

Verteilte Systeme – Übung

Stubs & Skeletons

Sommersemester 2023

Laura Lawniczak, Harald Böhm, Tobias Distler

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl Informatik 4 (Verteilte Systeme und Betriebssysteme)
Lehrstuhl Informatik 16 (Systemsoftware)

<https://sys.cs.fau.de>



Lehrstuhl für Verteilte Systeme
und Betriebssysteme



FRIEDRICH-ALEXANDER
UNIVERSITÄT
ERLANGEN-NÜRNBERG

TECHNISCHE FAKULTÄT

Aufgabe 2

Java Reflection API

Stubs & Skeletons

- Dynamische Proxies als Stubs

- Generische Skeletons

- Identifikation von Remote-Objekten

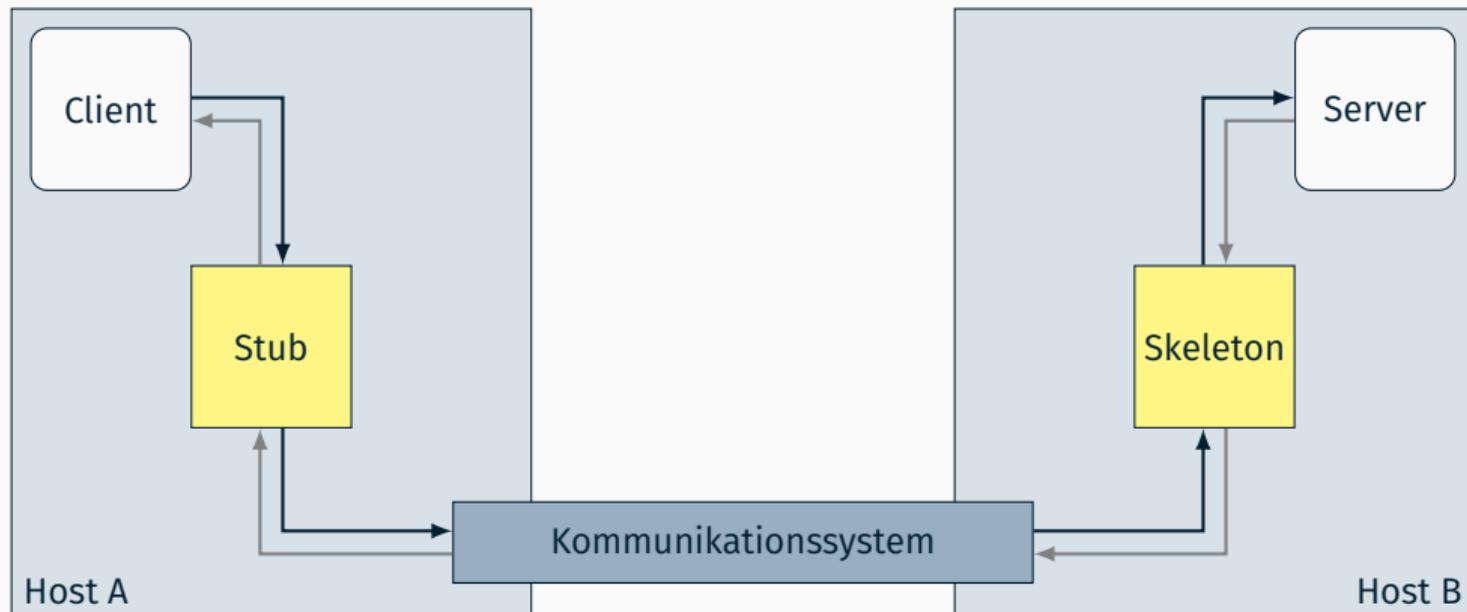
Rückrufe

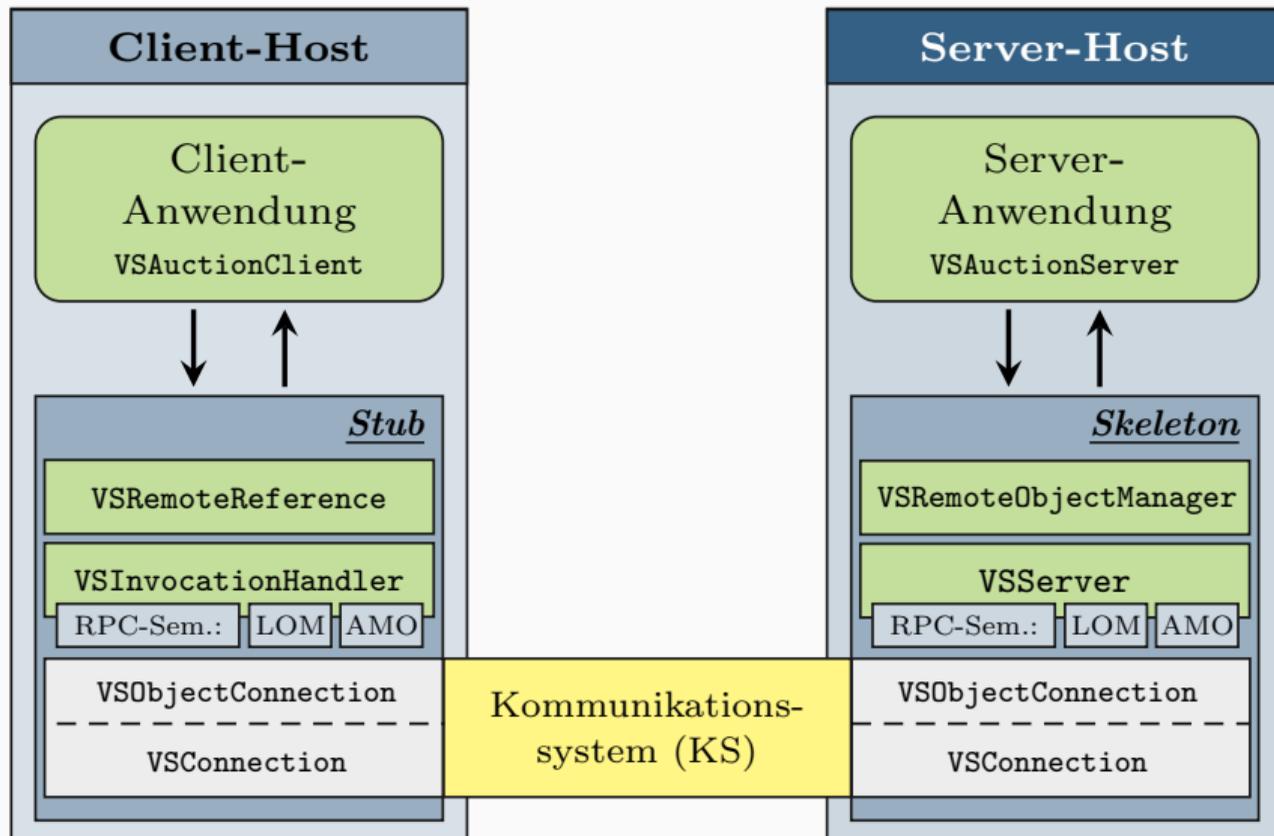
Evaluation von Systemen

Aufgabe 2

Übungsaufgabe 2

- Dynamische Stubs und Skeletons
- Unterstützung von Rückrufen





- 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]

- 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
→ 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);  
    }  
}
```

■ 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 Methodennamen und -parameter des ursprünglichen Aufrufs
 - Rückgabewert von `invoke()` → 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 `VSHelloInvoker` 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
→ 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

■ Idee

- Gemeinsame Skeleton-Implementierung für alle Fernaufrufe
- Methodenaufrufe per Java Reflection API

■ Problemstellung: Wie finde ich die richtige Methode?

- Methodename 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( // Methodename
    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

- 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

```
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

■ 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

■ 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 (→ 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

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

■ 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

- 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?
 - ...

■ 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

- 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

- 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

■ 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 t_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

■ 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.”