Dynamische Speicherverwaltung

- Sie wissen, wie der Speicher in Programmen verwendet wird
- Sie wissen, was ein Heap (eine Halde) ist
- Sie kennen die Aufgaben des Speicherverwalters
- Sie wissen, wie die automatische Speicherfreigabe funktioniert
- Sie kennen mehrere Verfahren und deren Vor- und Nachteile
- Sie wissen, was Weak References und Finalizer sind und können damit umgehen

Umgang mit dem Hauptspeicher

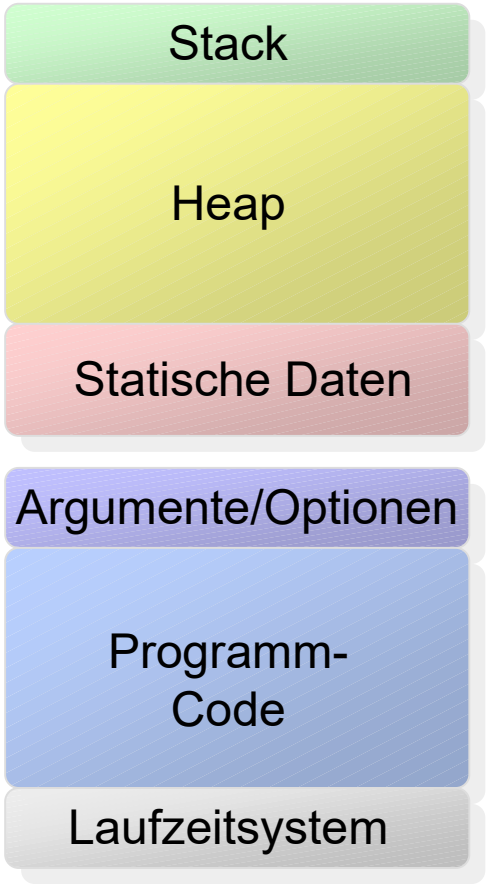
Dynamische Speicherverwaltung

School of Engineering

- Der Umgang mit dem dynamischen Speicher (Heap) hat früher bis zu 40% der Entwicklungszeit verursacht (inkl. Fehlersuche).
- Der Umgang mit dem dynamischen Speicher ist für die Effizienz des Programms oft ausschlaggebend.
- Fatale Programmfehler (Abstürze) sind meist auf einen Fehler im Gebrauch mit dem Speicher zurückzuführen.
- Fehler beim Umgang mit dem dynamischen Speicher sind schwer zu entdecken, weil sie erst zur Laufzeit auftreten.
- In objektorientierten Sprachen werden Objekte kreuz und quer referenziert, so dass schwierig festzustellen ist, ob ein Objekt noch verwendet wird.
- Java kennt deshalb die automatische Speicherfreigabe: Garbage-Collection (Müllsammler)

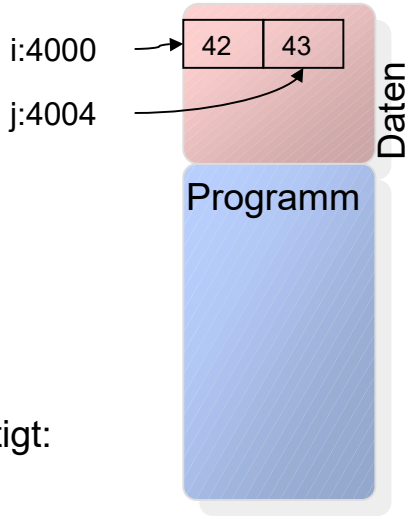
Speicherverwendung von Programmen

- Daten
  - Stack
    - *Rücksprung-Adressen*
    - *lokale Variablen*
  - Heap
    - *dynamische Daten*
  - Statische Daten
- Argumente/Optionen
  - beim Aufruf mitgegebene Werte
- Programm Code
  - das ausführbare Programm
- Laufzeitsystem
  - z.B. Kopie von Datei-Puffern



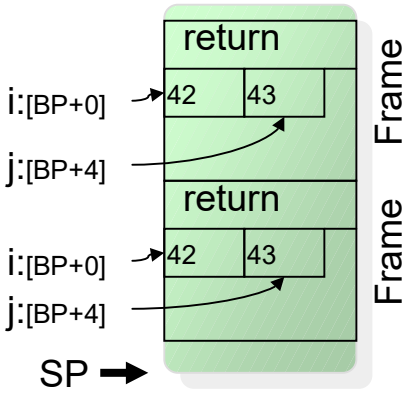
Statische Datenzuteilung

- Einfachste Zuteilungsstrategie
- Der Compiler legt die Zuordnung Variablenname zu Speicheradressen bei der Übersetzung fest.
- Schon in den ersten Programmiersprachen (FORTRAN) unterstützt.
- Speicher wird beim Start des Programms angefordert und beim Verlassen wieder freigegeben.
- **Java**: `static`
- Vorteile:
  - **einfach**
  - beim Start kann schon gesagt werden, ob Speicher ausreicht
- Nachteile:
  - die **Grössen** aller Datenstrukturen müssen **zur Übersetzungszeit** bekannt sein.
  - es muss so viel **Speicher angefordert** werden, wie das Programm **maximal** benötigt: u.U. zu viel.
  - **keine rekursiven** Programmaufrufe möglich.
  - **keine dynamischen Datenstrukturen** wie Listen und Bäume möglich.



Stack Datenzuteilung

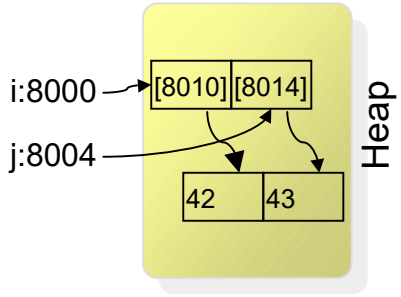
- Beim Aufruf einer Prozedur (Methode) wird ein Speicherbereich reserviert: **Activation Record** oder **Frame.**
- Diese Frames werden als Stack organisiert: LIFO
- Die lokalen Variablen einer Methode werden relativ zum Framepointer (Intel BP) angesprochen, z.B. [BP+4].
- Der Offset zum FP muss vom Compiler festgelegt werden.



- **Java**: lokale Variablen von einfachen (Werte-) Typen `double, int` usw. in Methoden
- Vorteile:
  - **rekursive Aufrufe** sind möglich.
  - **effiziente Zuteilung/Freigabe** von Speicher (SP, FP).
- Nachteile:
  - **Grösse** der einzelnen Datenstrukturen **muss bekannt sein**.
  - Der Aufrufer kann nicht auf die Werte des **Aufgerufenen** nach dessen Rückkehr **zugreifen**.
  - D.h. die Werte auf dem Stack sind nach dem Verlassen der Methode **verloren**.
  - **Stack-Overflow** möglich.

Heap Datenzuteilung

- Die Variablen enthalten nicht den Wert sondern eine Adresse in den (Heap-) Speicherbereich.
- Solche Variablen werden als **Pointer** oder **Referenzen** bezeichnet.
- Referenz-Variablen selber können statisch, auf dem Stack oder im Heap gespeichert sein.
- Der Speicher muss vom Programm mittels `new` angefordert und mittels `delete` wieder freigegeben werden.



- **Java**: alle Variablen von nicht eingebauten Typen (Klassen), Strings und Arrays
- Vorteile:
  - **rekursive Aufrufe** sind möglich.
  - die **Grösse** der einzelnen Datenstrukturen kann **zur Laufzeit** festgelegt werden.
  - **dynamische Datenstrukturen, z.B. Listen,** sind möglich.
- Nachteile:
  - **Zuteilung/Freigabe** der Daten ist **relativ rechenintensiv** und kompliziert.
  - Speicher muss explizit vom Programm angefordert und wieder freigegeben werden -> **Programmierfehler** möglich.
  - **Speicherüberlauf** (Heap-Overflow) möglich.

Einfache Speicherverwaltung

Der Speicherverwalter (Storage-Manager)

- Hat Schnittstelle um Speicher anzufordern und wieder freizugeben.
- Der einfache Speicherverwalter gibt direkt die Adresse des Speicherbereichs zurück.

```
class Storage {
     long malloc (int size);
     void free(long addr);
}
```

- Bei objektorientierten Sprachen unpraktisch
  - die Grösse der Objekte ist dem System bekannt also Grössengabe redundant
  - es muss zusätzlich ein/der Konstruktor aufgerufen werden.

```
class Storage {
     Object new (Class, Object[] args);
     void delete (Object obj);
}
```

- in Java Teil der Sprache: `MyObject obj = new MyObject("hallo");`

Speicherverwalter mit freier Zuteilung

- Der Speicherverwalter unterhält zwei Listen:
  - **Belegt-Liste:** Liste der belegten Speicherbereiche.
  - **Frei-Liste:** Liste der freien Speicherbereiche.

- Speicher wird angefordert
  - es wird ein Block der angeforderten Grösse aus dem freien Bereich (definiert durch eine Frei-Liste) als belegt markiert.
  - er wird in eine Belegt-Liste eingetragen.
  - Rest des Bereichs (Verschnitt) wird in die Frei-Liste eingetragen.
  - eine **Referenz** auf den Bereich wird zurückgegeben.
- Speicher wird freigegeben
  - der Speicher wird aus der Belegt-Liste entfernt und in die **Frei-Liste** eingetragen.
- Problem: (externe) Fragmentierung (später)
  - im Hauptspeicher bilden sich mit der Zeit Löcher.
- Lösung
  - der Speicher wird periodisch kompaktiert (die Löcher werden zusammengeschoben).

Fehler bei Anforderung von Heap-Speicher

- Vergessen den Speicher anzufordern
  - Konsequenz
    - *eine Referenz-Variable enthält einen zufälligen Wert ->*
    - *es wird eine beliebige u.U. benutzte Speicherstelle zugegriffen und verändert ->*
    - ***"komische" Werte ev. Programmabbruch.***
  - Abhilfe
    - *alle Referenz-Variablen automatisch zu einem 0-Wert (null) initialisieren (**Java**)*
    - ***-> Exception***

- Zuwenig Speicher angefordert, z.B bei Arrays, bei Objekten
  - Konsequenz
    - *es wird benachbarter Speicher überschrieben.*
    - *siehe oben.*
  - Abhilfe
    - *Überprüfen ob Zugriff im gültigen Bereich, z.B. Array-Index (**Java**).*
    - *Die (Speicher-) Grösse von Objekten wird automatisch bestimmt (**Java**).*
    - *Nur sichere Cast werden erlaubt (**Java**).*

Fehler bei Freigabe von Heap-Speicher

- Vergessen den Speicher freizugeben: **Memory Leak**
  - Konsequenz
    - *das Programm benötigt immer mehr Speicher.*
    - *Bei virtuellem Speicher (Teil des Speichers wird auf die Disk ausgelagert -> Vorlesung BS): es muss immer mehr auf Disk ausgelagert werden.*
    - *-> Programm wird langsamer später **Programmabbruch.***
  - Abhilfe
    - *der **Speicherverwalter (Storage-Manager)** gibt den Speicher automatisch frei (**Java**).*

- Der Speicher wird freigegeben obwohl er noch verwendet wird: **Dangling Pointer**
  - Konsequenz
    - *zuerst passiert nichts, aber wenn der Speicherbereich vom **Speicherverwalter** wieder neu vergeben wird, dann zeigt die alte Variable immer in diesen Bereich.*
    - *es wird eine anderweitig benutzte Speicherstelle zugegriffen und verändert ->*
    - ***"komische" sich plötzlich verändernde Werte oft/meist Programmabbruch.***
  - Abhilfe
    - *der **Speicherverwalter** gibt den Speicher automatisch frei (**Java**).*

Fehler bei der Freigabe von Speicher sind wesentlich schwieriger in den Griff zu bekommen als die bei der Anforderung

Automatische Speicherverwaltung

Automatische Speicherverwaltung

School of Engineering

- Hauptaufgabe der automatischen Speicherverwaltung ist die Freigabe des nicht mehr benötigten Speichers.

- einfache Verfahren (keine Laufzeitinformation notwendig)
  - Referenzzählung
  - Smart-Pointer
- vollautomatische Speicherfreigabe: *Garbage Collector* (Laufzeitinformation notwendig)
  - Mark-Sweep GC
  - Copying GC
  - Generational GC

- Alle Verfahren haben Vor- und Nachteile: **there is no silver bullet**
- Performance Einbusse je nach Verfahren (ca. 5-10%).
- **in Java**
  - Speicherverwalter sucht periodisch nach freiem Speicher.
  - `System.gc()` veranlasst den Speicherverwalter nach freiem Speicher zu suchen - sobald er Zeit hat.

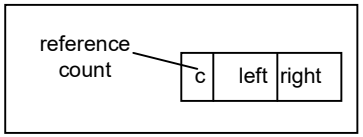
Referenzzählung (reference counting)

- Es wird gezählt, wie viele Referenzen auf ein Objekt verweisen.
- Wenn keine Referenz mehr vorhanden ist (Referenz-Zähler = 0), dann kann Objekt gelöscht werden.
- Operationen des (Referenz-)Zähler
  - Bei einer Zuweisung wird der (Referenz-)Zähler um 1 erhöht.
  - Bei Wegnahme einer Referenz wird der Zähler um 1 erniedrigt.
- als Methoden:

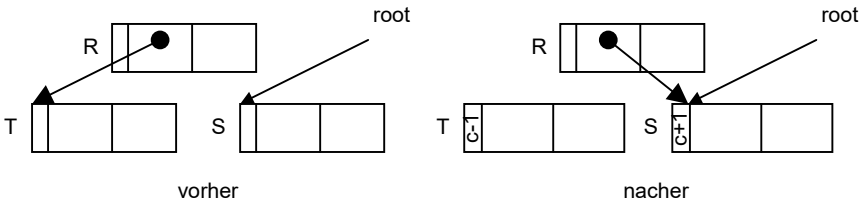
```
int rc;

void addRef() {
    rc ++;
}
```

```
int release() {
  if (--rc == 0) {
    delete(this);
  }
  return rc;
}
```




```
if (r.left != null)r.left.release();
r.left = s;
if (r.left != null)r.left.addRef();
```



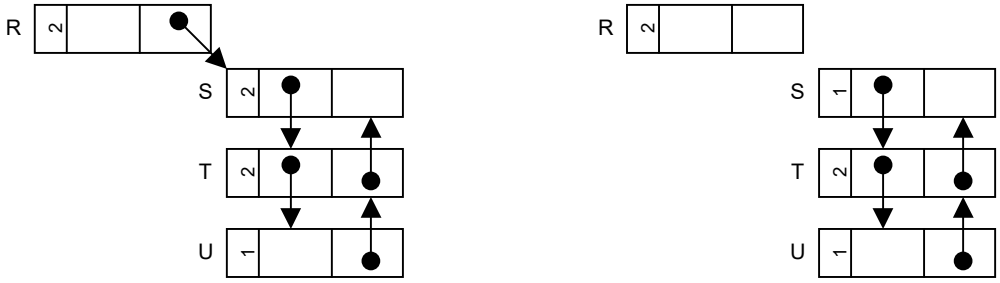
Eigenschaften der Referenzzählung

Vorteile der Referenzzählung

- einfach, geringer Verwaltungsaufwand.
- Speicher wird zum frühesten möglichen Zeitpunkt freigegeben.

Nachteile

- muss vom Programmierer durchgeführt werden -> Fehler möglich.
- zusätzliche Operationen (addRef, release) bei jeder Pointer-Zuweisung.
- zyklische Datenstrukturen können nicht freigegeben werden -> **Memory Leak**
- häufiger als angenommen: z.B. doppelt verkettete Liste.



Smart Pointers zur Referenzzählung

- Objekt-Referenzen sind nicht einfach "dumme" Adressen sondern "smarte" Objekte.
- Smart Pointer merken selber
  - wenn ihnen ein neuer Wert zugewiesen wird.
  - wenn Sie nicht mehr zugreifbar sind (*out of scope* gehen).
- In Java mit einer assign-Methode implementiert
- In C++ mit Operator Overloading; kann wie normaler Zeiger verwendet werden.
- Vorteil: keine Fehler beim Erhöhen und Erniedrigen des Referenz-Zählers, da automatisch.
- Nachteile: wie Referenzzählung: keine zyklischen Datenstrukturen

ab C++ 11 Teil des Sprachdefinition

```
class MySmartRef {
     MyObject ref;
     void assign (MyClass obj)  {
           if (ref != null) ref.release();
           ref = obj;
           if (ref != null) ref.addRef();
     }
     MyObject get() {
        return ref;
     }
}
```

```
class Test {

   MySmartRef left = new MySmartRef();


void foo() {

    MyClass a = new MyClass();
    left.assign(a); // left = a;
    left.assign(null); // left = null;
}
```

Automatischen Speicherverwalter und Sprache

School of Engineering

- System kann selbständig feststellen, ob Speicher noch benötigt wird.
- In C/C++ praktisch unmöglich:
  - es kann mit Pointern gerechnet werden.
  - es sind unsichere Casts möglich.
  - Unions: Mehrfachbelegung von Speicher.
- In Java verboten -> automatische Speicherverwaltung möglich.

  Speicher kann freigegeben werden, wenn er nicht mehr **direkt oder indirekt referenziert** (i.e. angesprochen) werden kann.
- Der Speicherverwalter muss für diesen Zweck die **Referenzketten** traversieren.
  - Alle Wurzelobjekte:
    - *alle **statischen Variablen.***
    - *alle Variablen, die im Moment des Aufrufs des Speicherverwalters sich auf dem **Stack** befinden.*
  - weiterverfolgen der Kette:
    - *innerhalb der Objekte alle **Referenzen** auf weitere Objekte kennen.*
- Informationen über die Objekte selber werden als **Laufzeitinformationen** bezeichnet
  - in Java Zugriff über Klassen von: `java.lang.reflect.*`

Mark-Sweep GC

School of Engineering

- Speicher wird nicht sofort freigegeben sondern erst bei Bedarf.
- Suche nach Blöcken, die freigegeben werden könne in zwei Phasen:
- **Mark:**
  - von den Wurzelobjekten ausgehend.
  - alle erreichbaren Blöcke werden markiert
- **Sweep:**
  - sequentiell durch den Heap gehend
  - alle nicht markierten Blöcke werden freigegeben.
  - die Markierung von markierten Blöcken wird gelöscht .
- Vorteile:
  - keine zusätzlichen Operationen bei Pointer-Zuweisungen nötig.
  - zyklische Datenstrukturen können aufgelöst werden.
- Nachteil:
  - Aufwand
  - das Programm muss währender Mark-Sweep Phase gestoppt werden: "Stop the World" GC genannt
  - es entstehen Löcher (Fragmentierung).

Mark-Sweep GC Algorithmus

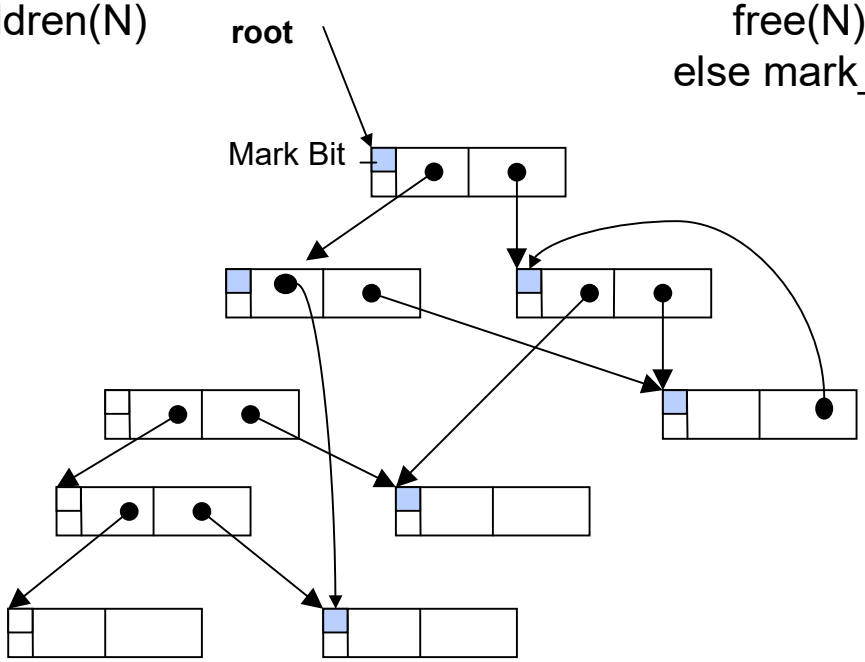
- Mark-Sweep: Tiefensuche

```
mark(N) =
  if mark_bit(N) == unmarked
      mark_bit(N) = marked
      for all M in Children(N)
        mark(M)

gc()
   for all N in root
      mark (N)
   sweep()
```

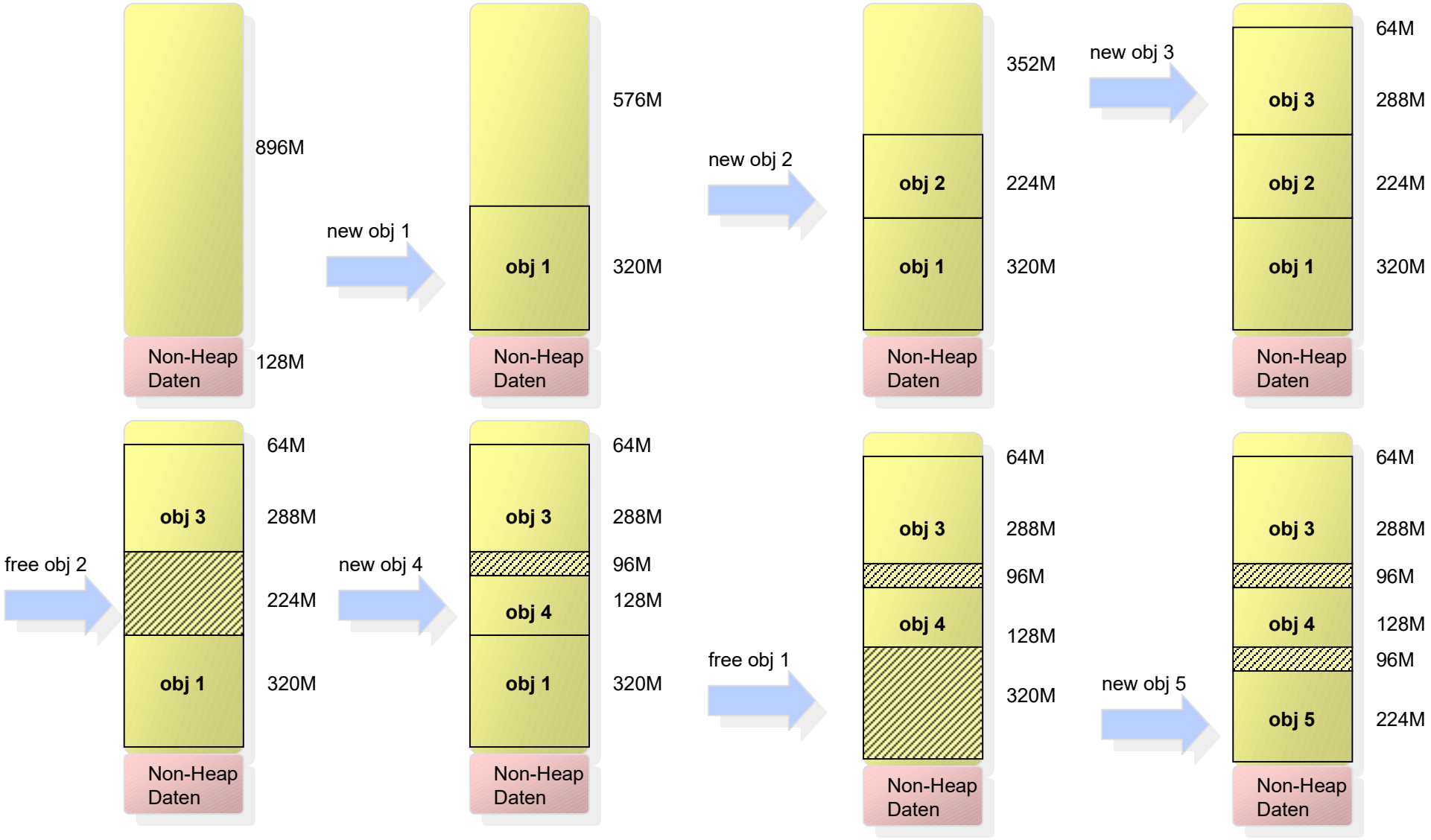
```
sweep()
  for all N in heap
     if mark_bit(N) == unmarked
        free(N)
     else mark_bit(N) = unmarked
```

Belegt-Liste



Kompaktierende Speicherverwaltung

Problem: Fragmentierung des Heaps



Copying GC

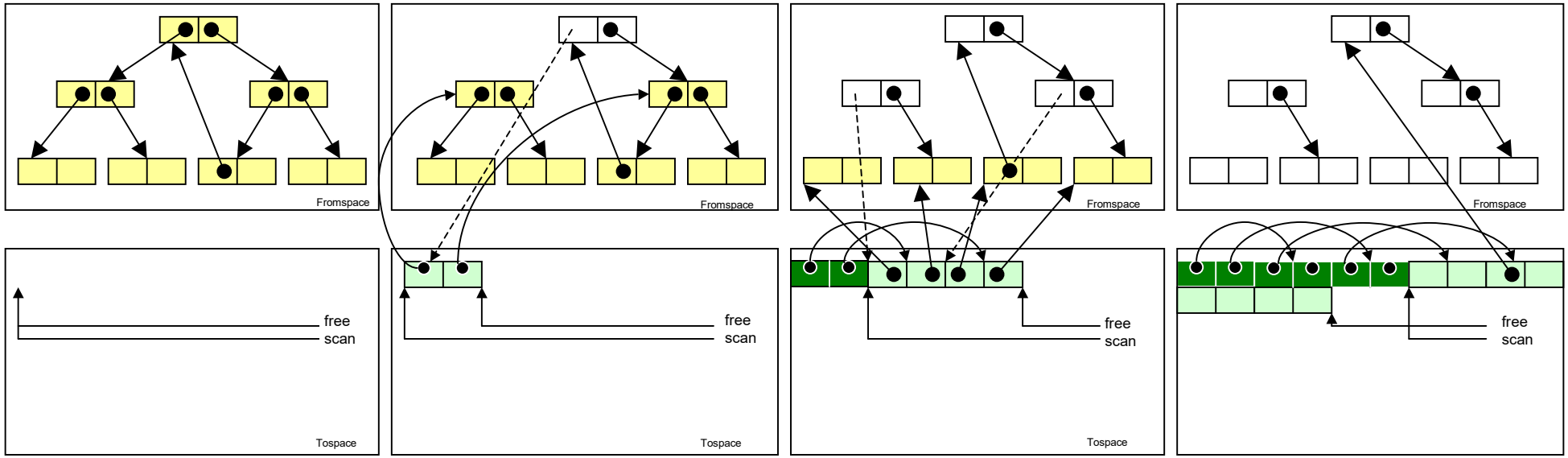
School of Engineering

- Der Speicher wird in zwei gleiche Teile (*Semi Spaces*) aufgeteilt
  - der eine Semi-Space enthält die aktuellen Daten.
  - der andere Semi-Space enthält die obsoleten Daten.
- Neue Bereiche/Daten werden im aktuellen Semi-Space angelegt
- Wenn kein Platz mehr im aktuellen Semi-Space
  - es werden alle noch referenzierten Daten in den anderen Semi-Spacee kopiert.
  - die Rollen der Semi-Spaces wird vertauscht.

- Vorteile
  - es entstehen keine Löcher.
  - die Suche nach freien Blöcken entfällt (belegter Bereich ist kompakt).
- Nachteil
  - es wird doppelt so viel Speicher benötigt.
  - -> virtuellen Speicher verwenden.

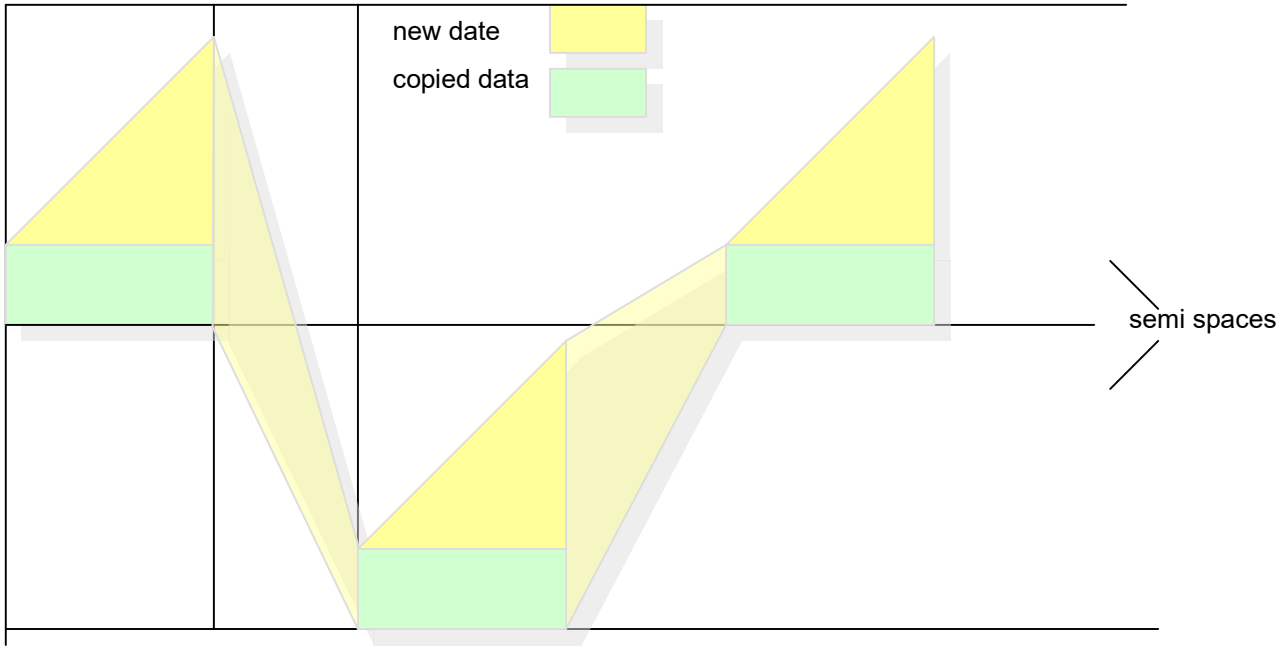
Copying GC Algorithmus

- Cheney's Copying Algorithm: Breitensuche
  - drei Farben von Knoten.
    - *weiss: Knoten im alten Semi-Space; am Schluss der GC Phase gelöscht.*
    - *Grau(hellgrün): in neuen Semi-Space kopiert aber Referenzen auf Nachfolger noch in den alten Semi-Space.*
    - *Schwarz(dunkelgrün): in neuem Semi-Space kopiert, sowie direkte Nachkommen ebenfalls.*
  - nur Zwei Zeiger
    - *Start des freien Bereichs:* `free`.
    - *Start des grauen Bereichs:* `scan`.



Performance, zeitliches Verhalten

- Es muss jeweils der ganze Speicher durchsucht werden
  - relativ langer Unterbruch des Programms notwendig.
- Es wird in einen neuen Speicherbereich umkopiert
  - Lokalität des RAM Zugriffs geht verloren -> schlechte Performance.
  - Begründung: RAM Caches; auf Disk ausgelagerter Speicher (Virtual Memory).



Generational GC

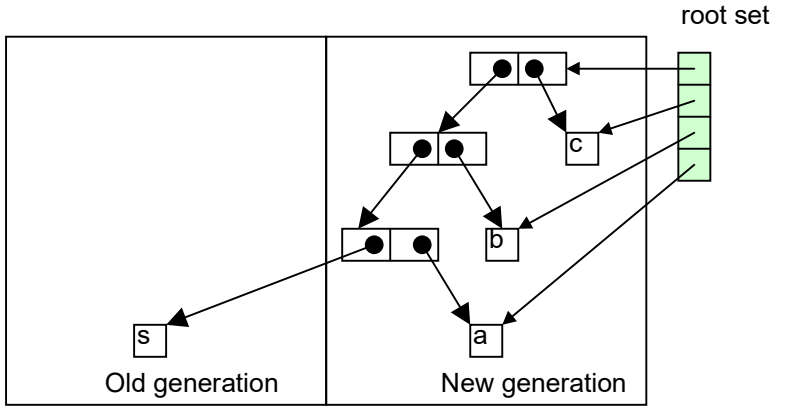
- Nachteile von Mark-Sweep und Copying
  - es muss immer der ganze Speicher durchlaufen werden.
  - Programm muss während dieser Zeit angehalten werden -> bei interaktiven Systemen störend.
- Beobachtung:
  - Lebensdauer von Objekten in Programmen ist sehr unterschiedlich.
- Schwache Generationshypothese
  - *most objects die young*
- Starke Generationshypothese (umstritten)
  - *the older an object is the less likely it is to die*
- Idee:
  - die Objekte in Generation unterteilen.
  - neue Generationen häufiger nach freizugebenden Objekten durchsuchen.

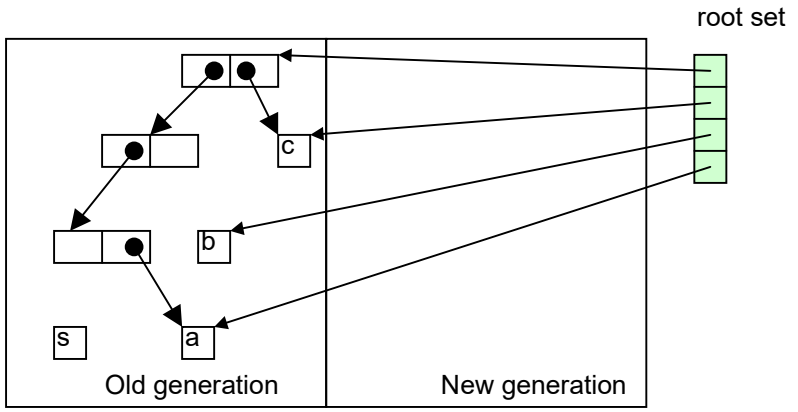
Generational-Copying GC Algorithmus

- neue Objekte entwerden im new Generation Space angelegt. z.B. `root[0] = new R(a,b)`

- G.C. Alle noch referenzierten Elemente im *New Generation Space* werden in den *Old Generation Space* kopiert; die übrigen werden gelöscht.

- Ziel: Objekte im *New Generation Space* können unabhängig vom *Old Generation Space* eingesammelt werden.



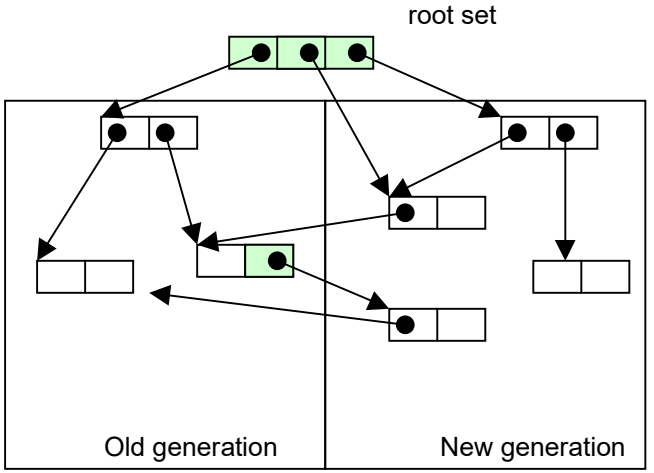


Generational-Copying GC Algorithmus

- **Referenzen von *New Generation* nach *Old Generation***
  - werden nicht speziell behandelt.

- **Referenzen von *Old* nach *New Generation***
  - Referenzen aus dem *Old Generation Space* müssen zum **Root-Set** hinzu-genommen werden.

  - a) ein Objekt wird durch G.C. in den *Old Generation* Space verschoben
    - *Referenz wird in das Root-Set übernommen.*
  - b) eine Referenz eines Objekts im *Old Generation Space* wird auf ein Objekt im *New Generation Space* gesetzt:
    - *Software: beim Schreiben wird eine spezielle Routine aufgerufen werden:*
    - *Hardware: eine sog. Write-Barrier wird gesetzt.*

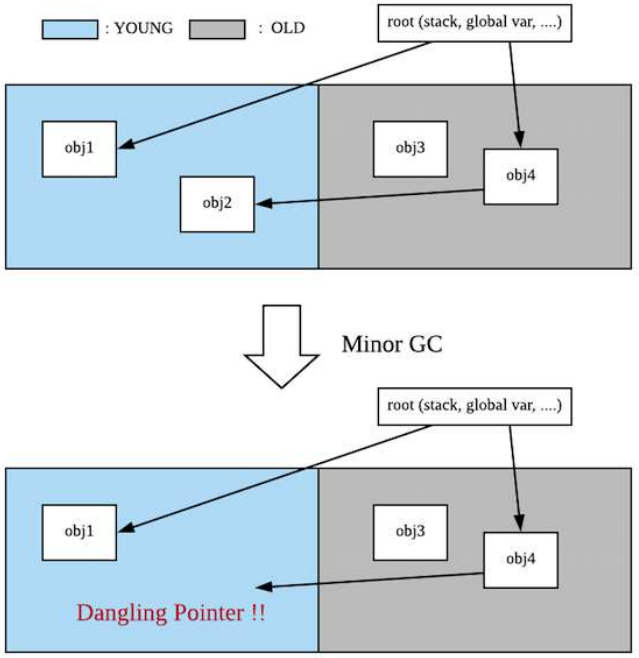


… Generational-Copying GC Algorithmus

- müssen erkannt werden, weil sonst Gefahr von **Dangling Pointer**
- Write Barrier setzten direkten Zugriff auf Kernel voraus

Byte Code Injection

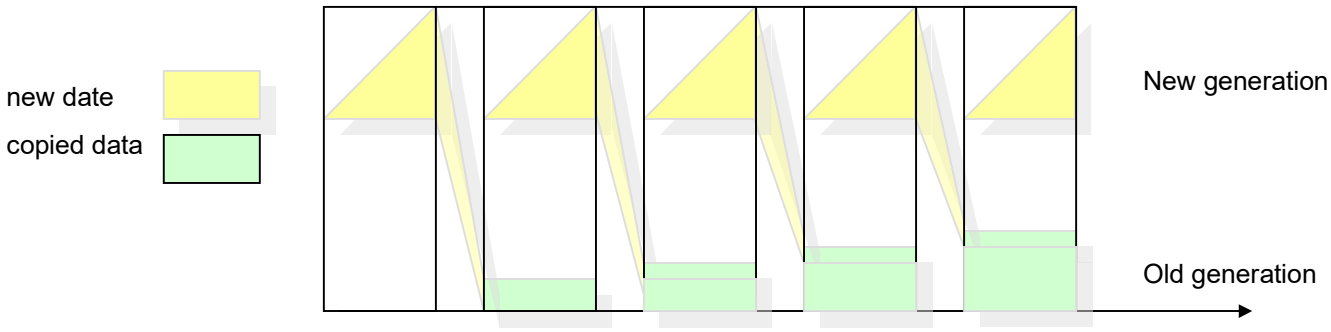
- Der Code wird zur Ladezeit angepasst
  - z.B. via Javassist: https://www.javassist.org/
  - Zugriffe auf Felder können so erkannt werden
- Wir u.a. in JPA und Hibernate verwendet



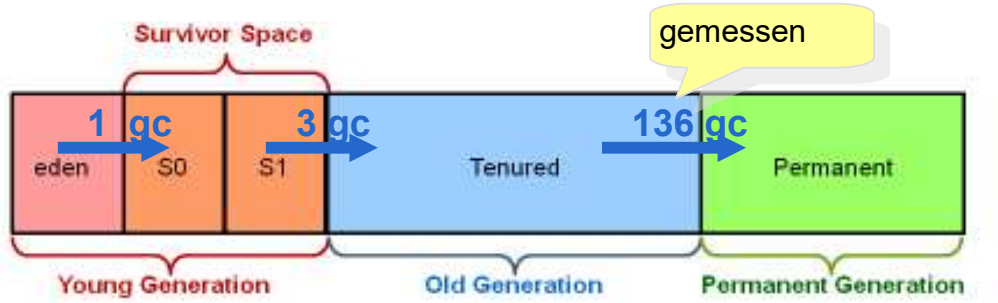
https://www.tomsquest.com/blog/2014/01/intro-java-agent-and-bytecode-manipulation/

Performance, zeitliches Verhalten

- *New Generation Space* kann unabhängig von *Old Generation Space* behandelt werden: **Minor Collection**
- Beim *Old Generation Space* müssen alle Referenzen betrachtet werden: **Major Collection**
  - einfache Lösung , da i.d.R. wenige Objekte im *New Generation Space*:
    - *Alle Objekte des* New Generation Space *werden zum Root-Set des Old Generation Space hinzugefügt.*
- Häufig Minor Collection, selten Major Collection durchführen
  - kürzere Unterbrüche Notwendig
  - bessere Lokalität der Zugriffe



Aufbau des Hotspot Heaps (Oracle Doku)



- Young Generation is where all new objects are allocated and aged.
  - When the young generation fills up, this causes a minor garbage collection.
  - Stop the World Event - All minor garbage collections are "Stop the World" events.

- The Old Generation is used to store long surviving objects.
  - Eventually the old generation needs to be collected, also a Stop the World Event
  - This event is called a major garbage collection.

- The Permanent generation contains
  - Metadata required by the JVM to describe the classes and methods used in the application.
  - The permanent generation is included in a full garbage collection.

http://www.oracle.com/webfolder/technetwork/tutorials/obe/java/gc01/index.html

Externe Ressourcen

Kombination von automatischer mit nicht-automatischer Speicherverwaltung: Finalizer

- Es gibt Ressourcen, die nicht automatisch verwaltet werden:
  - Dateien, Fenster, usw. generell: **Betriebssystem-Ressourcen**
- Müssen explizit wieder freigegeben werden:
  - z.b. file.close();
  - bei SWT (Eclipse GUI) müssen die `Widgets` mittels `dispose()` explizit freigegeben werden

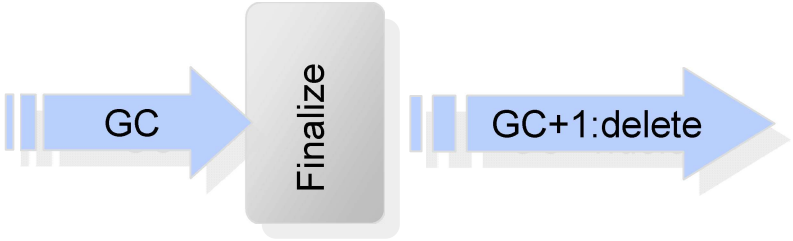
"Stilbruch": SWT aus alter Smalltalk GUI Bibliothek entstanden

- Spätestens aber wenn Objekt gelöscht wird, das die Ressource verwendet.
- Objekt wird über spezielle Methode benachrichtigt , bevor es freigegeben wird: **finalize()**
  - z.B. `file.close()` in Methode `finalize()` aufrufen.
- Probleme bei der Anwendung von Finalizer:
  - Aufruf erst später (bei statischen Objekt gar nicht)
  - Reihenfolge nicht bestimmt.
  - Finalizer-Routine sollten so kurz wie möglich sein (Programm wird während GC Phase gestoppt).
  - die Finalizer der Oberklasse muss am Schluss mit super.finalize() aufgerufen werden (nicht automatisch wie beim Konstruktor).

Auswirkung des Finalizers auf GC-Algorithmus

- Problem: `finalize()` kann wieder Referenz z.B. auf sich selber setzen
  - *Objekte dürfen erst in der nächsten GC Phase freigegeben werden.*

- Freigeben der Objekte mit Finalizer ist zweistufig:
  - GC: Objekt nicht referenziert: finalize() aufrufen und in Finalized-Liste übertragen.
  - GC+1: alle Objekte in Finalized-Liste, die nicht markiert wurden werden freigeben.




```
mark(N)
  if mark_bit(N) == unmarked
       mark_bit(N) = marked
       for all M in Children(N)
          mark(M)
```

```
sweep()
  for all N in Heap
     if mark_bit(N) == unmarked
          if (! N  in Finalized)
               N.finalize()
               addToFinalized(N)
          else
               delete(N)

removeFromFinalized(N)
       else mark_bit(N) = unmarked
```

AutoClose Interface

- Finalizier wurden in Java 9 deprecated, weil sie viele Probleme verursacht haben
  - https://stackoverflow.com/questions/56139760/why-is-the-finalize-method-deprecated-in-java-9

- Java hat deshalb das **AutoClose** Interface mit der Methoden:

close() .für die Freigabe der Ressource

```
FileInputStream input = new FileInputStream(...);
try {
  // Use input
} finally {
  input.close();
}
```

Dispose Pattern

Java – Try with Resources

- Eleganter geht es mit dem Try mit Ressourcen
- Am Ende des try-Blockes wird automatisch das close aufgerufen

```
try (FileInputStream input = new FileInputStream(...)) {


}
```

https://www.baeldung.com/java-try-with-resources

Weak References

Weak References

- Datenstrukturen, die Sammlungen (Hastable, List usw.) von andern Objekten beinhalten, benötigen interne Referenzen auf diese Objekte.
- Werden von GC gefunden und traversiert.
  - Objekte in Sammlungen können nicht freigegeben werden, sobald (ausser Sammlung) keine Referenzen auf diese Objekte vorhanden sind.
  - Sehr viele Referenzen müssen traversiert werden.
- Lösung
  - Einführung von Referenzen, die nicht traversiert werden: Weak References
  - Objekt wird gelöscht, auch wenn noch Weak References auf dieses zeigen.
- Vorteil
  - Objekte in Sammlungen können freigegeben werden.
- Nachteil
  - Problem mit Dangling Pointer

Weak References

- Referenzen auf Objekte, die Java - wenn sie nicht anderweitig referenziert werden - freigeben kann.

Klasse **`WeakReference`** in package java.lang.ref

`WeakReference(Object referent)`	Konstruktor
`void clear()`	löscht Referenz auf das Objekt
`Object get()`	retourniert referenziertes Objekt

- Falls Objekt gelöscht wird, dann wird WeakReference zu null gesetzt

```
public class TestWR {
  WeakReference next;

  public static void main(String[] args)throws Exception {
      TestWR a = new TestWR();
      a.next = new WeakReference(new TestWR());
      System.out.println(a.next.get());
      System.gc();
      Thread.sleep(100);
      System.out.println(a.next.get());
}
```

Zusammenfassung

School of Engineering

- Speicherverwaltung
  - statisch, Stack, Heap
  - freie Zuteilung
- Fehler bei Speicher-Anforderung / Freigabe
- Automatische Speicherfreigabe
  - Einfache Verfahren
    - *Referenzzählung, Smart Pointer*
  - Automatische Verfahren
    - *Mark-Sweep*
    - *Kompaktierende*
      - Copying
      - Generational
- Weak References
- Finalizer
- Werkzeuge

Anhang: Setzen und Anzeige von GC Info

- Auf der Kommandozeile kann angegeben werden:
  - initiale Heapgröße -Xms
  - maximale Heapgröße -Xmx
  - Protokollieren von Garbagekollektorläufen: -XX:+PrintGC oder -XX:+PrintGCDetails
- `java -Xms500m -Xmx800m -XX:+PrintGC Main`

```
[GC 38835K->38906K(63936K), 0.1601889 secs]
[GC 39175K(63936K), 0.0050223 secs]
[GC 52090K->52122K(65856K), 0.1452102 secs]
[GC 65306K->65266K(79040K), 0.1433074 secs]
```

- `Runtime.getRuntime().totalMemory();` liefert den Gesammtspeicher
- `Runtime.getRuntime().freeMemory();` liefert den freien Speicher
- `System.gc();` ruft den G.C. bei nächster Gelegenheit auf

GC als Thread implementiert -> dem System Zeit geben mit z.B. Thread.sleep

Anhang: Werkzeuge

- JConsole: das Werkzeug zur Java Systemüberwachung
  - im <jdk>\bin Verzeichnis
  - zur Anzeige von
  - Memory
  - Threads
  - Prozessor Auslastung
  - ...
- Auch auf entfernten Maschinen möglich