Literatur

- J. Nehmer, P. Sturm
  Grundlagen moderner Betriebssysteme.
  dpunkt, 2001.
- S. Mullender
  Distributed Systems (2nd edition).
  ACM Press, 1993.
- A. S. Tanenbaum, M. van Steen
  Distributed Systems.
  Prentice Hall, 2002.
- A. D. Birrel, B. J. Nelson
  Implementing Remote Procedure Calls.
  ACM Transactions on Computer Systems, 2(1), pp. 39–59, 1984.
- M. J. Flynn
  Some Computer Organizations and Their Effectiveness.
  IEEE Transactions on Computers , C-21, pp. 948–960, 1972.

Verteilte Systeme

Distributed System

- Definition nach Tanenbaum und van Renesse:
  - It looks like an ordinary centralized system.
  - It runs on multiple, independent CPUs.
  - The use of multiple processors should be invisible (transparent).
- Definition nach Mullender
  - Zusätzlich: Not any single points of failures
- Lamport über verteilte Systeme
  - „*A distributed system is one in which the failure of a computer you didn't even know existed can render your own computer unusable.*“

Definitionen sind nicht präzise

- Manchmal ist es schwierig, ein lokales bzw. verteiltes System zu identifizieren
- Definitionen basieren oft auf bestimmten Eigenschaften, die gerade wichtig erscheinen

Verteilte Systeme

Eigenschaften verteilter Systeme

- Physikalische Verteiltheit der Hardware
- Gemeinsame Nutzung von Ressourcen
- Heterogenität – Hardware (Netzerwerk, Prozessor, etc.) und Software (Betriebssystem, Programmiersaprache)
- Nebenläufigkeit – gemeinsame Nutzung von Betriebsmitteln
  - z.B., mehrere Clients benutzen einen Server;
    Server ist mehrfädig ausgelegt

Verteilte Systeme

Wünschenswerte Eigenschaften verteilter Systeme

- Offenheit
  - Einheitliche Schnittstellen und Protokolle
- Skalierbarkeit
  - Verschiedene Dimension von Skalierbarkeit:
    - Größe, Ausbreitung und Verwaltbarkeit
- Transparenz
- Sicherheit

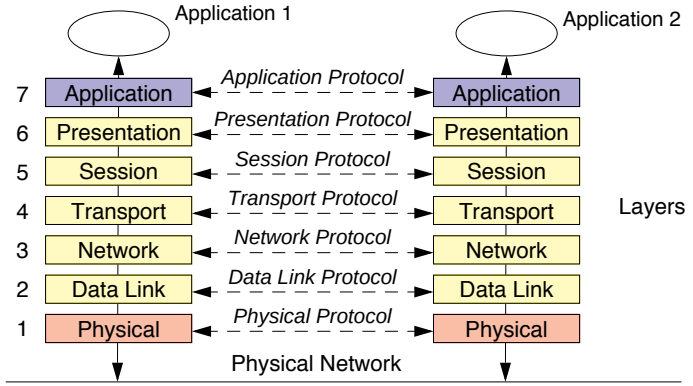
Verteilte Systeme

Transparenz

- **Netzwerktransparenz**
  - **Zugriffstransparenz** – Zugriff auf lokale und entfernte Betriebsmittel unter Verwendung identischer Operationen.
  - **Ortstransparenz** – Zugriff auf Betriebsmittel, ohne ihre Position bzw. ihren Ort kennen zu müssen
- Nebenläufigkeitstransparenz
- Replikationstransparenz
- Fehlertransparenz

Kommunikationsmodelle

Protokollschichten nach dem ISO OSI Referenzmodell



Klassifikation

Synchronität

- Wird der Sender blockiert bis der Empfänger die Nachricht hat, oder nicht?

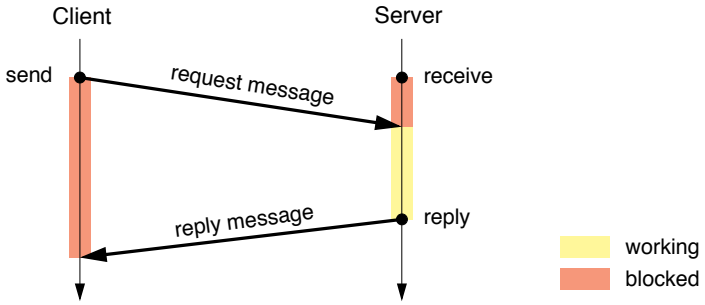
Interaktionsmuster

- **Message Passing** – eine Nachricht wird von einem Teilnehmer an einen anderen gesendet
- **Request-Reply** (Client-Server) Interaktion – Nachricht an einen Empfänger und Nachricht zurück an den ursprünglichen Absender

Adressaten

- **Ein** Empfänger
- **Mehrere** Empfänger (Gruppenkommunikation, Multicast, Broadcast)

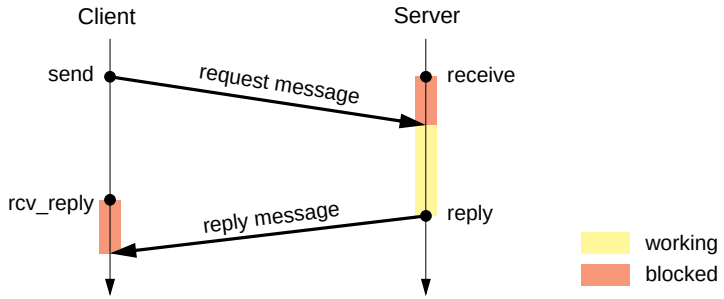
Synchrones Request-Reply Modell



Request-Reply Interaktion bzw. synchrones Senden

- Sender wartet bis Antwort-Nachricht empfangen wurde
- Empfänger ist blockiert bis eine Nachricht eintrifft
- Client und Server arbeiten nicht nebenläufig
- Zum Beispiel: Remote Procedure Call (RPC)

Asynchrones Request-Reply Modell



Request-Reply Interaktion bzw. asynchrones Senden

- Client und Server arbeiten nebenläufig
- Basis für Gruppenkommunikation

Zuverlässigkeit

Nachrichten können verloren gehen wenn keine zuverlässige Verbindung benutzt wird

- zuverlässige Verbindungen benutzen Acknowledge-Nachrichten (ACK)
- für einfache Nachrichtenübertragung großer Overhead

⇒ Zuverlässigkeit mit Request-Reply Interaktionsmodell kombinieren

Mögliche Fehler

- Server Crash (Server verliert alle Informationen über frühere Anfragen)
- Anfrage-Nachricht geht verloren
- Antwort-Nachricht geht verloren

Ideale Semantik

- **exactly-once** die Anfrage wird genau einmal auf Serverseite bearbeitet

Zuverlässigkeit

At-Least-Once Semantik

- Anfrage wird einmal oder mehrmals bearbeitet
- Client bekommt nie eine Fehlermeldung aber er erkennt eventuell, dass die Anfrage mehrfach bearbeitet wurde:
  Operationen müssen idempotent sein!

Implementation

- Wenn der Client nach einiger Zeit (time-out) keine Antwort erhält, wiederholt er die Anfrage
  - Keine zusätzliche Funktionalität auf Server-Seite erforderlich
  - Server darf wiederholte Anfrage aber ignorieren, wenn er sie erkennen kann

Zuverlässigkeit

At-Most-Once Semantik

- Die Anfrage wird höchstens einmal (oder überhaupt nicht) bearbeitet

Einfache Implementation (nur auf der Client-Seite)

- wenn das Ergebnis innerhalb einer bestimmten Zeit nicht eintrifft wird dem Aufrufer eine Fehlermeldung zurückgegeben
- sonst wird das Ergebnis zurückgegeben (exactly-once Semantik)

Zuverlässigkeit

At-Most-Once Semantik (Fortsetzung)

Komplexere Implementation

- Client wiederholt Nachricht nach einem Time-out (verdeckt Nachrichtenverlust auf der Verbindung)
- Client muss Server-Abstürze erkennen (Fehlermeldung an den Aufrufer, at-most-once Semantik)
- Server hebt Antworten auf (Wiederholung bei Verlust der Nachricht)
- Server muss alte Anfragen nach einem Absturz erkennen und ignorieren
- wenn das Ergebnis zurückgegeben wird, haben wir exactly-once Semantik

Remote Procedure Calls

Request-Reply-Modell kann für die Implementierung von RPCs genutzt werden [Birrell and Nelson 1984]

- statt eine Anfrage zu senden wird eine Remote-Prozedur aufgerufen
- statt einer Antwort erhält man die Ergebnisse des Aufrufs

Aufruf einer Prozedur ist ortstransparent

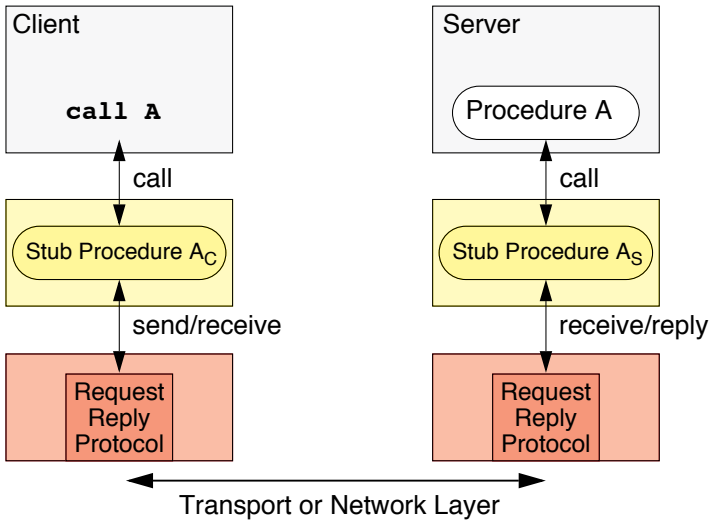
- Syntax für lokale und remote Aufrufe kann identisch sein
- sehr intuitiv
- keine expliziten `send()`- und `receive()`-Anweisungen erforderlich

Implementierung von RPCs

- Stub-Prozeduren auf Client- und Server-Seite

Remote Procedure Calls

Implementierung von RPCs mit Stub-Prozeduren



Remote Procedure Calls

Client-Stub

- Marshalling der Parameter (Zusammenstellen einer Anfrage-Nachricht)
- Senden der Anfrage-Nachricht
- Warten auf die Antwort-Nachricht
- Unmarshalling des Ergebnisses
- Implementierung der Zustell-Semantik

Server-Stub

- Unmarshalling der Parameter
- Implementierung der Zustell-Semantik
- Warten auf die Antwort
- Marshalling des Ergebnisses
- Senden der Antwort-Nachricht

Remote Procedure Calls

Probleme bei RPCs

- Marshalling der Parameter
  - Zahl und Typen sollten bekannt sein sowie ihre Codierung
- Parameter-Übergabe-Semantik
  - **Call-by-value/result**: unproblematisch
  - **Call-by-reference**: wie implementieren?
- keine globalen Variablen
- Semantik – keine exactly-once Semantik
- Performance
  - keine Nebenläufigkeit
  - große Parameter-Daten
  - kurze Prozeduren
  - Antwortzeiten

Remote Procedure Calls

Automatische Erzeugung von Stub-Prozeduren

- Parameter-Marshalling
- Client-Stub
- Server-Stub Prozedur
- Server-Schleife zum Warten auf Anfragen

Binden von Client-Stubs an Server-Stubs

- Server-Stub hat Netzwerk-Adresse, die Client-Stub kennen muss
- Problem: woher kennt der Client den Server?

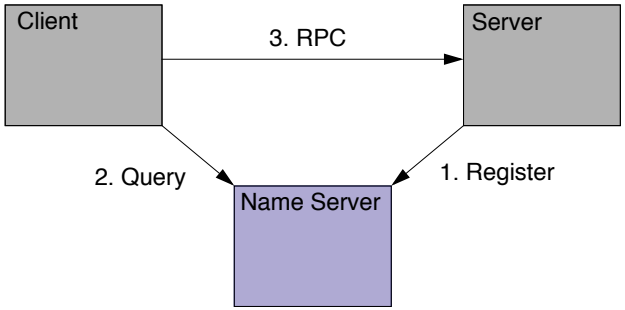
Name-Server

- Symbolische Namen werden in Netzwerk-Adressen umgesetzt

Name-Server und Binden

Bekannter Name-Server wandelt Namen in Adressen um

- Client kennt Namen seines Servers und die Adresse eines Name-Servers
- Name-Server wandelt Namen in eine (dynamische) Netzwerk-Adresse um
- Client kann sich immer an Server binden
- Server muss seine Netzwerkadresse beim Name-Server registrieren



OO Verteilte Anwendungen

Objektorientierte Anwendungen im verteilten System

- Verteilung auf
  - verschiedene Rechner
  - verschiedene Prozessoren
  - verschiedene virtuelle Maschinen
  - verschiedene Adressräume
- Objektinteraktionen zwischen objektorientierten Programmen oder Aufteilung eines Programmes in interagierende Programmteile?

OOP und Verteilung

Formen/Ausprägungen von Objektinteraktion im Verteilten System

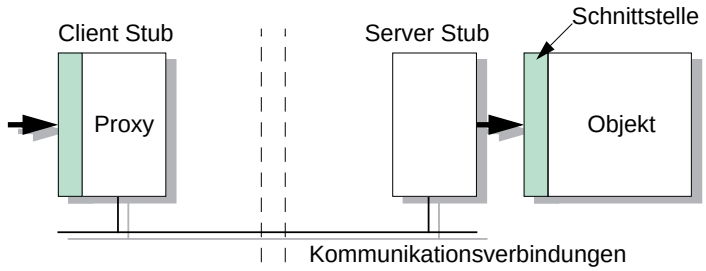
- explizit
- implizit
- orthogonal
- nicht-orthogonal
- uniform
- nicht-uniform
- transparent
- nicht-transparent

explizite, orthogonale Interaktion

- weit verbreitete Vorgehensweise
- von klassischen Interprozesskommunikations-Mechanismen geprägt
  - Nachrichten (Datagramm-Sockets, Messages,)
  - Verbindungen (Stream-Sockets, Pipes,)
- **Vorteile**
  - meist weit verbreitete, etablierte Infrastruktur vorhanden
  - kein „unsichtbarer“Overhead
- **Nachteile**
  - Programmierung aufwändig
  - Bruch im objektorientierten Paradigma
    - Serialisierung von Parametern, Verlust von Typ-Information
  - Verteilung wird durch die Programmierung „fest verdrahtet“
    - Software sehr unflexibel in Bezug auf Änderungen

implizite, nicht-orthogonale Interaktion

- Interaktion zwischen lokalen und verteilten Objekten unterscheidet sich prinzipiell nicht
  - nur ein Interaktionsmechanismus: Methodenaufruf
- grundlegendes Konzept: **Remote Procedure Call**
  - Verteilung wird durch Vermittler- oder Stellvertreterobjekte vor den Kommunikationspartnern (weitgehend) verborgen
  - Proxy/Stub-Prinzip



uniforme / nicht-uniforme Interaktion

nicht-uniforme Interaktion

- unterschiedliche Methodenaufrufe für lokale und remote-Referenzen
- unterschiedliche Semantik bei der Parameterübergabe
  - by reference
  - by value
  - **Problem:** Übergabe von lokalen Objektreferenzen

uniforme Interaktion

- keinerlei Unterschied zwischen lokalen und remote-Aufrufen

transparente / nicht-transparente Verteilung

volle Transparenz

- Anwendungsentwickler sieht keinerlei Unterschied zwischen lokalen und verteilten Objekten
- **Probleme**:
  - im verteilten Fall können spezielle Fehler auftreten
    - unabhängiger Objektausfall signalisiert durch Remote Exceptions
  - verteilte Interaktion ist implizit signifikant teurer
    - Transparenz kann zu Ineffizienz führen
  - Verteilung ist häufig ein Entwurfskriterium
    - Verbergen der Verteilung in der Implementierung ist unsinnig
- **Fazit**:
  - bei der Programmierung sollte zwischen potentiell verteilten und definitiv lokalen Objekten unterschieden werden können

Herausforderungen

- Überwindung heterogener Hardware- und Softwarestrukturen
  - verschiedene Hardware
  - verschiedene Betriebssysteme
  - verschiedene Programmiersprachen
- Ortstransparenz
  - statische Konfiguration
  - Objektmigration
- Globale Dienste
  - z.B. Namensdienste, Transaktionsdienst, Persistenz, Kontrolle der Nebenläufigkeit

Java Remote Method Invocation (Java RMI)

- Erweiterung des Java Programmiermodells für Verteilung
- mehrere JVMs spannen eine verteilte Rechenplattform auf
- Verteilungseinheiten
  - Java Objekte
- Verteilungstransparenz
  - orts- und zugriffstransparente Methodenaufrufe an verteilten Java Objekten

Literatur

Sun Microsystems
Java Remote Method Invocation Specification
http://java.sun.com/javase/6/docs/platform/rmi/spec/rmiTOC.html


J. Waldo
Remote procedure calls and Java Remote Method Invocation
IEEE Concurrency, 6(3):57, 1998.

Java Remote Method Invocation (Java RMI)

Infrastruktur zur Unterstützung von verteilten Java-Anwendungen

- Server-Anwendung
  - erzeugt Objekte
  - macht Objektreferenzen verfügbar
  - wartet auf Methodenaufrufe
- Client-Anwendung
  - besorgt sich Remote-Referenz
  - ruft Methoden an entferntem Objekt auf

Java Remote Method Invocation (Java RMI)

Probleme

- Erzeugen eines verteilten Java Objekts (RMI-Objekts)
- Entfernte Objekte finden
- Methodenaufuf
- Übergabe von Objekten bzw. Aufrufparametern

Verteilte Java Objekte

Schnittstelle

- verteilte RMI-Objekte implementieren spezielle Java-Interfaces
  - mindestens ein Java-Interface, das direkt oder indirekt von `java.rmi.Remote` erbt
  - dient als Marker, enthält keine Methoden
- alle Methoden in von `java.rmi.Remote` erbenden Interfaces müssen die Exception `java.rmi.RemoteException` deklarieren
  - zeigt Fehler bei entfernten Aufrufen an
  - es kann auch eine Basisklasse deklariert werden, z.B. `java.io.IOException` oder `java.lang.Exception`

Verteilte Java Objekte

Beispiel

```
public interface Printer implements java.rmi.Remote{
   public void print( String s )
     throws java.rmi.RemoteException;
}
```

Entfernt ansprechbare Methoden

- entfernt ansprechbar sind nur Methoden von Interfaces welche von `Remote` erben
- andere Methoden und Instanzvariablen sind nur lokal ansprechbar

Referenzen

- Referenzen nur mit dem Namen eines Remote-Interfaces typisieren
- nicht mit dem Klassennamen der Implementierung

Erzeugen eines RMI-Objekts

Zwei Vorgehensweisen

- Implementierungsklasse implementiert mindestens ein Remote-Interface
- Variante A:
  - Implementierungsklasse erbt von `java.rmi.server.UnicastRemoteObject`
    - Objektinstanzen sind sofort nach der Erzeugung exportiert!
- Variante B:
  - manuelles Vorbereiten für entfernte Aufrufe:
    - Aufruf von `java.rmi.server.UnicastRemoteObject.exportObject(obj,...)`
    - Implementierung verschiedener Methoden von Objekt unter Umständen nötig

Erzeugen eines RMI-Objekts

Beispiel für Vererbungsvariante:

```
public class MyPrinter extends java.rmi.UnicastRemoteObject
 implements Printer {
    public void print(String s) throws java.rmi.RemoteExeception{
      ...
    }
  ...
}
```

RMI Compiler

- erzeugt Subklassen für Clientseite
  - ab Java 1.5 nicht mehr nötig da generische Stubs
- erzeugt Skeletonklassen für Serverseite
  - ab Java 1.2 nicht mehr nötig da generische Skeletons
- Kommando: `rmic`
  - wird mit der Implementierungsklasse aufgerufen

Entfernte Objekte finden

Namesdienste zum Registrieren von Objekten

- Klasse `java.rmi.registry.LocateRegistry`
  - erlaubt das Erzeugen einer Namensdienst-Instanz
  - ermöglicht das Erzeugen einer Objektreferenz zu einem Namensdienst
  - benötigt Hostname und Portnummer
- Objektreferenz ist vom Remote-Interface `java.rmi.registry.Registry`
  - `bind(String s, Remote obj)` registriert Objekt `obj` unter Name `s`
  - `lookup(String s)` liefert Objektreferenz für Objekt mir Name `s`

Entfernte Objekte finden

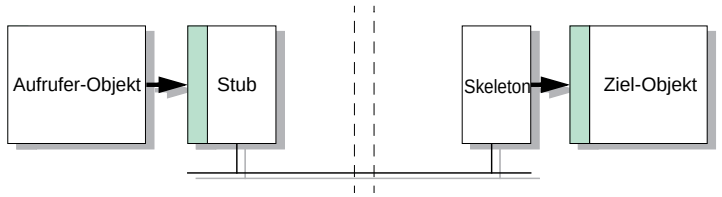
Standard Mechanismen zum Registrieren und Finden von Objekten

- `rmiregistry` einfacher Namensdienst zur Umwandlung von Namen in Remote-Referenzen
- Name = URL, bestehend aus Registry-Host[:Port] und Objektnamen
- Spezielle Klasse `java.rmi.Naming` für transparenten Zugriff auf Nameserver
  - Server meldet Objekt bei seiner Registry an
    - `void Naming.bind(String name, Remote obj)`
    - `void Naming.rebind(String name, Remote obj)`
  - Client bekommt Referenz von Registry
    - `Remote Naming.lookup(String name)`

Alternative

- Ein Objekt erhält Remote-Referenz als Parameter oder als Ergebnis eines Methodenaufrufs

Methodenaufruf



Klassische Stub-/Skeleton-Technik

- Stub-Klasse wird bei Bedarf automatisch vom Server geladen (`RMIClassLoader`)
- Ausführungssemantik: „at most once“
  - bei Fehler wird `RemoteException` ausgelöst

Parameterübergabe

Parameterübergabesemantik bei lokalen Aufrufen

- **Call-By-Value** für Nicht-Objekttypen (z.B. Integer)
- **Call-By-Object-Reference** für Standard-Java-Objekte, lokale und enfernte RMI-Objekte
- entfernte RMI-Objekte
  - Referenz auf Stubobjekt wird übergeben
  - Client verwendet Stubobjekt wie lokales Objekt

Parameterübergabe

Parameterübergabesemantik bei entfernten Aufrufen

- Marshalling der Parameter
  - Parameter werden serialisiert (Java Serialization)
  - Erzeugung eines Bytestroms aus den Parametern
  - Übertragung des Bytestroms
  - Regenerierung der Datentypen und Java-Objekte aus Bytestrom
- **Call-By-Value** für Nicht-Objekttypen (z.B. Integer)
  - Datentypen werden kopiert
- serialisierbare Java-Objekte und lokale, nicht-exportierte RMI-Objekte
  - Serialisierung führt zu vollständiger Kopie eines Objekts und seiner untergeordneten Objekte
  - evtl. große transitive Hülle zu übertragender Daten aber Erhaltung der Objektstruktur über alle Parameter
  - **Call-By-Copy** Semantik

Parameterübergabe

Parameterübergabesemantik bei entfernten Aufrufen (fortges.)

- nicht-serialisierbare Java-Objekte
  - nicht übertragbar: `MarshalException`
- lokale, exportierte RMI-Objekte
  - Einfügung eines geeigneten Stubobjekts in den Bytestrom
  - Regenerierung des Stubobjekts auf der Empfängerseite
  - **Call-By-Object-Reference** Semantik für lokale RMI-Objekte
- entfernte, exportierte RMI-Objekte
  - Einfügung des vorhandenen Stubobjekts in den Bytestrom
  - **Call-By-Object-Reference** Semantik für entfernte RMI-Objekte

Programmiermodell

Erweiterung des Java-Programmiermodells

- Wesentliche Änderungen gegenüber Java
  - Interface obligatorisch
  - Exception-Handling obligatorisch
- veränderte Parameterbergabesemantik bei übergebenen Nicht-RMI-Objekten
  - Zugriffstransparenz verletzt
- Verändertes locking z.B. keine Erkennung von doppelten Object-Locks
  - Deadlock beim Wiedereintritt in das selbe RMI-Objekt

Programmiermodell

Bewahrte Konzepte aus dem Java-Programmiermodell

- Objekte
  - Methodenaufrufe syntaktisch gleich
- Parameterübergabesemantik für übergebene RMI-Objekte und Nicht-Objekte (primitive Datentypen wie Integer)
- Typisierung
  - volle Typisierung im verteilten Fall
  - (dynamische) Type-Casts auch für RMI-Objekte möglich
    - Stubobjekte besitzen alle Methoden des Originals
- Garbage Collection
  - transparente Speicherbereinigung
  - verteiltes Verfahren zur Speicherbereinigung basierend auf Leases

Resumee

- einfacher, speziell auf Java abgestimmter Fernaufrufmechanismus
- durch dynamisches Laden von Code hohe Flexibilität
- implizite, nicht-orthogonale Interaktion (durch Remote-Referenzen)
- Verteilung nicht transparent