Verteilte Systeme – Übung

Stubs & Skeletons

Sommersemester 2026

Paul Bergmann, Christian Berger

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Informatik 4 (Systemsoftware)
https://sys.cs.fau.de

Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware

Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

Überblick

Aufgabe 2

Java Reflection API

Stubs & Skeletons

- Dynamische Proxies als Stubs
- Generische Skeletons
- Identifikation von Remote-Objekten

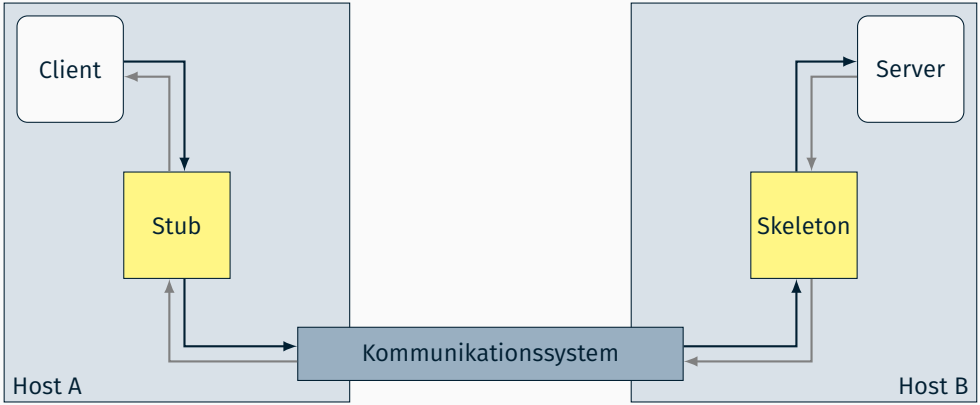
Rückrufe

Evaluation von Systemen

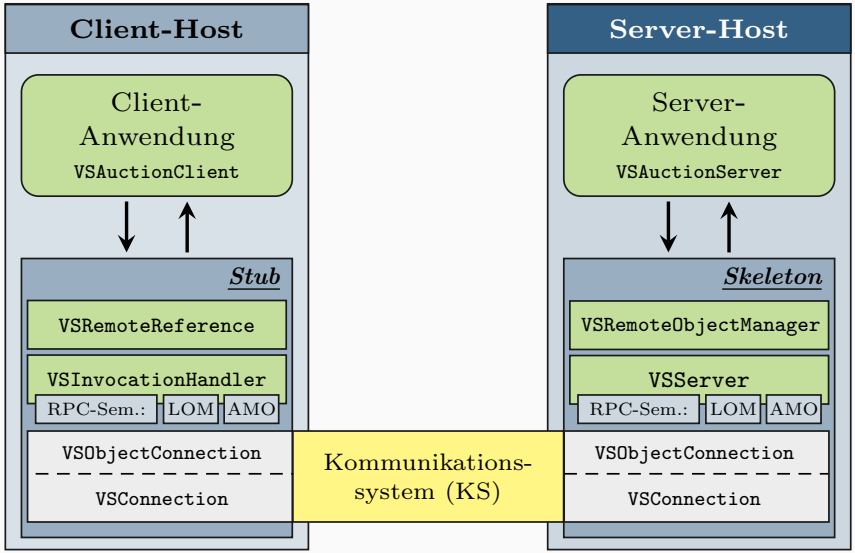
Aufgabe 2

Übungsaufgabe 2

- Dynamische Stubs und Skeletons
- Unterstützung von Rückrufen



Übungsaufgabe 2



Exceptions

- Ziel: Transparente Fernaufrufe
  - Normalfall: Rückgabe des Ergebnisses
  - Fehlerfall: Abbruch der Ausführung auf Server-Seite (Exception)
    → Fernaufrufsystem muss Exception zum Aufrufer propagieren

- Konsequenz für den Fehlerfall
  - Fangen der Exception beim Methodenaufruf auf Server-Seite → `InvocationTargetException`
  - Weiterleitung der Exception zur Client-Seite
  - Werfen der Exception im Stub

- Im Fernaufruf bedingte Fehler
  - Beispiele
    - Unerreichbarer Server
    - Verbindungsabbruch
    - ...

  → Fernaufrufsystem muss Fehler (soweit möglich) behandeln
  [Näheres in Übungsaufgabe 3]

Unterstützung von Rückrufen

- Parameterübergabe (analog zu Java RMI)
  - Call-by-Value (Standard): Übertragung einer Kopie des Parameters
  - Call-by-Reference: Übertragung eines Stub für den Parameter
    - Parameter implementiert `Remote`-Schnittstelle
    - Parameterobjekt wurde zuvor exportiert

- Implementierung
  - Erweitertes Marshalling im Invocation-Handler des Stub
    - Analyse der Aufrufparameter
    - Unterscheidung der Parameterübergabearten
  - Beachte: Call-by-Reference ist auch relevant für Rückgabewerte

- `Class.isAssignableFrom()`: Überprüfung, ob ein Objekt `o` eine bestimmte Schnittstelle (z. B. `Serializable`) implementiert

```
Object o = [...];
if(Serializable.class.isAssignableFrom(o.getClass())) {[...]}
```

Java Reflection API

- Bietet die Möglichkeit, das Laufzeitverhalten von Applikationen zu analysieren und es gegebenenfalls sogar zu beeinflussen
- Tutorial: `http://docs.oracle.com/javase/tutorial/reflect/index.html`

> "[...] This is a relatively advanced feature and **should be used only by developers** who have a **strong grasp of the fundamentals of the language**. [...]"

- Ermöglicht zur Laufzeit
  - Analyse von Attributen, Konstruktoren, Methoden, ...
  - Erzeugung neuer Objekte
  - Modifikation bestehender Objekte
  - Dynamische Methodenaufrufe
  - ...

- Zentrale Klasse: `java.lang.Class`
  - Pro Objekttyp existiert ein unveränderliches `Class`-Objekt
  - Beispiel

```
String x = "x";
String y = "y";
boolean b = (x.getClass() == y.getClass());  // -> b == true
```

- Zugriff auf `Class`-Objekte
  - Allgemein: Per `class`-Attribut [Funktioniert auch bei primitiven Datentypen.]

```
Class c = <Klassenname>.class;
```

  - Über existierendes Objekt mit `getClass()`

```
Class c = <Objekt>.getClass();
```

  - Über Klassenname mit `forName()`

```
Class c = Class.forName(<Klassenname>);
```

- Analyse einer Klasse

```
public class Class<T> {
    public Class<? super T> getSuperclass();
    public Class<?>[] getInterfaces();
    public Method[] getMethods();
    [...]
}
```

`getSuperClass()` Zugriff auf `Class`-Objekt der Oberklasse

`getInterfaces()` Zugriff auf `Class`-Objekte der von dieser Klasse direkt implementierten Schnittstellen

`getMethods()` Rückgabe der öffentlichen Methoden dieser Klasse

- Beispiel: Ausgabe aller Methoden der implementierten Schnittstellen

```
Class<?> c = <Objekt>.getClass();
do {
    for(Class<?> intf: c.getInterfaces()) {
       for(Method m: intf.getMethods()) System.out.println(m);
    }
} while((c = c.getSuperclass()) != null);
```

- Analyse einer Methode: `java.lang.reflect.Method`

```
public class Method {
    public String getName();
    public Class<?>[] getParameterTypes();
    public Class<?> getReturnType();
    public Class<?>[] getExceptionTypes();
    public String toGenericString();
    [...]
}
```

`getName()`	Rückgabe des Methodennamens
`getParameterTypes()`	Zugriff auf `Class`-Objekte der Parameter
`getReturnType()`	Zugriff auf `Class`-Objekt des Rückgabewerts
`getExceptionTypes()`	Zugriff auf `Class`-Objekte der Exceptions
`toGenericString()`	Rückgabe der kompletten Methodensignatur

- Dynamischer Aufruf einer Methode

```
public class Method {
    public Object invoke(Object obj, Object... args);
}
```

- Beispiel: `registerAuction()`-Methodenaufruf am `VSAuctionService` aus Übungsaufgabe 1
  - Gewöhnlicher `registerAuction()`-Methodenaufruf

```
VSAuctionService service  = new VSAuctionServiceImpl();
service.registerAuction(new VSAuction("Testauktion", 1), 42, null);
```

  - `registerAuction()`-Methodenaufruf mit Java Reflection API

```
VSAuctionService service  = new VSAuctionServiceImpl();

// Holen des Methoden-Objekts fuer registerAuction()
Class<?> c = service.getClass();
Class<?>[] paramTypes = new Class<?>[]{ VSAuction.class, int.class, VSAuctionEventHandler.class };
Method m = c.getMethod("registerAuction", paramTypes);

// Zusammenstellung der Parameter und Aufruf der Methode
Object[] params = new Object[]{ new VSAuction("Testauktion", 1), 42, null };
m.invoke(service, params);
```

[Wie das Beispiel verdeutlicht, gibt es keinen Grund, für den Aufruf einer Methode die Java Reflection API zu verwenden, solange alles Mögliche unternommen wurde, dies zu verhindern.]

Stubs & Skeletons

Dynamische Proxies als Stubs

- Stellvertreter des entfernten Objekts beim Aufrufer einer Methode
  $\rightarrow$ Implementierung der **Schnittstelle des entfernten Objekts**

- Zentrale Aufgabe: Umwandlung eines lokalen Methodenaufrufs am Stub in einen Fernaufruf am entfernten Objekt
  - Erzeugung einer Anfragenachricht
    - Eindeutige Kennung des Server-Prozesses
    - Eindeutige Kennung des entfernten Objekts
    - Eindeutige Kennung der aufzurufenden Methode
    - Einpacken der Aufrufparameter
  - Senden der Anfragenachricht über das Kommunikationssystem
  - Empfang einer Antwortnachricht über das Kommunikationssystem
  - Auspacken des Rückgabewerts
  - Übergabe des Rückgabewerts an den Aufrufer

- Schnittstelle

```
public interface VSHelloInterface {
    public void setName(String name);
    public String getName();
    public void sayHello();
}
```

- Implementierung

```
public class VSHelloImpl implements VSHelloInterface {
    private String name;

    public void setName(String name) {
        this.name = name;
    }

    public String getName() {
        return name;
    }

    public void sayHello() {
        System.out.println("Hallo␣" + name);
    }
}
```

Manuelle Implementierung von Stubs

- Stub für Beispiel-Schnittstelle

```
public class VSHelloStub implements VSHelloInterface {
    public void setName(String name) {
        // Anfrage (IDs, Parameter) erstellen und senden
        // Fuer synchronen Aufruf: Antwort empfangen
    }
    public String getName() {
        // Anfrage (IDs) erstellen und senden
        String s = [...] // Antwort empfangen und auspacken
        return s;
    }
    public void sayHello() {
        // Anfrage (IDs) erstellen und senden
        // Fuer synchronen Aufruf: Antwort empfangen
    }
}
```

- Nachteile einer manuellen Implementierung
  - Hoher Implementierungsaufwand (vor allem bei Schnittstellenänderungen)
  - Code-Duplikation
  - Fehleranfällig

- Grundidee
  - Zur Laufzeit generierte Stellvertreterobjekte
    → Konfigurierbare Schnittstellen
  - Umleitung von lokalen Methodenaufrufen am Proxy auf einen zuvor registrierten **Invocation-Handler**
    → Anwendungsspezifische Implementierung des Invocation-Handler
  - Weiterführende Informationen

    Dynamic Proxy Classes

    `http://docs.oracle.com/javase/7/docs/technotes/guides/reflection/proxy.html`

    Dynamic Proxies – Short Tutorial

    `http://www.javaspecialists.eu/archive/Issue005.html`

- Dynamische Proxies als Stubs
  - Implementierung beliebiger Schnittstellen
    → Proxies können als Stellvertreter für entfernte Objekte dienen
  - Abfangen von lokalen Methodenaufrufen
    → Umwandlung in Fernaufrufe

- Implementierung eines Invocation-Handler
  - Bereitstellung einer `invoke()`-Methode, an die sämtliche am Proxy getätigten Methodenaufrufe delegiert werden
  - Wissen über Methodenname und -parameter des ursprünglichen Aufrufs
  - Rückgabewert von `invoke()` $\rightarrow$ Rückgabewert des ursprünglichen Aufrufs

- Schnittstelle: `java.lang.reflect.InvocationHandler`

```
public Object invoke(Object proxy, Method method, Object[] args) throws Throwable;
```

[Nicht zu verwechseln mit der `invoke()`-Methode der Java Reflection Klasse `Method`]

  - Parameter:

`proxy`	Der Proxy, an dem die `invoke`-Methode aufgerufen wurde
`method`	Das `Method`-Objekt der aufgerufenen Proxy-Methode
`args`	Array mit den Parametern des ursprünglichen Methodenaufrufs [Falls kein Parameter übergeben wurde: `args == null`]

  - Die `invoke()`-Methode darf nur die Exceptions (`Throwable`) werfen, die in der Signatur der aufgerufenen Methode enthalten sind

- Proxy-Erzeugung mittels `Proxy.newProxyInstance()`

```
static Object newProxyInstance(ClassLoader loader, Class[] interfaces, InvocationHandler handler);
```

`loader` Class-Loader für die Proxy-Klasse
[Typischerweise der Class-Loader der zu implementierenden Schnittstelle; dieser lässt sich durch den Aufruf von `getClassLoader()` am `Class`-Objekt der Schnittstelle bestimmen.]

`interfaces` Array der zu implementierenden Schnittstellen-Klassen

`handler` Instanz des Invocation-Handler

- Nach der Erzeugung des Proxy-Objekts kann dieses als Stellvertreter für die eigentliche Implementierung der vom Proxy bereitgestellten Schnittstellen genutzt werden

- Umleitung eines Methodenaufrufs auf ein lokales Objekt

```
public class VSHelloInvHandler implements InvocationHandler {
    private VSHelloInterface object;

    public VSHelloInvHandler(VSHelloInterface object) {
        this.object = object;
    }

    // Handler-Methode fuer alle lokalen Aufrufe am Proxy
    public Object invoke(Object proxy, Method method, Object[] args) throws Throwable {
        System.out.println("[Proxy] Methode: " + method.getName());
        if(args != null) {
           System.out.println("[Proxy] Args: " + args.length);
        }
        return method.invoke(object, args);  // Eigentlicher Aufruf
    }
}
```

- Main-Methode (der Klasse `VSHelloTest`) zum Testen des Proxy

```
public static void main(String[] args) {
    // Erzeugung des eigentlichen Objekts
    VSHelloInterface object = new VSHelloImpl();

    // Erzeugung eines Invocation-Handler
    VSHelloInvHandler handler = new VSHelloInvHandler(object);

    // Proxy-Erzeugung
    ClassLoader ldr = ClassLoader.getSystemClassLoader();
    Class<?>[] intfs = new Class[] { VSHelloInterface.class };
    VSHelloInterface proxy = (VSHelloInterface) Proxy.newProxyInstance(ldr, intfs, handler);

    // Test: Methodenaufrufe am Proxy
    proxy.setName("Benutzer");
    proxy.sayHello();
    System.out.println(proxy.getName());
}
```

- Beispiel-Ausführung

```
> java VSHelloTest

[Proxy] Methode: setName
[Proxy] Args: 1
[Proxy] Methode: sayHello
Hallo Benutzer
[Proxy] Methode: getName
Benutzer
```

- Jeder Aufruf einer Methode an dem Objekt `proxy` wird durch den dynamisch generierten Proxy an die `invoke()`-Methode von `VSHelloInvHandler` weitergegeben
- Im verteilten Fall erfolgt im Invocation-Handler der Fernaufruf am entfernten Objekt

Stubs & Skeletons

Generische Skeletons

- Stellvertreter des Aufrufers einer Methode beim eigentlichen Objekt
  $\rightarrow$ Imitieren des Verhaltens eines lokalen Aufrufers

- Zentrale Aufgabe: Ausführung des eigentlichen Methodenaufrufs
  - Empfang einer Anfragenachricht über das Kommunikationssystem
    - Auspacken der Kennung des (jetzt lokalen) Objekts
    - Auspacken der Kennung der aufzurufenden Methode
    - Auspacken der Aufrufparameter
  - Bestimmung des Objekts mittels Kennung
  - Methodenaufruf am Objekt
  - Erzeugen einer Antwortnachricht mit dem Rückgabewert
  - Senden der Antwortnachricht über das Kommunikationssystem

Generische Skeletons

- Idee
  - Gemeinsame Skeleton-Implementierung für alle Fernaufrufe
  - Methodenaufrufe per Java Reflection API
- Problemstellung: Wie finde ich die richtige Methode?
  - Methodenname ist nicht eindeutig
  - Parameteranzahl ist nicht eindeutig
  - → Kombination aus Methodename sowie Anzahl und Typen aller Parameter
- Lösungsansatz
  - Eindeutige Kennung per `Method.toGenericString()`
  - Beispiel: `VSAuctionService.registerAuction()`

```
public abstract void vsue.rmi.VSAuctionService.registerAuction(  // Methodenname
        vsue.rmi.VSAuction, int, vsue.rmi.VSAuctionEventHandler) // Parameter
    throws vsue.rmi.VSAuctionException, java.rmi.RemoteException // Exceptions
```

  - Bestimmung und Verwendung des richtigen `Method`-Objekts
    1. Abfrage aller Remote-Schnittstellen des Remote-Objekts
    2. Abfrage aller Methoden dieser Schnittstellen
    3. Vergleich der generischen Methoden-Strings mit dem in der Anfrage
    4. Aufruf von `invoke()` am gefundenen Methoden-Objekt

Stubs & Skeletons

Identifikation von Remote-Objekten

Referenzierung und Implementierung der Server-Seite

- Remote-Referenz: `VSRemoteReference`

```
public class VSRemoteReference implements Serializable {
    private String host;
    private int port;
    private int objectID;
}
```

`host`	Host-Name des Servers
`port`	Port-Nummer des Servers für Verbindungsaufbau
`objectID`	Objekt-ID für Zugriff auf Remote-Objekt

- Verwaltung von Verbindungen für Remote-Objekte: Anpassung von `VSServer`
  - Empfangen und Bearbeiten von Anfragen
  - Erzeugen und Senden von Antworten

Verwaltung von Remote-Objekten


```
public class VSRemoteObjectManager {
    public static VSRemoteObjectManager getInstance();
    public Remote exportObject(Remote object);
    public Object invokeMethod(int objectID, String genericMethodName, Object[] args);
}
```

- Implementierung als *Singleton*
  - Nur eine Instanz pro Java Virtual Machine
  - Zugriff über statische `getInstance()`-Methode
- Export von Objekten
  - Bereitstellung dynamischer Proxies für Fernaufrufe
  - Verwaltung der exportierten Remote-Objekte
- Aufruf von Methoden an exportierten Objekten
  - Suche des Objekts anhand der Objekt-ID
  - Bestimmung der Methode über ihren generischen Namen
  - Aufruf der Methode mit den übergebenen Parametern
  - Rückgabe des Rückgabewerts der aufgerufenen Methode

`ObjectInputFilter` der RMI-Registry

- `LocateRegistry` prüft seit Java `1.8.0_121` `bind`-Aufrufe von Clients

```
Remote vsproxy = VSRemoteObjectManager.getInstance().exportObject([...]);
Registry registry = LocateRegistry.getRegistry([...]);
registry.bind("name", vsproxy);
```

  Beispiel wirft eine `InvalidClassException` wegen `VSInvocationHandler`:

  - Proxy-Objekt `vsproxy` enthält den `VSInvocationHandler`
  - `getRegistry` gibt einen **Registry-Stub** zurück
  - Aufruf von `bind` löst einen Fernaufruf aus
  - `LocateRegistry` akzeptiert bei Fernaufrufen nur primitive Datentypen, Strings, Objekte, die die Remote-Schnittstelle implementieren, bestimmte RMI-Klassen sowie Arrays all dieser Datentypen

- Problemlösungen
  - `bind` direkt auf der Registry aufrufen (siehe Folie 1–11)

```
Registry registry = LocateRegistry.createRegistry(12345);
registry.bind(name, vsproxy);
```

  - Eigene Klassen erlauben. Vor Aufruf von `createRegistry` einfügen:

```
System.setProperty("sun.rmi.registry.registryFilter", "vsue.**");
```

Rückrufe

- Beispielszenario [Vergleiche Übungsaufgabe 1]
  - Server-Seite

```
public interface VSAuctionService {
    public void registerAuction(VSAuction auction, int duration, VSAuctionEventHandler handler)
                                throws VSAuctionException;
    public VSAuction[] getAuctions();
    public boolean placeBid(String userName, String auctionName,
                            int price, VSAuctionEventHandler handler)
                            throws VSAuctionException;
}
```

  - Client-Seite

```
public interface VSAuctionEventHandler {
    public void handleEvent(VSAuctionEventType event, VSAuction auction);
}
```

→ Der Server muss den Client (per Fernaufruf) zurückrufen können

→ Dem Server muss eine Referenz auf den Client vorliegen

Probleme mit gewöhnlichen Referenzen bei Rückrufen

- Lokaler Methodenaufruf
  - Identischer Adressraum
  - Referenz auch in aufgerufener Methode gültig

  → Rückruf erfordert keine spezielle Betrachtung

- Fernaufruf
  - Unterschiedliche Adressräume
  - Referenz normalerweise nicht in aufgerufener Methode gültig
    [Ausnahme: z. B. „Distributed Shared Memory (DSM)“-Systeme]

  → Einfache Übertragung einer Referenz (meist) nicht sinnvoll

→ Spezielle Semantiken für Parameterübergabe bei Fernaufrufen notwendig

„Rückruf“ per **Call-by-Value-Result**

- Funktionsweise
  - Dem Server wird eine Kopie des Originalobjekts übergeben
  - Aufgerufene Methode kann Kopie modifizieren
  - Kopie wird an Client zurückgesendet
  - Originalobjekt wird durch Kopie ersetzt
- Vorteile
  - Einfache Implementierung ($\rightarrow$ Serialisierung)
  - Ermöglicht direkte Speicherzugriffe
- Nachteile
  - Gültigkeit der Referenz ist beschränkt auf Methodenausführung
  - Komplettes Objekt wird doppelt übertragen
  - Verkompliziert Synchronisation, Zugriff auf Ressourcen

Rückruf per **Call-by-Reference**

- Funktionsweise
  - Objekt wird auf Client-Seite für Fernaufrufe verfügbar gemacht
  - Dem Server wird als Parameter eine **Remote-Referenz** übergeben
  - Jeder Server-seitige Zugriff auf das Objekt erfolgt per Fernaufruf
  - Aufgerufene Prozedur kann Daten des Aufrufers direkt verändern
- Vorteile gegenüber Call-by-Value-Result
  - Speicherung der Referenz für spätere Verwendung möglich
  - Geringere zu übertragende Datenmenge bei großen Objekten mit wenigen Zugriffen
- Nachteil
  - Benötigt spezielle Unterstützung für Speicherzugriffe

Call-by-Reference in objektorientierten Programmiersprachen

- Funktionsweise
  - Objekt kapselt Daten
  - Idealfall: Zugriff nur über Methodenaufrufe
  - Übertragung einer Remote-Referenz führt auf Server-Seite zur Erzeugung eines Objekt-Stub
  - Server kann transparent auf das Originalobjekt zugreifen
- Einschränkung
  - Kein direkter Zugriff auf Objektzustand
  - z. B. keine „`public`“-Variablen

→ Problem ohne spezielle Unterstützung durch Betriebssystem bzw. Laufzeitumgebung lösbar

Verwaltung von Rückruf-{Stubs,Skeletons}

- Naiver Ansatz
  - Bei jeder Weitergabe einer Objektreferenz werden ein neuer Stub sowie ein neuer Skeleton erzeugt

  $\rightarrow$ Unnötig, falls dieselbe Objektreferenz mehrfach übertragen wird

- Mögliches Verfahren in Fernaufrufsystemen: Beidseitiger Einsatz von Hash-Tabellen
  - Client-Seite: Zuordnung lokaler Objektreferenzen auf Remote-Referenzen
  - Server-Seite: Abbildung von Remote-Referenzen auf Stubs

Wie lange sollen diese Informationen verfügbar gehalten werden?

Freigabe von Stubs und Skeletons

- Allgemein
  - Wo?
    - Auf Applikationsebene
    - Bei Rückrufen: Im Skeleton des Originalfernaufrufs (auf Server-Seite)
  - Wie?
    - Explizit: z. B. konkrete Anweisung
    - Implizit: z. B. Methodenende
    - Automatisiert: z. B. Garbage-Collection

- Java RMI
  - Reguläre Garbage Collection: Stub wird gelöscht, sobald keine Referenz mehr auf ihn verweist
  - Zusätzlich: Distributed Garbage Collection für Remote-Referenzen

Distributed Garbage Collection in Java RMI

- Jeder Server unterhält je einen Remote-Referenzen-Zähler auf von ihm bereitgestellte Remote-Objekte
  - `dirty()`-Methode
    - Inkrementiert den Zähler
    - Aufgerufen vom Client bei Stub-Erzeugung (per Fernaufruf)
  - `clean()`-Methode
    - Dekrementiert den Zähler
    - Aufgerufen vom Client bei Stub-Freigabe (per Fernaufruf)

- Lokal bereitgestelltes Remote-Objekt wird vom Server der Garbage Collection überlassen, sobald
  - keine lokalen Referenzen mehr auf das Objekt existieren **und**
  - der Remote-Referenzen-Zähler auf Null steht

- **Leases** im Kontext von Fernaufrufen:
  Garantie des Servers an den Client, dass ein bestimmtes Remote-Objekt für eine gewisse Zeit verfügbar ist

- Leases in Java RMI
  - Standarddauer pro Lease: 10 Minuten
  - Rückgabewert von `dirty()`-Aufrufen
  - Verlängerung durch erneuten Aufruf von `dirty()`
    [Erfolgt üblicherweise nach Ablauf der Hälfte der Lease-Dauer.]
  - Ablauf eines Lease
    - Dekrementieren des entsprechenden Remote-Referenzen-Zählers
    - Bei Bedarf: Garbage-Collection des Stubs

→ Leases sind eine Absicherung des Servers gegen Verbindungsausfälle und Client-Abstürze

Evaluation von Systemen

- Analyse des eigenen Systems
  - Leistungsfähigkeit
  - Antwortzeit
  - Durchsatz
  - Ressourcenverbrauch
  - Dienstgüte-Garantien
  - ...
- Vergleich mit anderen Systemen
  - Wie verhalten sich die unterschiedlichen Systeme in bestimmten Situationen?
  - Wo liegen die jeweiligen Stärken und Schwächen?
  - Ab welchen Punkten ist das eine bzw. das andere System besser?
  - ...

Unterscheidung

- Simulation
  - Messungen an einem Simulator, der das gewünschte Verhalten so gut wie möglich imitiert
  - \+ Oftmals einfach zu realisieren
  - \- Ergebnisse spiegeln eventuell nicht exakt die Realität wider
- Evaluation
  - Messungen an einem konkreten System (bzw. Prototyp)
  - \- Im Allgemeinen aufwändiger zu realisieren
  - \+ Ergebnisse entstammen einem realistischen Szenario

→ Evaluationen besitzen mehr Aussagekraft als Simulationen

Mögliche Probleme

- Nicht bzw. schwer zu evaluierende Merkmale
  - Eingeschränkte Quantifizierungsmöglichkeiten
  - Merkmal ist nicht isoliert messbar
  - ...
- Fehlende Vergleichsmöglichkeiten
  - Eigene Variante ist konkurrenzlos [Eher selten der Fall.]
  - Andere Varianten besitzen abweichenden Fokus
  - ...
- Beispiel: Effizienz vs. Fehlertoleranz
  - Aussagen über das Ausmaß von Fehlertoleranz können oft nicht durch Messergebnisse gestützt werden, stattdessen: oberflächliche Beschreibung (z. B. Anzahl und Art tolerierbarer Fehler)
  - Fehlertoleranz ist (fast) immer mit Effizienzeinbußen verbunden

  → Der durch den Einsatz fehlertoleranter Systeme erreichbare Gewinn lässt sich schlechter evaluieren als die damit verbundenen Verluste

Vorgehensweise

- Vorbereitung
  - Konzipierung der Evaluationsszenarien
  - Dokumentation der Evaluationsszenarien, -umgebung
  - Formulierung einer Erwartungshaltung
- Durchführung
  - Abarbeitung der vorbereiteten Szenarien
  - Sammlung der Messergebnisse
- Nachbereitung
  - Aufbereitung der Ergebnisse (z. B. in Diagrammen)
  - Beschreibung der Ergebnisse (textuell)
  - Interpretation der Resultate
  - Abgleich der Resultate mit der Erwartungshaltung

Messungen

- Mögliche Fehlerquellen
  - Existenz einer Aufwärmphase mit atypischen Systemeigenschaften
  - Verfälschung von Messungen durch unbeabsichtigtes Caching
  - Erhöhte Netzwerklatenzen aufgrund außergewöhnlicher Lastsituationen
  - Verzögerungen durch Log- bzw. Debug-Ausgaben
  - Beeinflussung des Systems durch die Messung selbst
  - ...

- Maßnahmen zur Kompensation
  - Messungen später beginnen (nicht bereits ab dem Zeitpunkt 0)
  - Messungen mehrfach durchführen
  - Verwendung von externen Messgeräten/-programmen
  - Geschickte Wahl der Messgrößen, z. B. CPU-Zyklen statt Zeit
  - Passende Wahl der Analysegrößen bei der Nachbereitung, z. B. Median vs. arithmetisches Mittel

Zeitmessung in Java

- Verfügbare Methoden (`java.lang.System`)
  - Aktuelle Zeit in Millisekunden auf Basis der Systemzeit
    ```
    public static long currentTimeMillis();
    ```
  - Aktuelle Zeit in Nanosekunden auf Basis präziser(er) Zähler des Betriebssystems
    ```
    public static long nanoTime();
    ```
- Hinweise
  - Beide Methoden verwenden die Zeitmessung des Betriebssystems
  - Methoden brauchen selbst Zeit zur Ausführung

→ Die versprochene Granularität wird (eventuell) nicht erreicht!

> "This method provides nanosecond precision, but **not necessarily nanosecond resolution** [...] - no guarantees are made except that the resolution is at least as good as that of currentTimeMillis()."
>
> "Differences in **successive calls that span greater than approximately 292 years** (2^{63} nanoseconds) will **not correctly compute elapsed time** due to numerical overflow."

[Auszug aus der Java-Dokumentation zu `System.nanoTime()`]