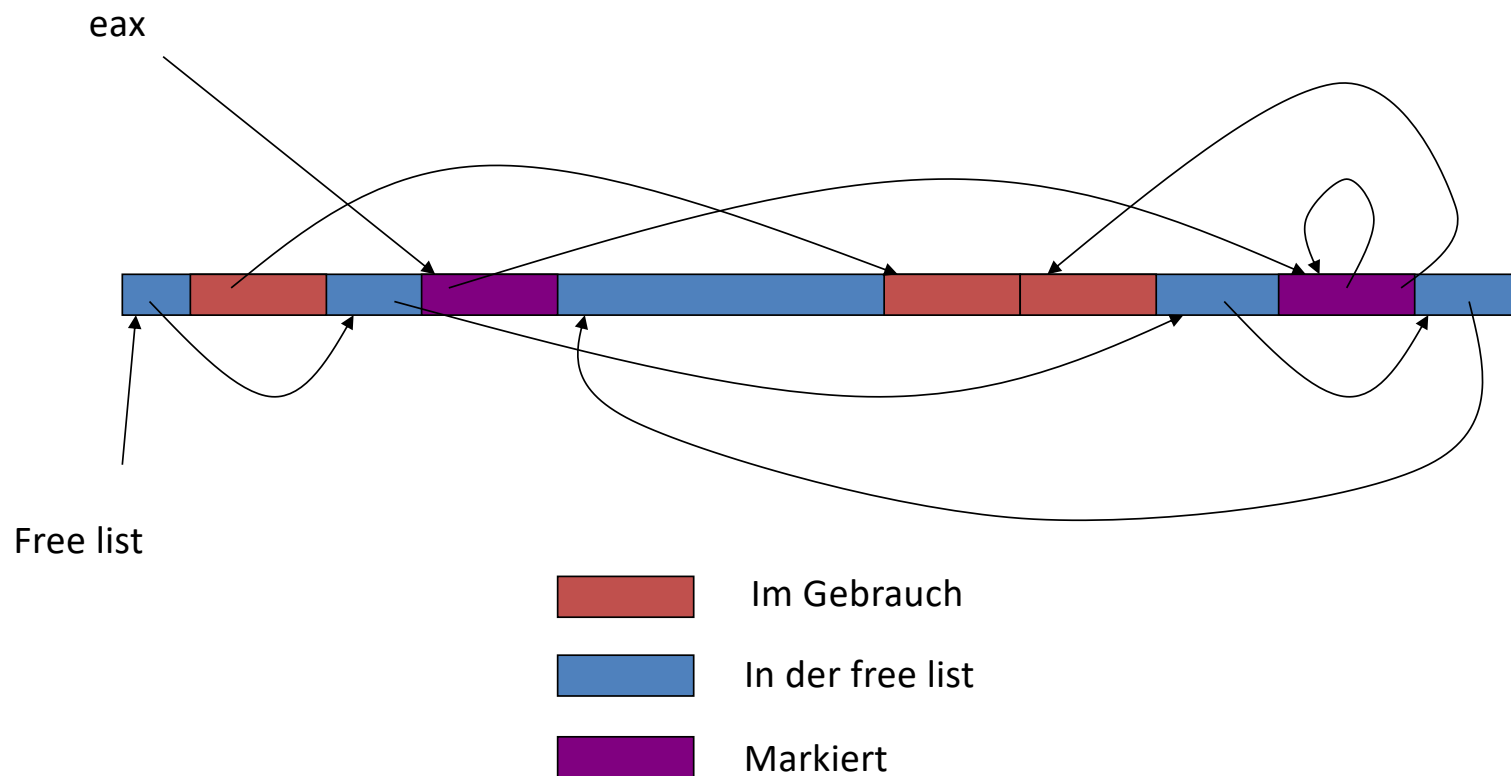
Mark & Sweep: Zeitlupe

Mark Phase: vom Root aus erreichbare Objekte werden markiert



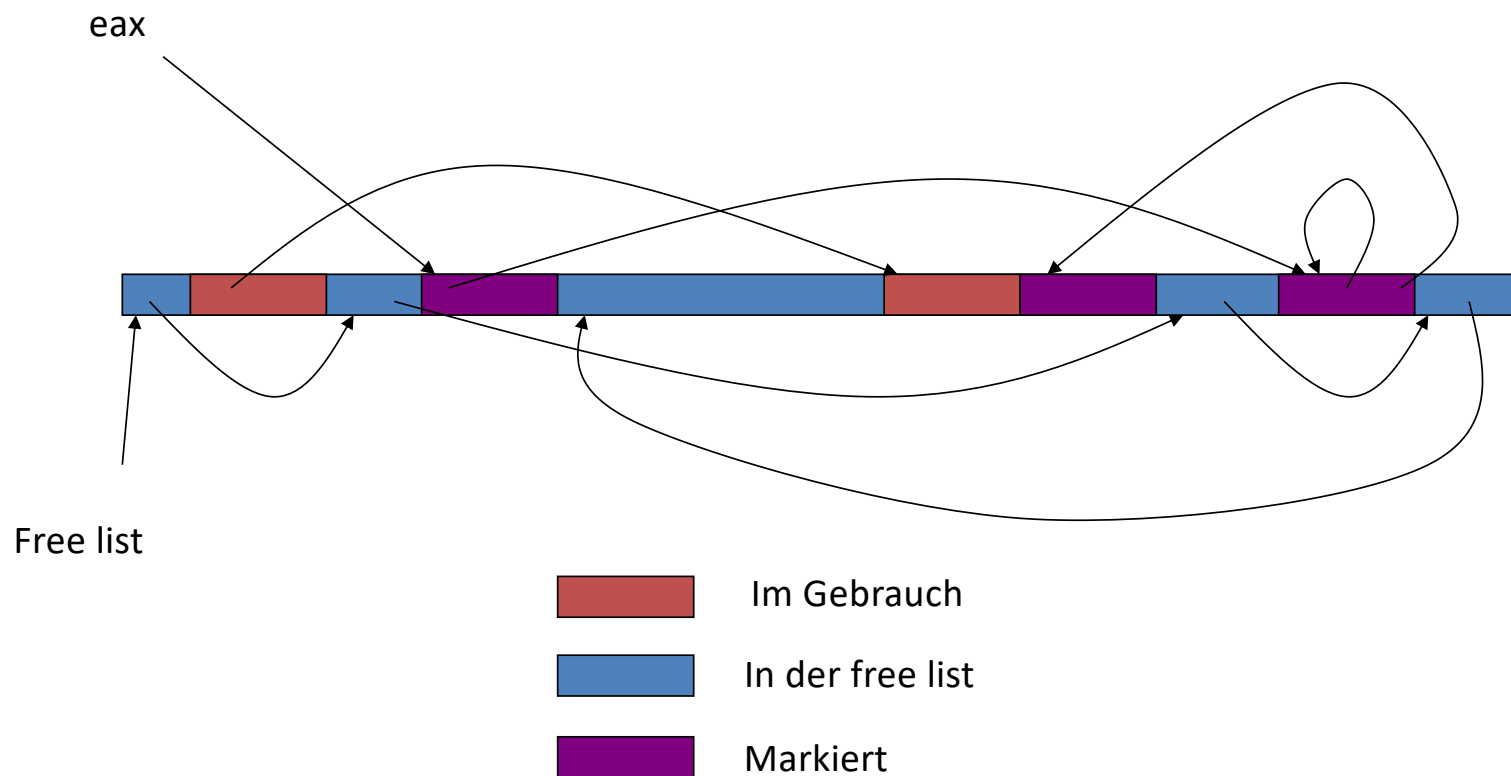
Mark & Sweep: Zeitlupe

Mark Phase: vom Root aus erreichbare Objekte werden markiert



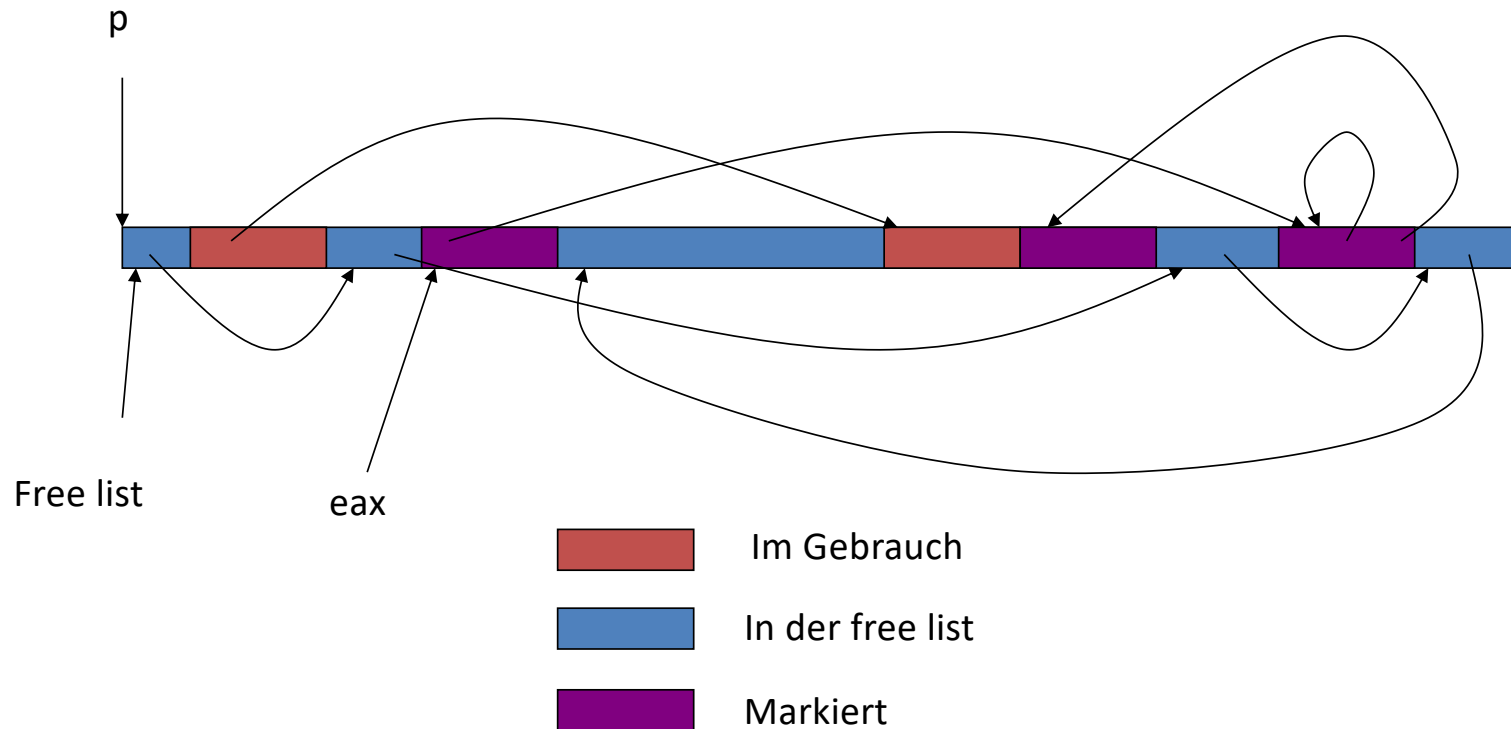
Mark & Sweep: Zeitlupe

Mark Phase: vom Root aus erreichbare Objekte werden markiert



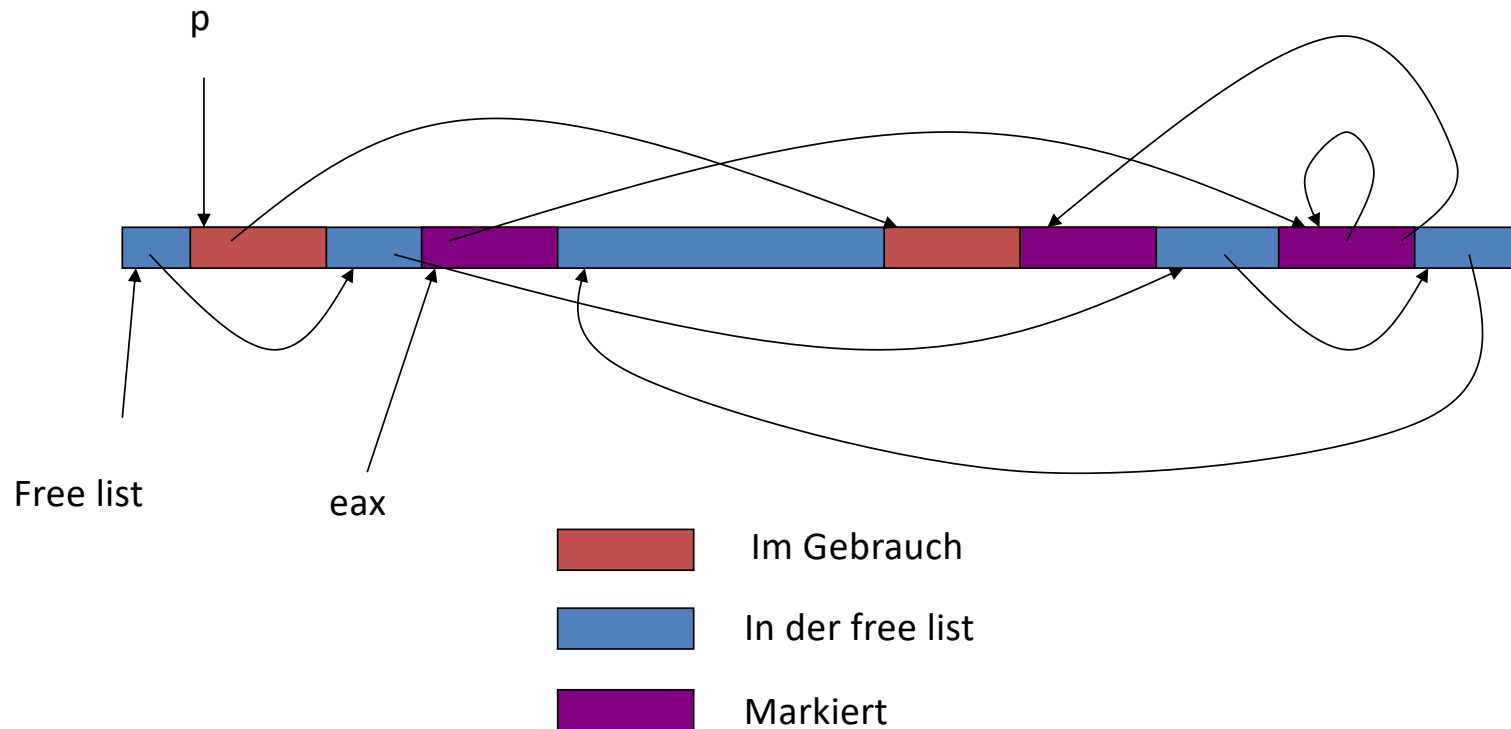
Mark & Sweep: Zeitlupe

Sweep Phase: Sweep Pointer p aufsetzen; Sweep starten



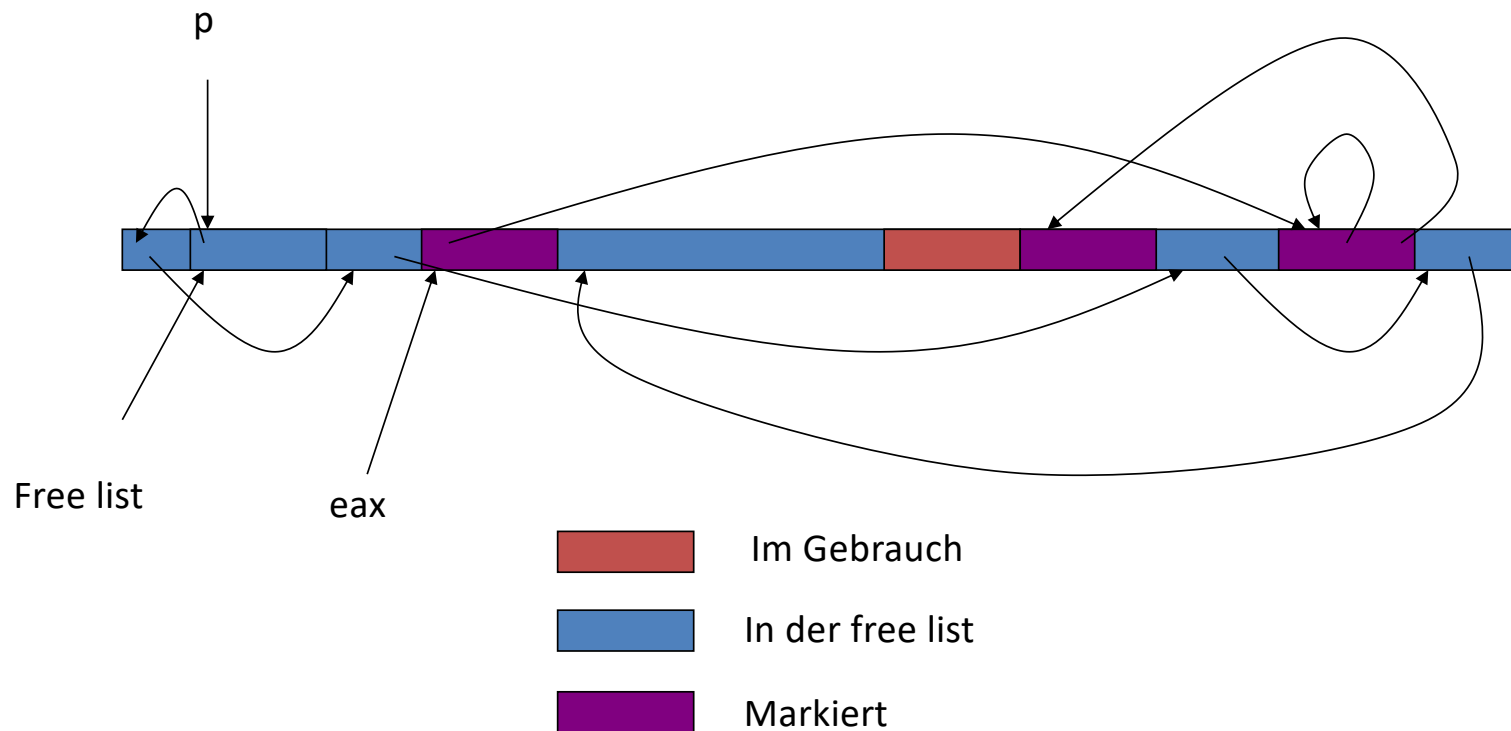
Mark & Sweep: Zeitlupe

Sweep Phase: nicht markierte Objekte der free list zufügen



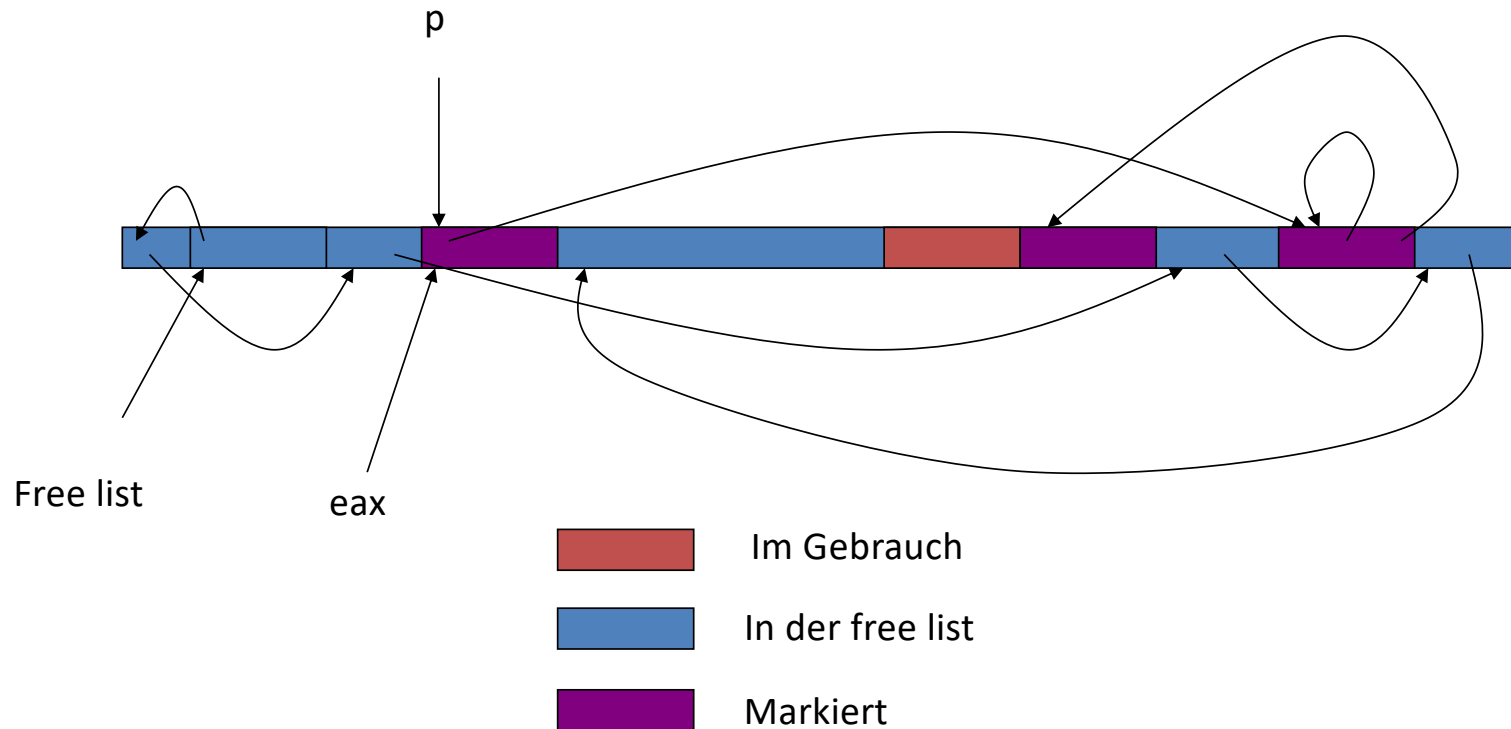
Mark & Sweep: Zeitlupe

Sweep Phase: nicht markierte Objekte der free list zufügen



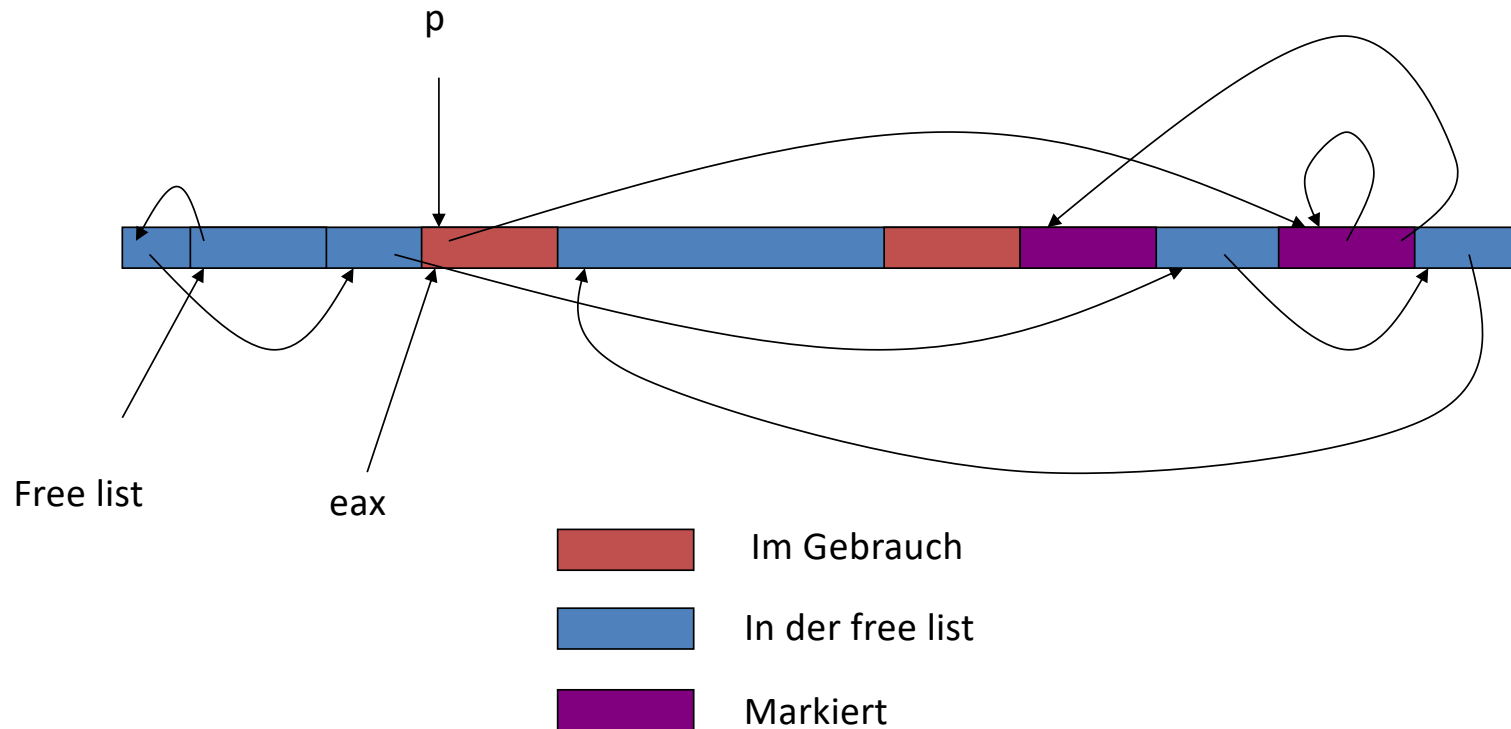
Mark & Sweep: Zeitlupe

Sweep Phase: nicht markierte Objekte der free list zufügen



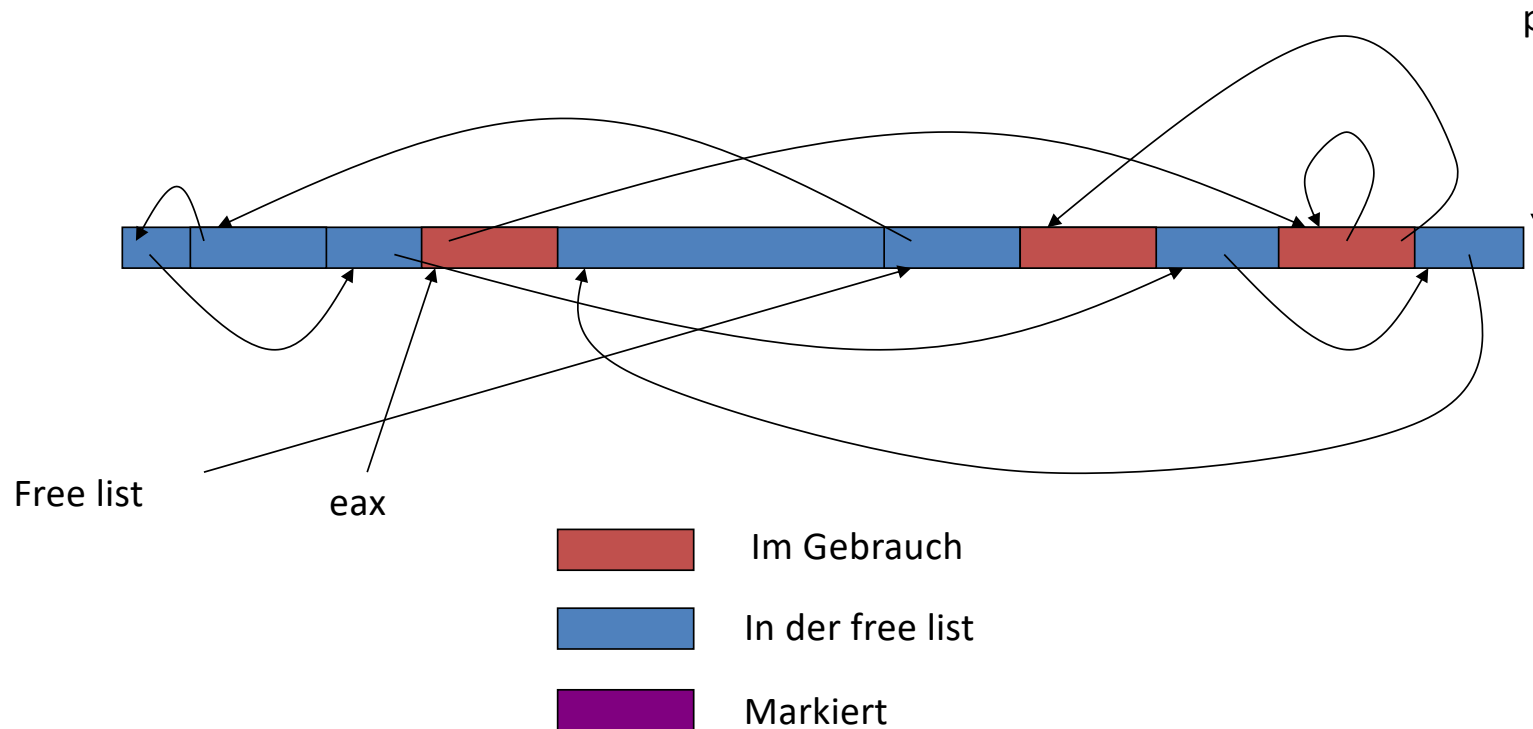
Mark & Sweep: Zeitlupe

Sweep Phase: nicht markierte Objekte der free list zufügen



Mark & Sweep: Zeitlupe

Sweep Phase: GC fertig, wenn Ende des Heaps erreicht wird; Ausführung des Programm kann wieder aufgenommen werden



Bemerkungen: Mark & Sweep GC

Vorteile

- GC wird «in situ» durchgeführt
- Kein Extra Speicherplatz nötig

Nachteile

- Fragmentierung kann ein Problem sein
- Programm muss während des GCs gestoppt werden
- Allokation kann langsam sein: Passender Block muss in der free list gesucht werden
- Sweep-Phase muss den ganzen Heap überqueren
 - Algorithmus kann noch optimiert werden

Mark & Copy

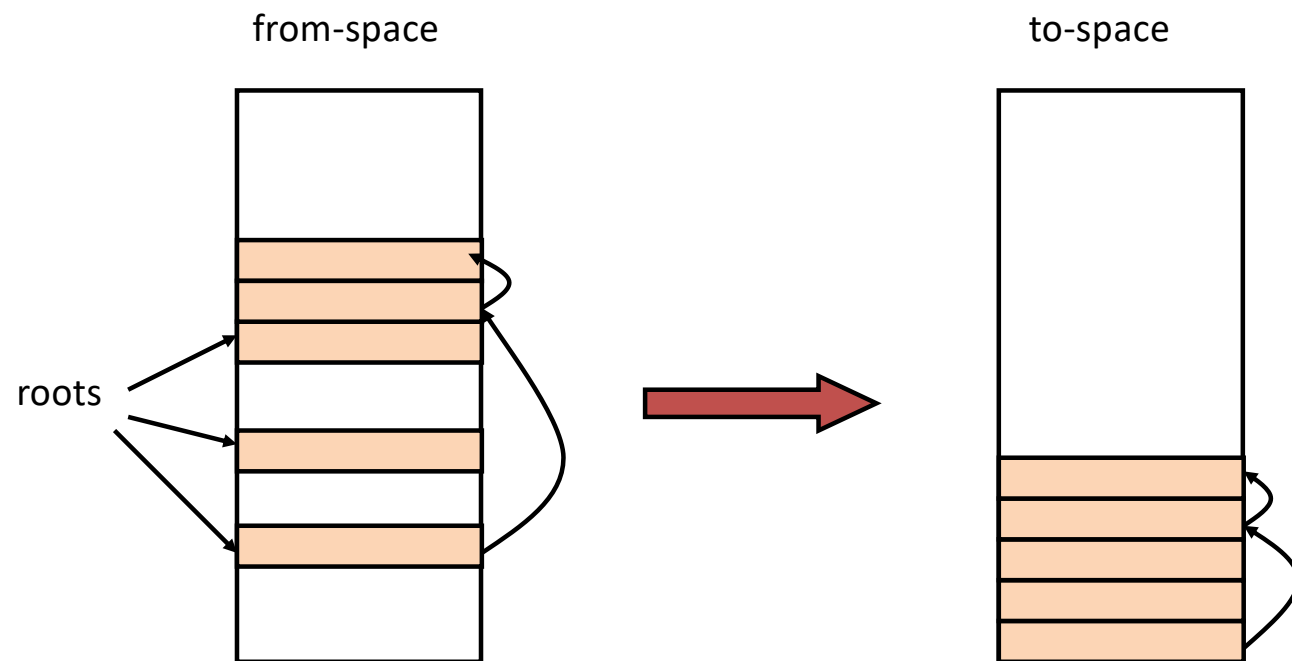
Idee: 2 Heaps werden verwendet

- Ein Heap (sog. from-space) wird vom Programm verwendet
- Der andere Heap (sog. to-space) nicht verwendet bis GC startet

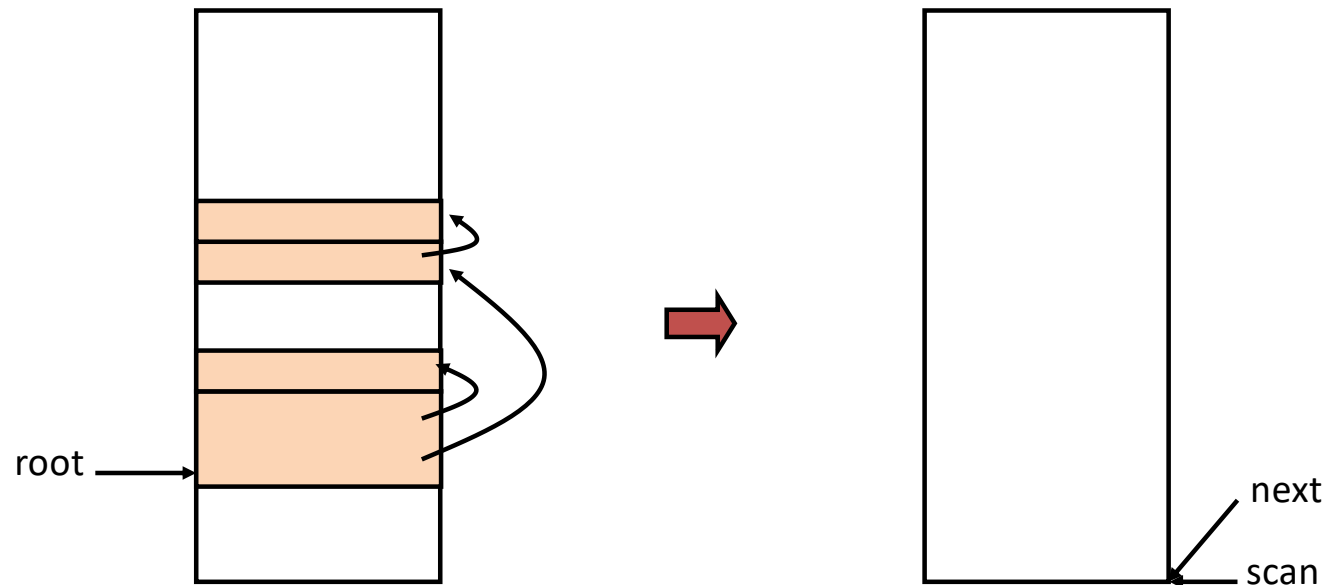
GC:

- Startet beim Root Set und traversiert den Objektgraphen
- Erreichbare Objekte werden vom from-space ins to-space kopiert
- Unerreichbare Objekte sind im from-space hinterlassen
- Die Rolle der Heaps wird gewechselt

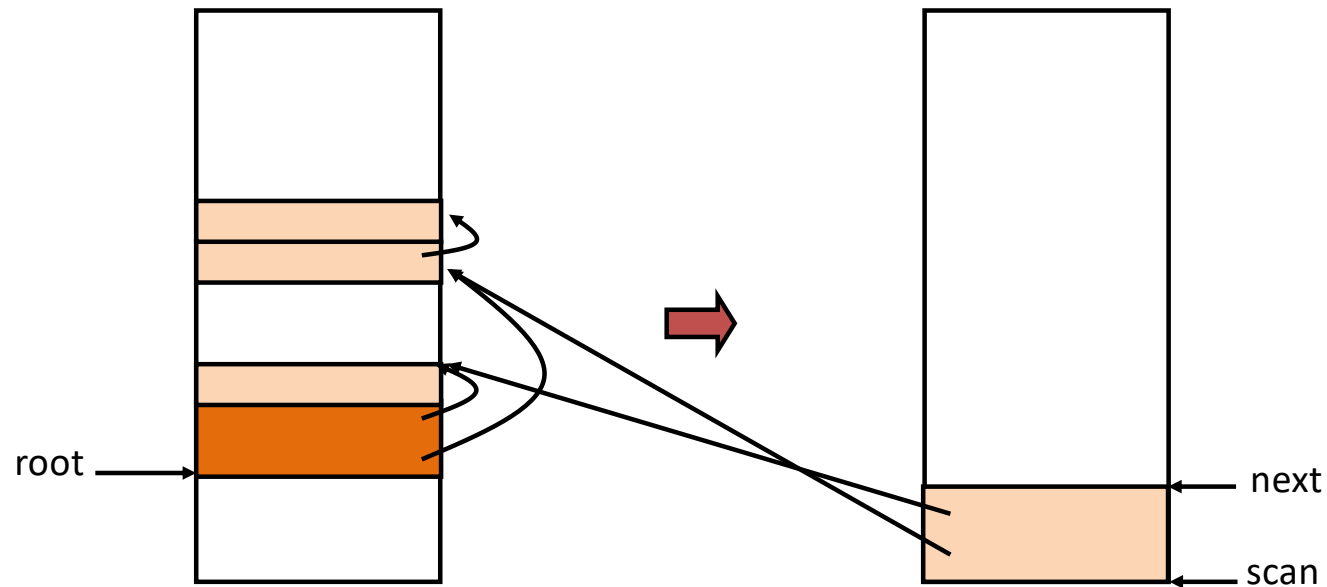
Mark & Copy



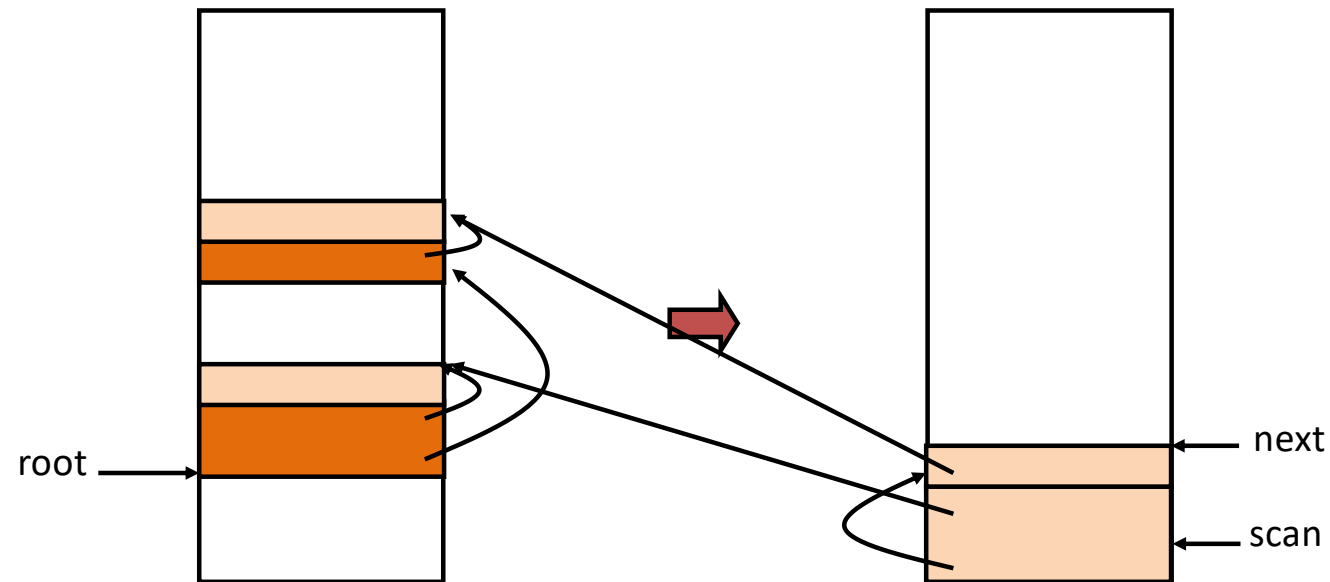
Mark & Copy: Zeitlupe



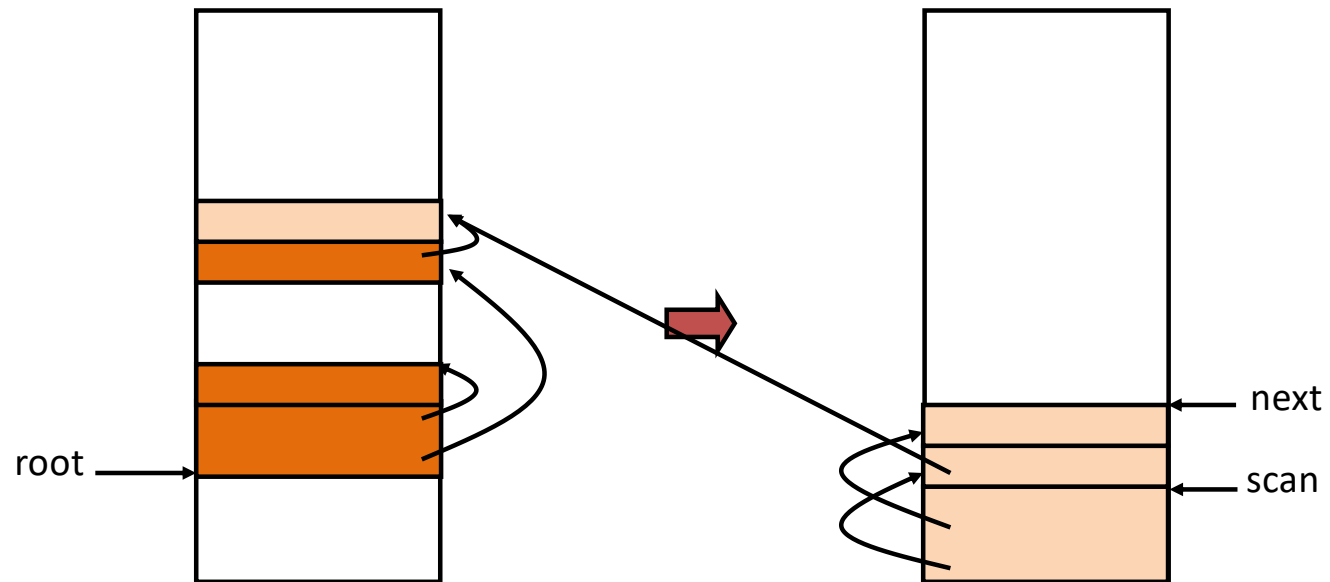
Mark & Copy: Zeitlupe



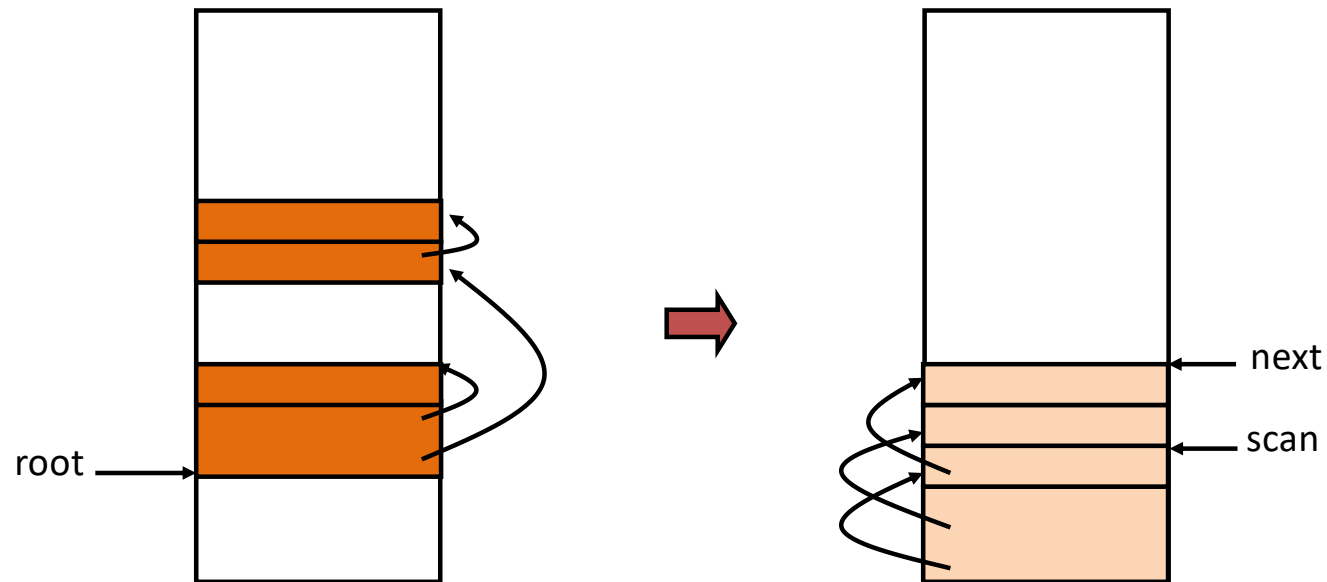
Mark & Copy: Zeitlupe



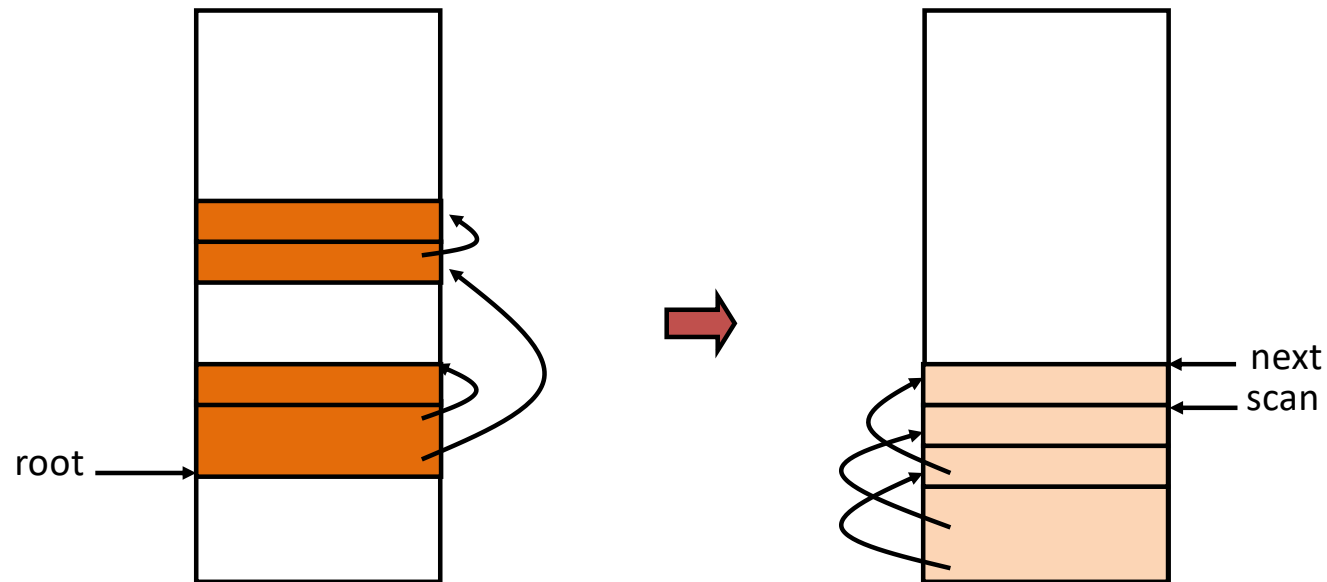
Mark & Copy: Zeitlupe



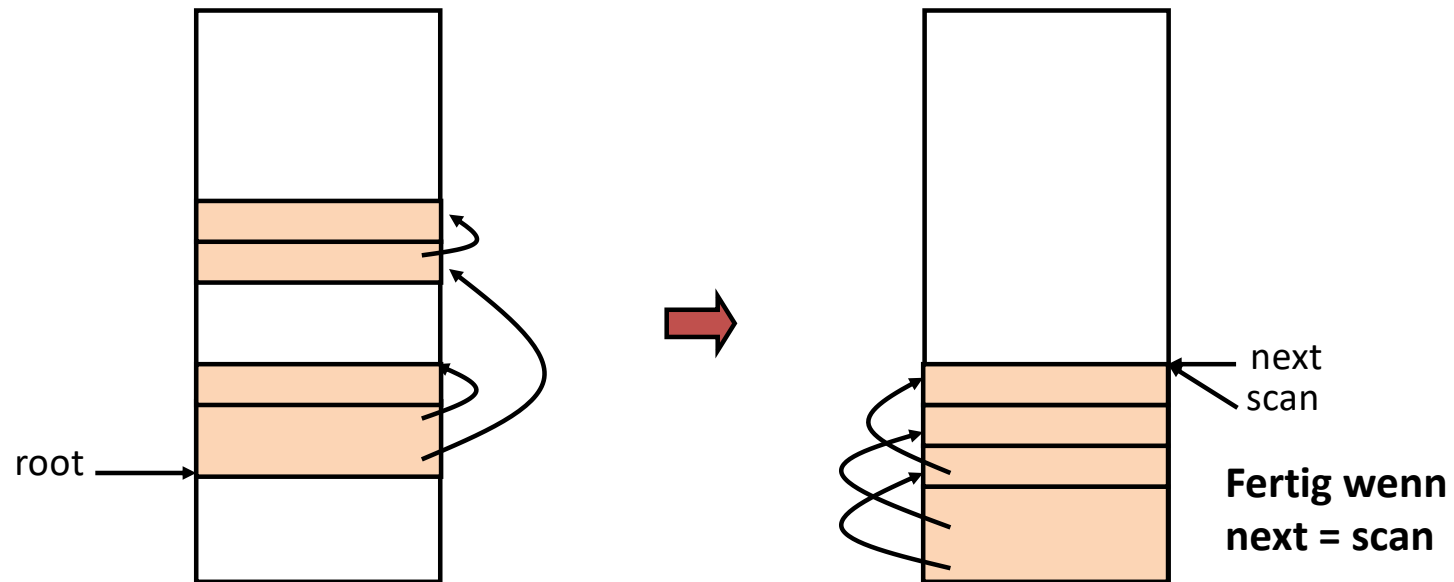
Mark & Copy: Zeitlupe



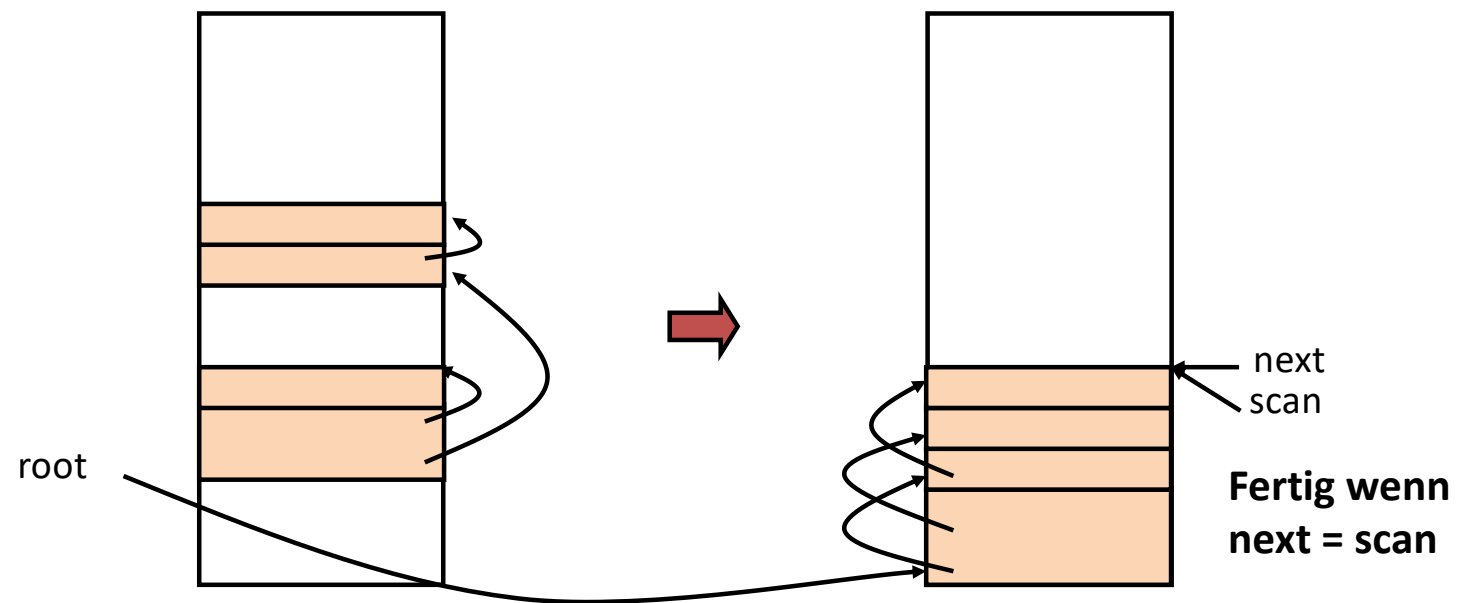
Mark & Copy: Zeitlupe



Mark & Copy: Zeitlupe



Mark & Copy: Zeitlupe



Bemerkungen (Mark & Copy)

Vorteile

- Einfach
- Eliminiert Fragmentierung
- Laufzeit proportional zur Anzahl erreichbaren Objekten
- Schnelle Allokation: Pointer wird mit Objektgröße inkrementiert

Nachteile

- Zusätzlicher Speicherplatz nötig
- Programm muss während des GCs gestoppt werden

Mark-Compact GC

Ähnlich wie Mark & Sweep

Unterschied: Nach der Mark Phase werden Objekte zum Anfang des Heaps umgelegt

Vorteile

- Keine Fragmentierung
- In-situ: Kein zweiter Heap nötig


Nachteile

- Zusätzliche Traversierung des Heaps nötig (3 Traversierungen insgesamt)
- Programm muss während des GCs gestoppt werden

Diskussion:

Vergleich Speicherverwaltungsmethoden

Relevante Kriterien?



Algorithmus			
Mark & Sweep GC			
Mark & Copy GC			
Mark & Compact GC			

Garbage Collection

- Was ist GC?
- Wie beeinflusst die Performanz von GC?
 - Komplexität des GC-Algorithmus (Beispiele)
 - Implementierung des Algorithms (konstante Faktoren)
 - Generational GC
 - Serielle, parallele und nebenläufige GC
- **Wie beeinflusst GC die Performanz von Applikationen**
 - Wichtige Performanzmerkmale
 - Performanzerhöhung durch GC Tuning

Generational GC

Empirische Beobachtung 1

Wenn ein Objekt eine lange Zeit erreichbar war, wird es wahrscheinlich erreichbar bleiben

Empirische Beobachtung 2

In vielen Programmen sterben die meisten Objekte jung

Idee 1: Arbeit wird erspart, wenn junge Objekte häufig und alte Objekte selten gescanned werden.

Idee 2: Für alte Objekte kann mehr Aufwand gewidmet werden.

Generational GC in der HotSpot JVM

Bemerkung: Bisher wurde GC unabhängig von einer konkreten Implementierung betrachtet

Ab jetzt diskutieren wir eine konkrete Implementierung (Java HotSpot 8)

Generational GC in der HotSpot JVM

Heap Layout



Minor GC

- Nur young Generation wird collected
- Mark and Copy Algorithmus

Major GC

- Young und old Generation wird collected
- Mark and Compact Algorithmus (für Old Generation)

Ansätze

Für Steigerung des Durchsatzes: **Paralleler GC**

- GC Algorithmus parallelisiert

Für Reduzierung der Pausenzeiten : **Nebenläufiger GC**

- GC Algorithmus (oder Teile davon) läuft gleichzeitig mit dem Benutzerprogramm

Annahmen für Beispiel

Applikation

- Parallel mit zwei Threads
- Perfekt parallelisiert

Hardware

- Zwei Prozessorkernen

Serieller vs. Paralleler vs. Nebenläufiger GC

Serieller GC



Paralleler GC



Nebenläufiger GC



Zeit

Fragen

Bei welcher GC-Variante ist der Durchsatz der Applikation am besten?

Bei welcher GC-Variante sind die Pausenzeiten der Applikation am niedrigsten?

HotSpot GCs: Übersicht

Serial GC

- Young Generation: Serieller Mark & Copy
- Old Generation: Serieller Mark & Compact

Parallel GC

- Young Generation: Paralleler Mark & Copy
- Old Generation: Paralleler Mark & Compact

Nebenläufiger GC: Concurrent Mark and Sweep (CMS)

- Young Generation: Paralleler Mark & Copy
- Old Generation: Mostly Concurrent Mark & Sweep

GC Tuning

Wiederholung: Was sind aus Applikationssicht wichtige Performanzmerkmale?

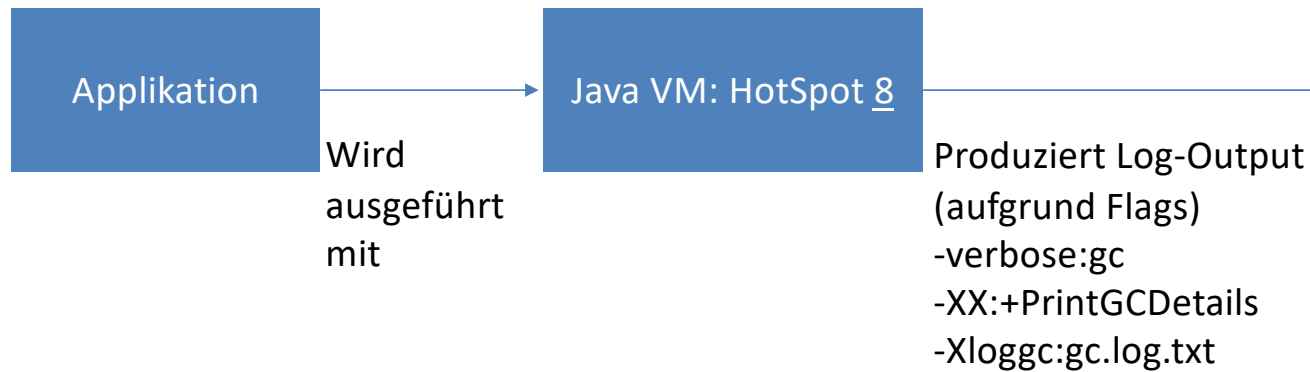
- Durchsatz
- Reaktionsfähigkeit

Auch wenn der für das Ziel entsprechende GC-Implementierung eingeschaltet wurde, ist die Performanz manchmal nicht gut genug

- Problem kann manchmal durch einen manuellen Eingriff gelöst werden = **GC Tuning**

GC Tuning

Setup



Beispieloutput

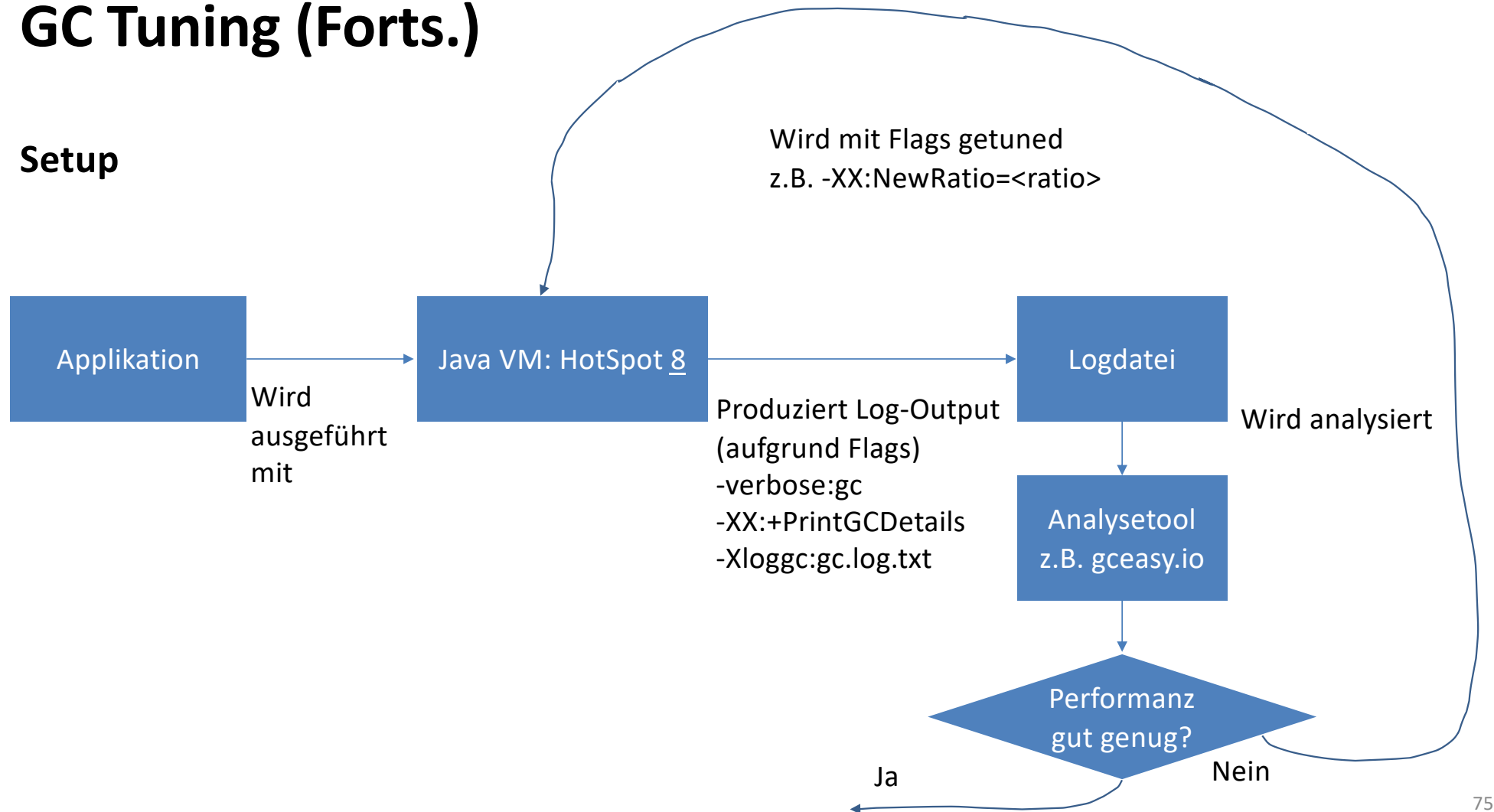
```
Java HotSpot(TM) 64-Bit Server VM (25.141-b15) for bsd-amd64 JRE (1.8.0_141-b15), built on Jul 12 2017 04:35:23 by "java_re" with gcc 4.2.1 (Based on Apple Inc. build 5658) (LLVM build 2336.11.00)
Memory: 4k page, physical 16777216k(1248276k free)
```

```
/proc/meminfo:
```

```
CommandLine flags: -XX:InitialHeapSize=33554432 -XX:MaxHeapSize=33554432 -XX:NewRatio=1 -XX:+PrintGC -XX:+PrintGCDetails -XX:+PrintGCTimeStamps -XX:SurvivorRatio=1 -XX:+UseCompressedClassPointers -XX:+UseCompressedOops -XX:+UseParallelGC
0.120: [GC (Allocation Failure) [PSYoungGen: 6143K->5106K(11264K)] 6143K->5794K(27648K), 0.0030349 secs] [Times: user=0.01 sys=0.01, real=0.00 secs]
0.167: [GC (Allocation Failure) [PSYoungGen: 11239K->3729K(11264K)] 11927K->4425K(27648K), 0.0032820 secs] [Times: user=0.00 sys=0.01, real=0.00 secs]
0.171: [GC (Allocation Failure) [PSYoungGen: 9865K->1648K(11264K)] 10561K->2344K(27648K), 0.0006056 secs] [Times: user=0.01 sys=0.00, real=0.00 secs]
0.172: [GC (Allocation Failure) [PSYoungGen: 7786K->5090K(11264K)] 8482K->8475K(27648K), 0.0022283 secs] [Times: user=0.00 sys=0.01, real=0.00 secs]
0.218: [GC (Allocation Failure) [PSYoungGen: 11229K->5106K(11264K)] 14615K->9020K(27648K), 0.0012928 secs] [Times: user=0.01 sys=0.01, real=0.00 secs]
0.267: [GC (Allocation Failure) [PSYoungGen: 11246K->3553K(11264K)] 15160K->7467K(27648K), 0.0011604 secs] [Times: user=0.00 sys=0.00, real=0.00 secs]
0.270: [GC (Allocation Failure) [PSYoungGen: 9693K->1152K(11264K)] 13607K->5346K(27648K), 0.0009220 secs] [Times: user=0.01 sys=0.00, real=0.00 secs]
0.272: [GC (Allocation Failure) [PSYoungGen: 7293K->5090K(11264K)] 11487K->11469K(27648K), 0.0019212 secs] [Times: user=0.00 sys=0.00, real=0.00 secs]
0.316: [GC (Allocation Failure) [PSYoungGen: 11231K->5090K(11264K)] 17610K->11621K(27648K), 0.0013460 secs] [Times: user=0.01 sys=0.00, real=0.00 secs]
0.370: [GC (Allocation Failure) [PSYoungGen: 11216K->2080K(11264K)] 17747K->8628K(27648K), 0.0006940 secs] [Times: user=0.00 sys=0.00, real=0.00 secs]
0.372: [GC (Allocation Failure) [PSYoungGen: 8222K->5090K(11264K)] 14769K->14671K(27648K), 0.0026775 secs] [Times: user=0.01 sys=0.01, real=0.00 secs]
0.375: [GC (Allocation Failure) [PSYoungGen: 11231K->5090K(11264K)] 20812K->15663K(27648K), 0.0014235 secs] [Times: user=0.01 sys=0.01, real=0.00 secs]
0.419: [GC (Allocation Failure) [PSYoungGen: 11231K->4001K(11264K)] 21804K->14590K(27648K), 0.0009612 secs] [Times: user=0.00 sys=0.00, real=0.00 secs]
0.467: [GC (Allocation Failure) [PSYoungGen: 10143K->1920K(11264K)] 20732K->12525K(27648K), 0.0006870 secs] [Times: user=0.00 sys=0.00, real=0.00 secs]
0.468: [GC (Allocation Failure) [PSYoungGen: 8062K->5090K(11264K)] 18667K->18592K(27648K), 0.0026388 secs] [Times: user=0.00 sys=0.01, real=0.00 secs]
0.471: [Full GC (Ergonomics) [PSYoungGen: 5090K->0K(11264K)] [ParOldGen: 13502K->8264K(16384K)] 18592K->8264K(27648K), [Metaspace: 2682K->2682K(1056768K)], 0.0040828 secs] [Times: user=0.02 sys=0.00, real=0.01 secs]
```

GC Tuning (Forts.)

Setup



Übung

1. Testprogramm kompilieren: `javac Test.java`

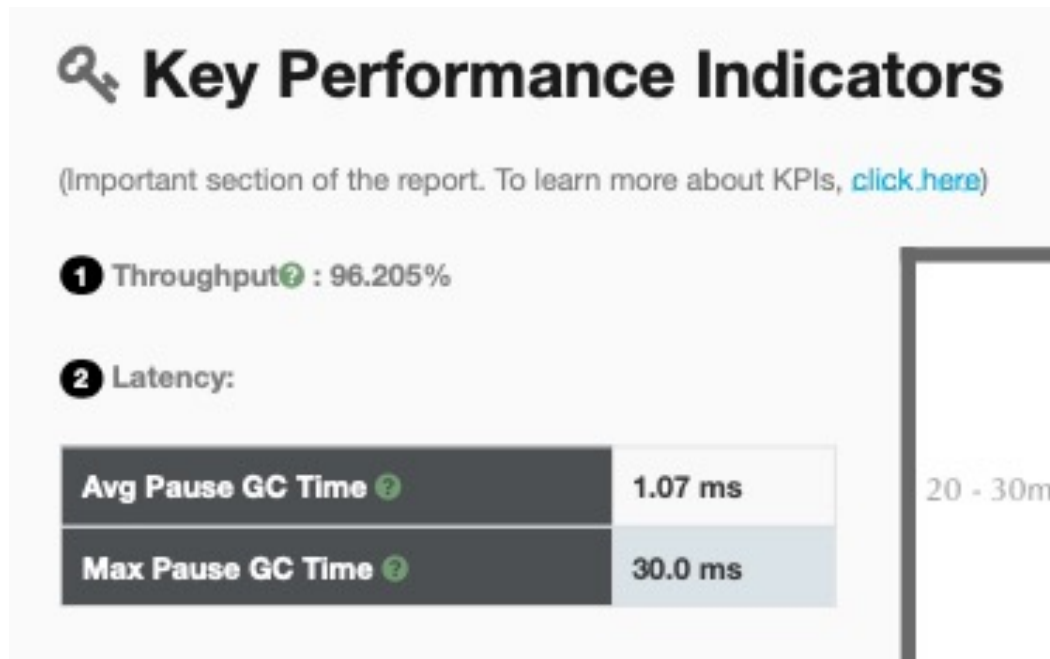
2. Testprogramm mit reduzierter Heapgrösse ausführen

- `java -Xmx64M -verbose:gc -XX:+PrintGCDetails -Xloggc:gc-64m-default.log.txt Test`
- Frage 1: Was ist der Durchsatz und die maximale Pausenlänge bei dieser Ausführung?

3. Testprogramm mit Custom-Flags ausführen

- `java -Xmx64M -verbose:gc -XX:+PrintGCDetails -XX:NewRatio=1 -XX:SurvivorRatio=8 -Xloggc:gc-64m-NR1-SR8.log.txt Test`
- Frage 2: Was bewirken die Flags `NewRatio` und `SurvivorRatio`? Hint: `JSGCT.pdf`
- Frage 3: Was ist der Durchsatz und die maximale Pausenlänge bei dieser Ausführung?
- Frage 4: Ist es durch die Verwendung der Flags `-XX:GCTimeRatio` und `-XX:MaxGCPauseMillis` einen höheren Durchsatz bzw. niedrigere maximale Pausenzeit als bei Frage 2 und 3 zu erreichen?

Frage 1: Was ist der Durchsatz und die maximale Pausenlänge bei der Ausführung -Xmx64M?



Frage 2: Was bewirken die Flags NewRatio und SurvivorRatio?

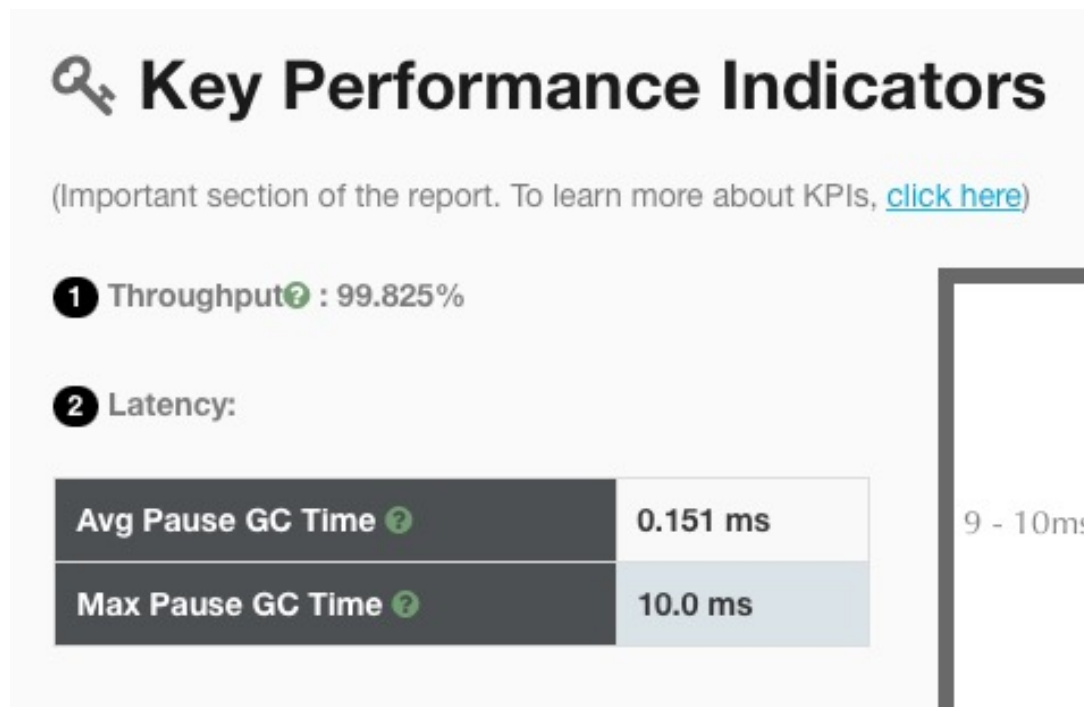
-Xmx64M



-Xmx64M -verbose:gc -XX:+PrintGCDetails -XX:NewRatio=1 -XX:SurvivorRatio=8



Frage 3: Was ist der Durchsatz und die maximale Pausenlänge der Ausführung?



Diskussion

**Ist GC Tuning einfach oder eher schwierig? (Denken Sie auch an reelle Applikationen)
Wieso?**

Kommandozeilen – Beispiele

```
java -Xmx12g -XX:MaxPermSize=64M -XX:PermSize=32M -XX:MaxNewSize=2g  
-XX:NewSize=1g -XX:SurvivorRatio=128 -XX:+UseParNewGC  
-XX:+UseConcMarkSweepGC -XX:MaxTenuringThreshold=0  
-XX:CMSInitiatingOccupancyFraction=60 -XX:+CMSParallelRemarkEnabled  
-XX:+UseCMSInitiatingOccupancyOnly -XX:ParallelGCThreads=12  
-XX:LargePageSizeInBytes=256m ...
```

```
java -Xms8g -Xmx8g -Xmn2g -XX:PermSize=64M -XX:MaxPermSize=256M  
-XX:-OmitStackTraceInFastThrow -XX:SurvivorRatio=2 -XX:-UseAdaptiveSizePolicy  
-XX:+UseConcMarkSweepGC -XX:+CMSConcurrentMTEnabled  
-XX:+CMSParallelRemarkEnabled -XX:+CMSParallelSurvivorRemarkEnabled  
-XX:CMSMaxAbortablePrecleanTime=10000 -XX:+UseCMSInitiatingOccupancyOnly  
-XX:CMSInitiatingOccupancyFraction=63 -XX:+UseParNewGC -Xnoclassgc ...
```

Flags

java -XX:+PrintFlagsFinal | grep "GC\|CMS\|G1"
169

```
uintx AdaptiveSizeMajorGCDecayTimeScale      = 10           {product}
uintx AutoGCSelectPauseMillis                 = 5000          {product}
bool   BindGCTaskThreadsToCPUs                 = false         {product}
bool   CMSAbortSemantics                       = false         {product}
uintx  CMSAbortablePrecleanMinWorkPerIteration = 100           {product}
intx   CMSAbortablePrecleanWaitMillis          = 100           {manageable}
uintx  CMSBitMapYieldQuantum                   = 10485760      {product}
uintx  CMSBootstrapOccupancy                   = 50            {product}
...
```

Frage

Können wir Applikationseigenschaften festhalten um GC zu lenken?

- Rate der Allokierungen (engl. allocation rate)
- Rate der Mutationen (engl. mutation rate)
- ...

Ohne messbare Applikationseigenschaften: Experimentieren

If the heap grows to its maximum size and the throughput goal isn't being met, then the maximum heap size is too small for the throughput goal. Set the maximum heap size to a value that's close to the total physical memory on the platform, but doesn't cause swapping of the application. Execute the application again. If the throughput goal still isn't met, then the goal for the application time is too high for the available memory on the platform.

JSGCT.pdf (HotSpot Virtual Machine Garbage Collection Tuning Guide)

Praxis

Manchmal muss man mit den zur Verfügung stehenden Werkzeugen was machen...

Empfehlung(en) für Tuning

- Sinnvolle und systematische Experimente
- Genug Zeit einplanen
- ...

Limiten der GC-Algorithmen gelten

- Stop-the-world kann bei allen in GC-Implementierungen in der Oracle JVM vorkommen

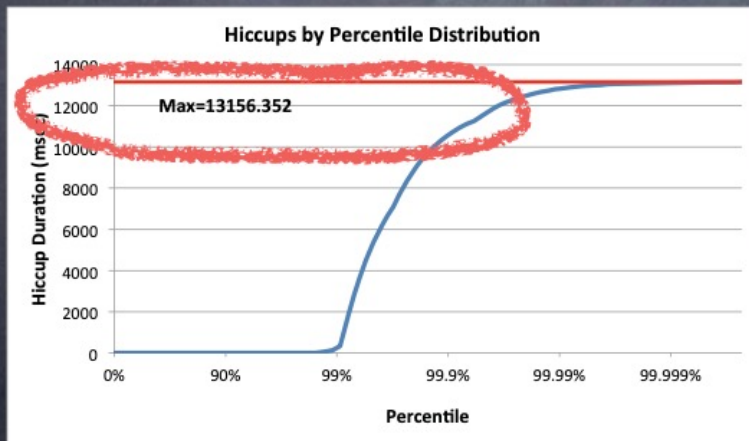
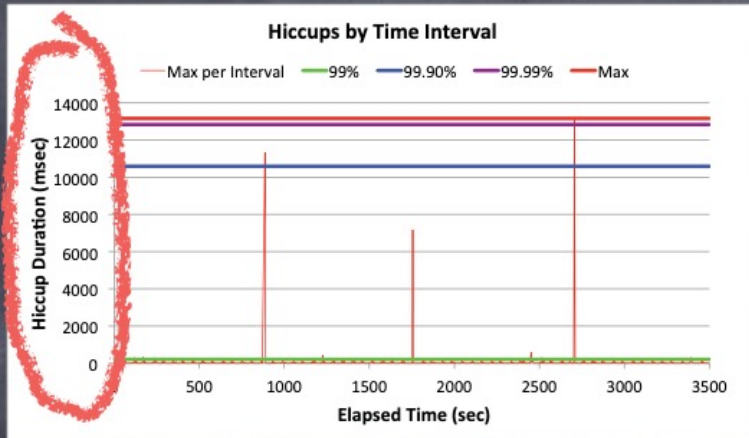
Neue GC-Implementierungen mit niedrigeren Pausenzeiten

- Azul Zing VM C4 – Continuously Concurrent Compacting Collector
- Oracle JVM Shenandoah GC – ultra-low pause time garbage collector
- Oracle JVM ZGC – scalable low latency garbage collector

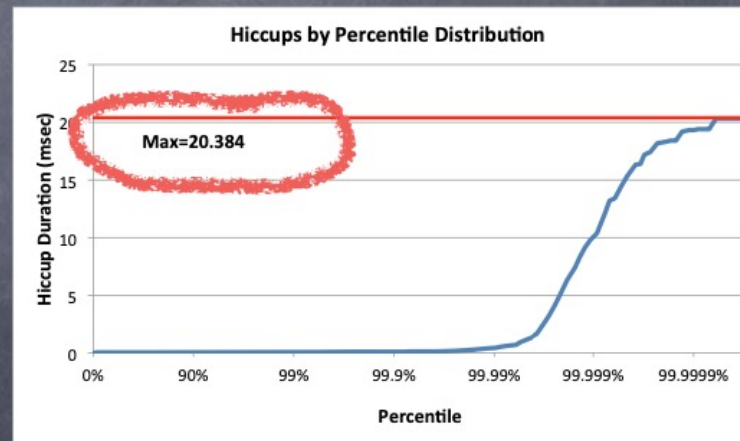
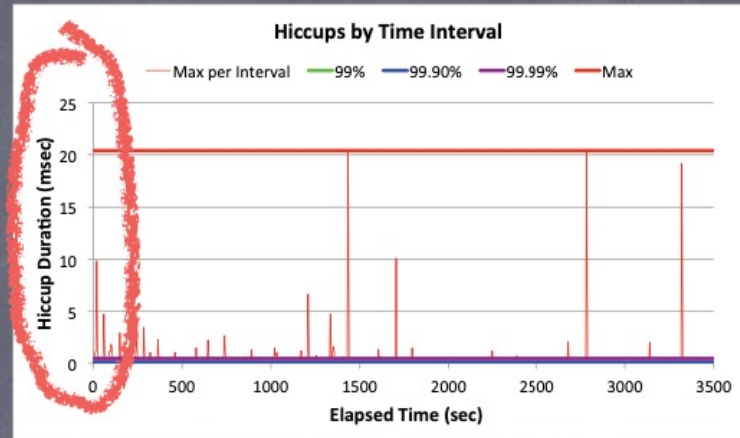
Azul C4

Die folgende Folie ist von Gil Tene (Azul) übernommen worden

Oracle HotSpot CMS, 1GB in an 8GB heap



Zing 5, 1GB in an 8GB heap



Oracle ZGC

Empfohlene Bibliographie

- Gute Zusammenfassung: <https://www.youtube.com/watch?v=88E86quLmQA> (39 Minuten)
- Details: <https://wiki.openjdk.java.net/display/zgc/Main>

Garbage Collection

- **Was ist GC?**
- **Wie beeinflusst die Performanz von GC?**
 - Komplexität des GC-Algorithmus (Beispiele)
 - Implementierung des Algorithmus (konstante Faktoren)
 - Generational GC
 - Serielle, parallele und nebenläufige GC
- **Wie beeinflusst GC die Performanz von Applikationen**
 - Wichtige Performanzmerkmale
 - Performanzerhöhung durch GC Tuning