Verteilte Systeme – Übung

Aufgabe 1: Java RMI

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 1: Java RMI

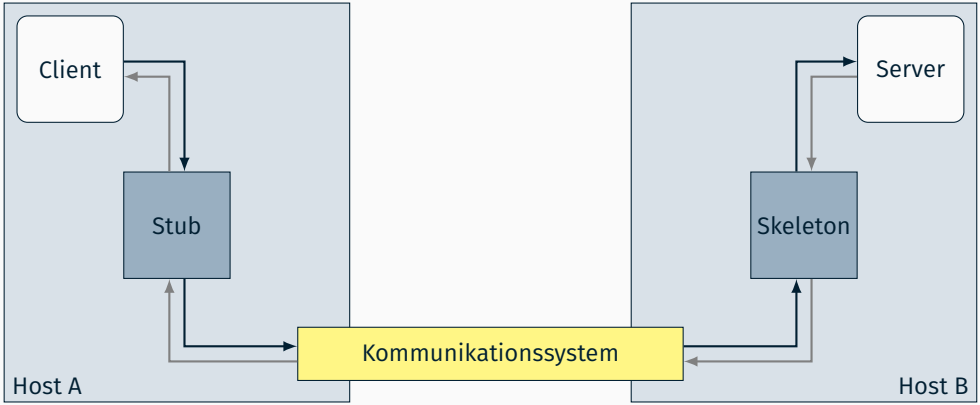
Java Remote Method Invocation

- Beispiel

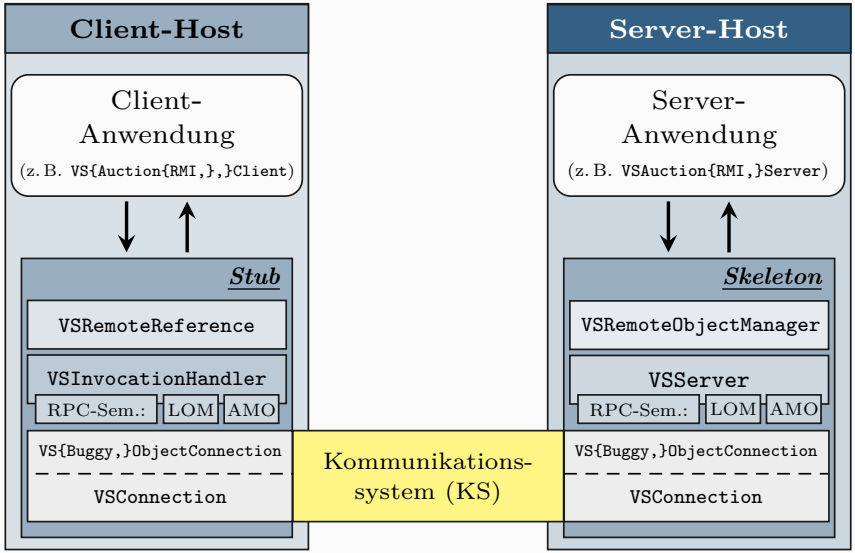
Marshalling und Unmarshalling

Verteilte Systeme: Übungsaufgaben 1-3

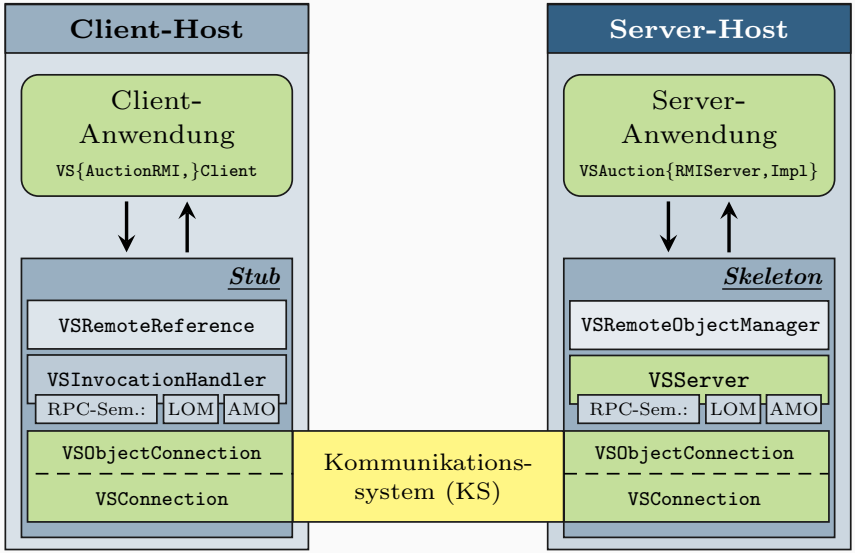
- Entwicklung eines eigenen Fernaufrufsystems
- Orientierung an Java RMI



Gesamtüberblick (Übungsaufgaben 1 bis 3)



Übungsaufgabe 1



Programmieren mit Java RMI

- Beispielanwendung: Auktionsdienst

```
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;
}
```

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

  - `registerAuction()` Registrieren einer neuen Auktion
  - `getAuctions()` Abfragen aller laufenden Auktionen
  - `placeBid()` Neues Gebot für eine laufende Auktion abgeben

- Verteilung mittels Java RMI
  - Server
    - Bereitstellung der Anwendung als Remote-Objekt
    - Bekanntmachen des Diensts bei einer Registry
  - Client
    - Zugriff auf den Dienst über Fernaufrufe
    - Interaktion mit dem Nutzer per Kommandozeile

Implementierung der Kommunikationsschicht

- Übertragung von Datenpaketen

```
public class VSConnection {
    public void sendChunk(byte[] chunk);
    public byte[] receiveChunk();
}
```

  - Senden und Empfangen von Byte-Arrays beliebiger Länge
  - Übermittlung von Daten über eine TCP-Verbindung

- Übertragung von Objekten

```
public class VSObjectConnection {
    public void sendObject(Serializable object);
    public Serializable receiveObject();
}
```

  - Senden und Empfangen von beliebigen Objekten
  - Marshalling und Unmarshalling

- Ziel: Minimierung der über das Netzwerk zu übertragenden Daten
- Ausgangspunkt
  - Analyse der vom `ObjectOutputStream` erzeugten Daten
  - Beispielklasse

```
public class VSTestMessage implements Serializable {
    private int integer;
    private String string;
    private Object[] objects;
}
```

- Reduzierung der benötigten Datenmenge
  - Anwendung der Schnittstelle `Externalizable`
  - Manuelle Implementierung der {S,Des}erialisierungmethoden
- Hinweis: Ausgabe eines Byte-Array als Zeichenkette in Eclipse

```
byte[] chunk = [...];
System.out.println(new String(chunk).replace("\0", "\ufffd"));
```

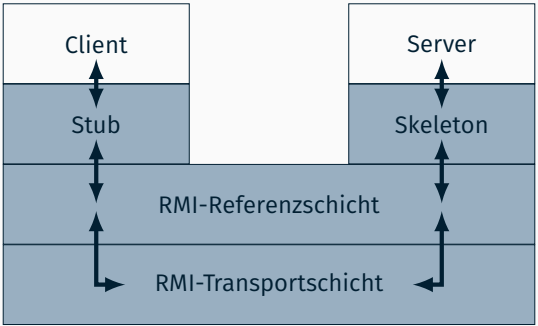
Java Remote Method Invocation

Methodenfernaufruf

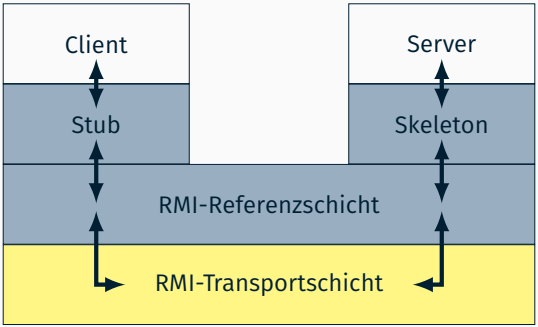
- Remote Method Invocation (RMI)
  - Aufrufe von Methoden an Objekten auf anderen Rechnern
  - *Remote-Referenz*: Transparente Objektreferenz zu entferntem Objekt

```
// Lokaler Aufruf
localReference.method();
// Fernaufruf
remoteReference.method();
```

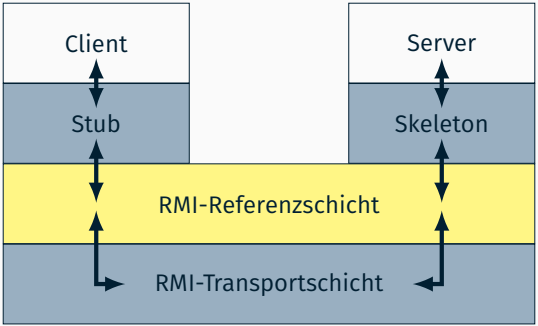
- Beispiel: Java RMI



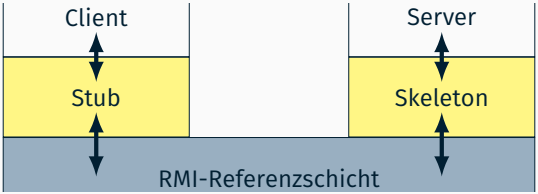
- Datenübertragung zwischen Rechnern
- Implementierung
  - Aktueller Standard: Verwendung von TCP/IP-Sockets
  - Generell: Verschiedene Transportmechanismen denkbar



- Verwaltung von Remote-Referenzen
- Implementierung der Aufrufsemantik (Beispiele)
  - Unicast, Punkt-zu-Punkt
  - Strategien zum Wiederaufbau der Verbindung nach einer Unterbrechung



- Stub
  1. erhält einen Objekt-Ausgabe-Strom von der RMI-Referenzschicht
  2. schreibt die Parameter in diesen Strom
  3. weist die RMI-Referenzschicht an, die Methode aufzurufen
  4. holt einen Objekt-Eingabe-Strom von der RMI-Referenzschicht
  5. liest das Rückgabe-Objekt aus diesem Strom
  6. liefert das Rückgabe-Objekt an den Aufrufer
- Skeleton
  1. erhält einen Objekt-Eingabe-Strom von der RMI-Referenzschicht
  2. liest die Parameter aus diesem Strom
  3. ruft die Methode am implementierten Objekt auf
  4. holt einen Objekt-Ausgabe-Strom von der RMI-Referenzschicht
  5. schreibt das Rückgabe-Objekt in diesen Strom

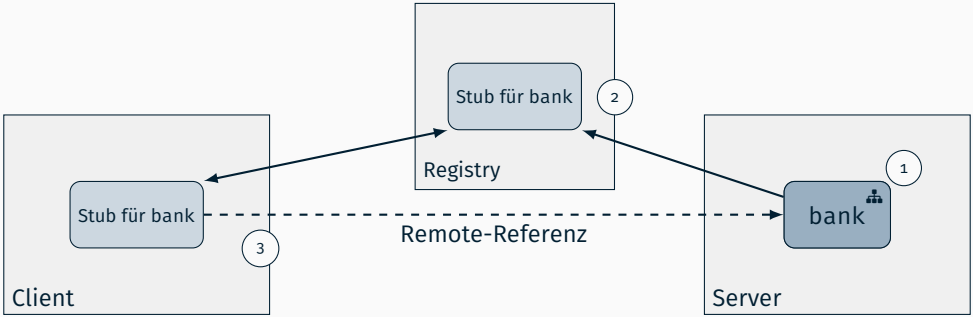


- *Remote-Objekt* (entferntes Objekt)
  - Kann aus einer anderen Java Virtual Machine heraus genutzt werden
  - Erst von außerhalb erreichbar, nachdem es **exportiert** wurde
- *Remote-Schnittstelle*
  - Beschreibt die per Fernaufruf erreichbaren Methoden des Objekts
  - Abgeleitet von `java.rmi.Remote` (Marker-Schnittstelle)
  - Einzige Möglichkeit mit Java RMI auf ein entferntes Objekt zuzugreifen
- *Remote-Exception* (`java.rmi.RemoteException`)
  - Muss im `throws`-Clause jeder Remote-Methode angegeben sein
  - Beim Auftreten einer Remote-Exception weiß der Aufrufer nicht, ob die Methode komplett, teilweise oder gar nicht ausgeführt wurde

Java Remote Method Invocation

Beispiel

1. Exportieren
   - Lokales Objekt als Remote-Objekt exportieren
2. Bekannt machen
   - Remote-Objekt über eine Registry bekannt machen
   - (**oder**) Remote-Objekt direkt verschicken
3. Ausführen
   - Fernaufruf auf Remote-Referenz ausführen



- Geldbetrag `VSMoney`

```
public class VSMoney implements Serializable {
    private float amount;

    public VSMoney(float amount) {
        this.amount = amount;
    }

    public float getAmount() {  return amount;  }
}
```

- Konto `VSAccount` (Remote-Schnittstelle)

```
public interface VSAccount extends Remote {
    public void deposit(VSMoney money) throws RemoteException;
}
```

- Bank `VSBank` (Remote-Schnittstelle)

```
public interface VSBank extends Remote {
    public void deposit(VSMoney money, VSAccount account) throws RemoteException;
}
```

- `VSBankImpl`: Implementierung der Remote-Schnittstelle `VSBank`
- Exportieren des Remote-Objekts
  - Implizit: Unterklasse von `java.rmi.server.UnicastRemoteObject`

```
public class VSBankImpl extends UnicastRemoteObject implements VSBank {
   // Konstruktor
   public VSBankImpl() throws RemoteException { super(); }

   // Implementierung der Remote-Methode
   public void deposit(VSMoney money, VSAccount account) throws RemoteException {
       account.deposit(money);
   }
}
```

```
VSBank bank = new VSBankImpl();
```

  - Explizit: Aufruf von `UnicastRemoteObject.export()`

```
public class VSBankImpl implements VSBank { [...] }
```

```
VSBank b = new VSBankImpl();
VSBank bank = (VSBank) UnicastRemoteObject.exportObject(b, 0);
```

- Konto-Implementierung `VSAccountImpl`
  - Implementierung der Remote-Schnittstelle `VSAccount`
  - Exportieren analog zu `VSBankImpl`
  - Synchronisation paralleler `deposit()`-Aufrufe
  - [Auf welchem Rechner erscheint die Bildschirmausgabe?]

```
public class VSAccountImpl implements VSAccount {
    private float amount;

    public VSAccountImpl(float amount) {
        this.amount = amount;
    }

    public synchronized void deposit(VSMoney money) {
        amount += money.getAmount();
        System.out.println("New amount: " + amount);
    }
}
```

- Namensdienst
  - Bekanntmachen von Remote-Objekten
  - Abbildung von Objektnamen auf Objektreferenzen
- Registry-Schnittstelle

```
public interface Registry extends Remote {
    public void bind(String name, Remote obj);
    public Remote lookup(String name);
    [...]
}
```

  - `bind()` Zuordnung eines Objekts zu einem eindeutigen Namen
  - `lookup()` Rückgabe der Remote-Referenz zu einem Namen
- Erzeugung und Verbindung zur Registry

```
public class LocateRegistry {
    public static Registry createRegistry(int port);
    public static Registry getRegistry(String host, int port);
    [...]
}
```

  - `createRegistry()` Erzeugung einer Registry auf dem lokalen Rechner
  - `getRegistry()` Holen einer Remote-Referenz auf eine Registry

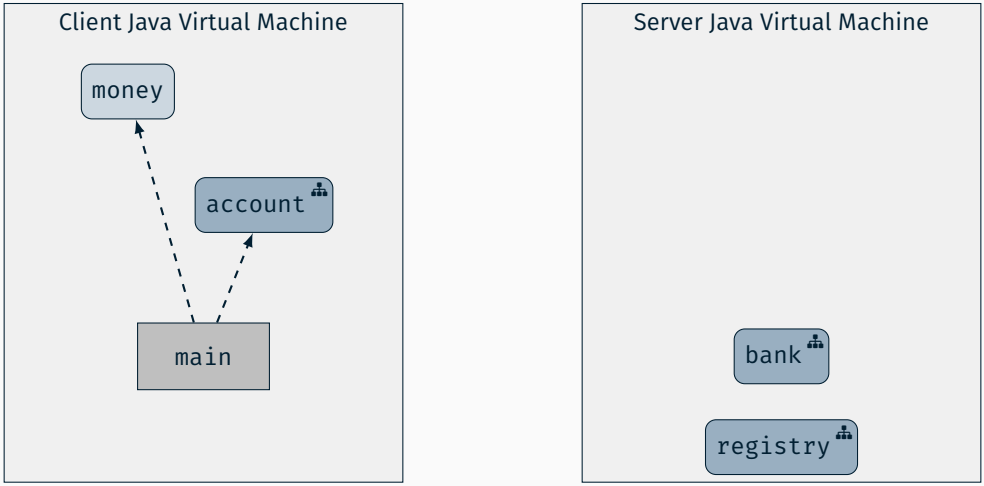
- Server-Implementierung `VSBankServer`
  - Erzeugen des Remote-Objekts
  - Exportieren des Remote-Objekts
  - Remote-Objekt mittels Registry bekannt machen

```
public class VSBankServer {
    public static void main(String[] args) throws Exception {
        // Remote-Objekt erzeugen
        VSBank bankImpl = new VSBankImpl();

        // Remote-Objekt auf Port 12678 exportieren
        VSBank bank = (VSBank) UnicastRemoteObject.exportObject(bankImpl, 12678);

        // Remote-Objekt bekannt machen
        Registry registry = LocateRegistry.createRegistry(12345);
        registry.bind("bank", bank);

        // Prozess weiterlaufen lassen
        Thread.sleep(Long.MAX_VALUE);
    }
}
```

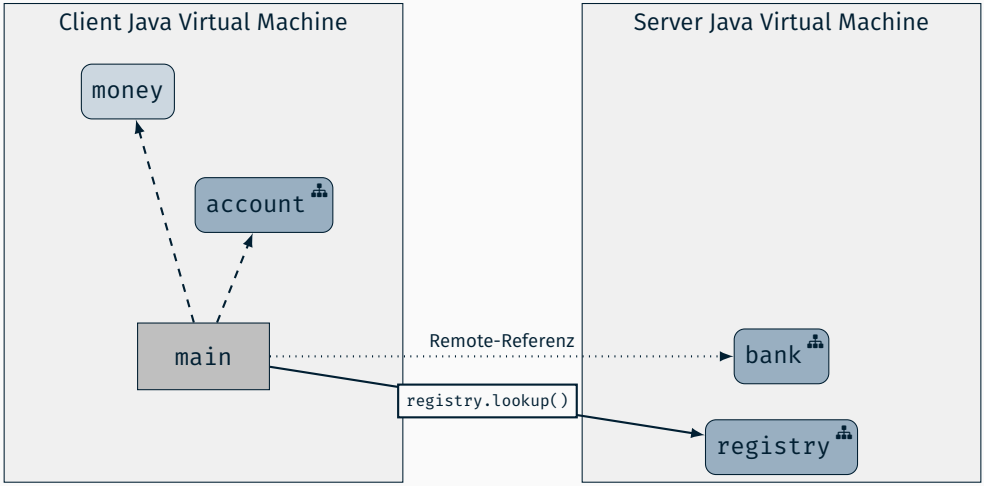
- Client-Implementierung `VSBankClient`

```java
public class VSBankClient {
    public static void main(String[] args) throws Exception {
        // Geldbetrag-Objekt anlegen
        VSMoney money = new VSMoney(10.0f);

        // Account anlegen und exportieren
        VSAccount accountImpl = new VSAccountImpl(100.0f);
        UnicastRemoteObject.exportObject(accountImpl, 0);

        // Remote-Referenz holen (Annahme: Server auf faui05a)
        Registry registry = LocateRegistry.getRegistry("faui05a", 12345);
        VSBank bank = (VSBank) registry.lookup("bank");

        // Geld einzahlen
        bank.deposit(money, accountImpl);

        // Account freigeben
        UnicastRemoteObject.unexportObject(accountImpl, true);
    }
}
```

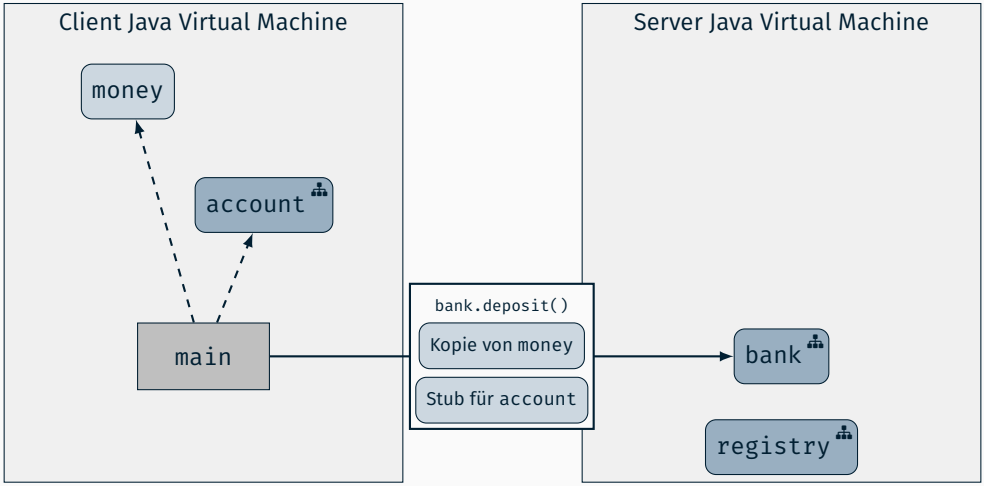
- Ausgangssituation vor Registry-Zugriff des Client



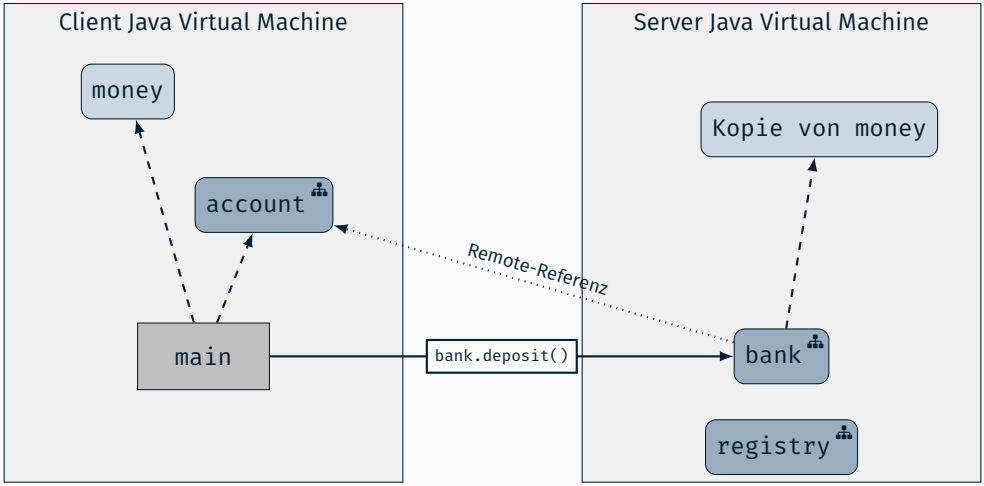
- Remote-Referenz auf `bank` von Registry holen



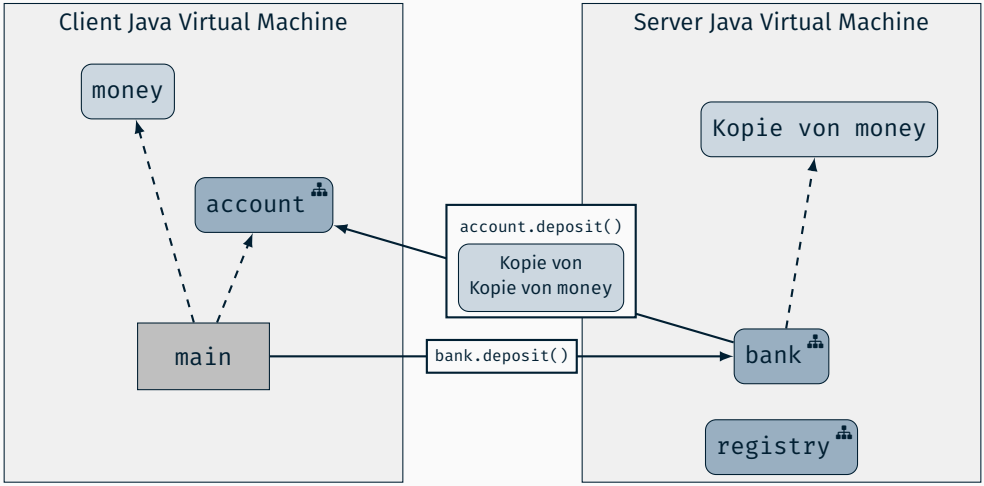
- Methodenaufruf von `bank.deposit()`



- Nach dem Auspacken der Parameter



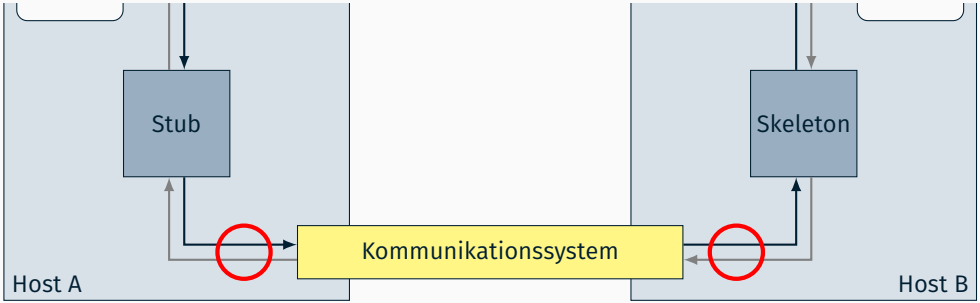
- Methodenaufruf von `account.deposit()`



Marshalling und Unmarshalling

Marshalling und Unmarshalling

- Definition
  - *Marshalling*: Verpacken von Informationen in einer Nachricht
  - *Unmarshalling*: Auspacken von Informationen aus einer Nachricht
- Problemstellungen
  - Unterschiedliche Datentypen
  - Heterogenität bei der lokalen Repräsentation von Datentypen



Unterschiedliche Datentypen

- Primitive Datentypen
  - z. B. `char`, `boolean`, `int`, ...
- Benutzerdefinierte Datentypen
  - z. B. `classes`
- Felder
  - z. B. `int[47]`, `Strings`
- Referenzen
  - z. B. `Object ref = new Object(); Object refDup = ref;`
- Ressourcen
  - z. B. `Threads`, Dateien, `Sockets`, ...
- ...

$\Rightarrow$ **Kein allgemeines Vorgehen möglich**

Heterogenität

- Byte-Reihenfolgeproblem
  - Big Endian (Network Byte Order)
    - Most-significant byte first
    - z. B. SPARC, Motorola
  - Little Endian
    - Least-significant byte first
    - z. B. Intel x86
- Repräsentation von Fließkommazahlen
  - Allgemein
    - Vorzeichen (s)
    - Mantisse (m)
    - Exponent (e)
    - Zahlenwert: $(-1)^s * m * 2^e$
  - Variationsmöglichkeiten
    - Anzahl der Bits für m und e
    - Speicherreihenfolge von m, e und s
    - Byte-Order
- Beispiel
  - `12345 =` `0x 30 39`
  - Big Endian: `00 00 30 39`
  - Little Endian: `39 30 00 00`

- Kanonische Repräsentation
  - Nutzung einer allgemeingültigen Form als Zwischenrepräsentation
  - z. B. IEEE-Standard

  ⇒ Eventuell unnötige Konvertierungen
  [z. B. wenn Sender und Empfänger identische Repräsentation nutzen]

- „Sender makes it right“
  - Sender kennt Datenrepräsentation des Empfängers
  - Sender konvertiert Daten

  ⇒ Multicast an heterogene Gruppe nicht möglich

- „Receiver makes it right“
  - Kennzeichnung des Datenformats
  - Empfänger konvertiert Daten

  ⇒ Bereitstellung sämtlicher Konvertierungsroutinen notwendig
  [Unproblematisch für Byte-Order-Konvertierung]

- Hilfsklasse `java.nio.ByteBuffer`

```
public abstract class ByteBuffer [...] {
    public static ByteBuffer allocate(int capacity);
    public static ByteBuffer wrap(byte[] array);
    public byte[] array();
    public ByteBuffer put<Datentyp>(<Datentyp> value);
    public <Datentyp> get<Datentyp>();
    [...]
}
```

  - `allocate()` Anlegen eines neuen (leeren) Byte-Array
  - `wrap()` Verwendung eines bestehenden Byte-Array
  - `array()` Rückgabe des vom Puffer verwendeten Byte-Array
  - `put*(), get*()` Einfügen bzw. Lesen von Daten aus dem Puffer

- Beispiel: {S,Des}erialisierung eines `double`-Werts

```
double d = 0.47;
ByteBuffer buffer1 = ByteBuffer.allocate(Double.BYTES);
buffer1.putDouble(d);
byte[] byteArray = buffer1.array();
```

```
ByteBuffer buffer2 = ByteBuffer.wrap(byteArray);
double d2 = buffer2.getDouble();
```

- Objekt ⇔ Stream: `java.io.Object{Out,In}putStream`

```
public class ObjectOutputStream [...] {
    public ObjectOutputStream(OutputStream out);
    public void writeObject(Object obj); // Objekt serialisieren
    [...]
}
```

```
public class ObjectInputStream [...] {
    public ObjectInputStream(InputStream in);
    public Object readObject(); // Objekt deserialisieren
    [...]
}
```

- Stream ⇔ Byte-Array: `java.io.ByteArray{Out,In}putStream`

```
public class ByteArrayOutputStream extends OutputStream {
    public byte[] toByteArray(); // Rueckgabe des Byte-Array
    [...]
}
```

```
public class ByteArrayInputStream extends InputStream {
    public ByteArrayInputStream(byte buf[]);
    [...]
}
```

- Automatisierte {S,Des}erialisierung: `java.io.Serializable`
  - Muss von jedem Objekt implementiert werden, das von einem `Object{Out,In}putStream` serialisiert bzw. deserialisiert werden soll
  - Marker-Schnittstelle → keine zu implementierenden Methoden

⇒ {S,Des}erialisierung wird vom `Object{Out,In}putStream` übernommen

- Manuelle {S,Des}erialisierung: `java.io.Externalizable`
  - Klassenspezifische {S,Des}erialisierung

```
public interface Externalizable extends Serializable {
    void writeExternal(ObjectOutput out);
    void readExternal(ObjectInput in);
}
```

  - `writeExternal()` Objekt serialisieren
  - `readExternal()` Objekt deserialisieren
  - Objekt muss öffentlichen Konstruktor ohne Argumente bereitstellen

⇒ {S,Des}erialisierung wird vom Objekt selbst übernommen

- Einige Attribute einer Klasse sollen nicht serialisiert werden
  - Sicherheitsaspekte
  - Effizienzüberlegungen
- Einige Objekte können nicht serialisiert & deserialisiert werden, da sich ihr Zustand nicht so ohne weiteres wiederherstellen lässt
  - `FileInputStream`
  - `Socket`, `ServerSocket`
  - `Thread`

⇒ Schlüsselwort `transient`

- Mit `transient` gekennzeichnete Attribute werden bei der automatischen {S,Des}erialisierung vom `Object{Out,In}putStream` ignoriert
- Beispiel

```
public class TransientExample implements Serializable {
    private transient Thread t = new Thread();
}
```