Verteilte Systeme – Übung

Fernaufrufsemantiken

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

Übungsaufgabe 3

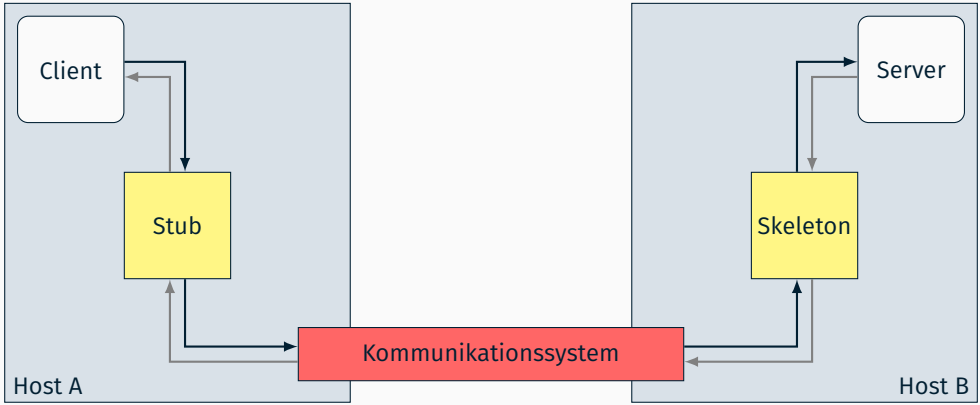
Fernaufrufsemantiken

- Fehler bei Fernaufrufen
- Fehlertolerante Fernaufrufe

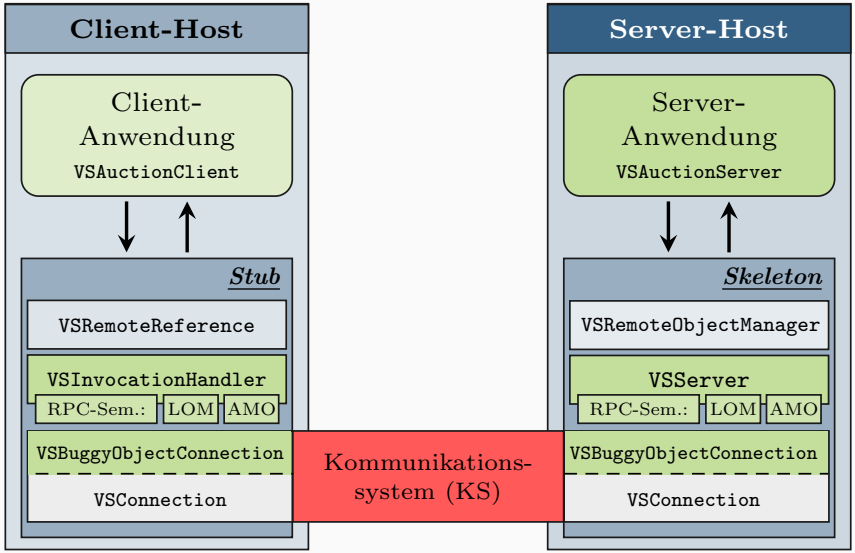
Übungsaufgabe 3

Übungsaufgabe 3

- Bereitstellung von Fehlertoleranzmechanismen
- Simulation von Kommunikationsfehlern



Übungsaufgabe 3



Implementierung der Fernaufrufsemantiken

- *Last-of-Many*
  - Fernaufruf-IDs
  - Sequenznummern
  - Timeouts
- *At-Most-Once*
  - Einmalige Ausführung
  - Speicherung der Ergebnisse
  - Garbage-Collection für Ergebnisse
- Auswahl der Fernaufrufsemantik
  - Methodenspezifische Festlegung
  - Annotierung der Anwendungsschnittstelle bei der Entwicklung
    - `@VSRPCSemantic(VSRPCSemanticType.LAST_OF_MANY)` bzw.
    - `@VSRPCSemantic(VSRPCSemanticType.AT_MOST_ONCE)`
  - Analyse der Annotation durch das Fernaufrufsystem zur Laufzeit

- Annotationen: Bereitstellung von Metadaten im Quelltext
- Beispiel: Kennzeichnung von schreibenden bzw. lesenden Methoden
  - Hilfs-`enum` zur Typunterscheidung

```
public enum VSMethodType {
    READ_ACCESS, WRITE_ACCESS
}
```

  - Definition der Annotation mittels `@interface` in `VSAnnotation.java`

```
@Retention(RetentionPolicy.RUNTIME)
public @interface VSAnnotation {
    VSMethodType value();
}
```

    - `@Retention`-Annotation: Sichtbarkeit von `VSAnnotation` zur Laufzeit
    - Spezifizierung des Rückgabetyps der Standardmethode `value()`

  - Einsatz der Annotation

```
@VSAnnotation(VSMethodType.WRITE_ACCESS)
```

[Hinweis: Sollte der Methodenname von „`value()`“ abweichen, muss beim Einsatz der Annotation der Methodenname explizit angegeben werden.
Beispiel: `foo()` → `@VSAnnotation(foo = VSMethodType.WRITE_ACCESS)`]

- Beispiel: Schnittstelle eines Speichers für Schlüssel-Wert-Paare

```
public interface VSKeyValueStore {
    @VSAnnotation(VSMethodType.WRITE_ACCESS)
    public void put(String key, String value);

    @VSAnnotation(VSMethodType.READ_ACCESS)
    public String get(String key);
}
```

- Analyse der Schnittstelle `VSKeyValueStore`
  - Zugriff auf Annotation mittels `Method.getAnnotation()`

```
for(Method method: VSKeyValueStore.class.getMethods()) {
    VSAnnotation annotation = method.getAnnotation(VSAnnotation.class);
    VSMethodType type = annotation.value();
    System.out.println(method.getName() + ":␣" + type);
}
```

  - Ausgabe

```
get: READ_ACCESS
put: WRITE_ACCESS
```

Sabotage des Kommunikationssystems

- Simulation von Kommunikationsfehlern
  - Nachrichtenverlust durch Verbindungsabbruch
  - Verzögerung einzelner Nachrichten
  - Nicht betrachtet
    - Korrumpierung von Nachrichten
    - Verlust von Teilnachrichten
- Tests
  - Variation der Fehlerintensität
  - Kombination verschiedener Fehlerarten
- Implementierungsvorschlag
  - Fehlerhafte `VSObjectConnection` → `VSBuggyObjectConnection`
  - Überschreiben von
    - `sendObject()` oder
    - `receiveObject()`
  - „Verbindungsabbruch“ durch Schließen der Verbindung per `close()`

Socket-Timeouts

- Setzen von Socket-Timeouts mittels `setSoTimeout()`
  - Konfigurierung der Maximaldauer, die ein Leseaufruf am Socket blockiert
  - Leseaufruf kehrt bei Timeout-Ablauf mit `SocketTimeoutException` zurück
- Beispiel

```
// Socket-Timeout setzen
Socket socket = [...];
try {
    socket.setSoTimeout(5000);
} catch(IOException ioe) {
    // Fehlerbehandlung
}

// Leseaufruf starten
try {
    socket.getInputStream().read();
} catch(SocketTimeoutException ste) {    // -> "Timeout: Read timed out"
    System.err.println("Timeout: " + ste.getMessage());
} catch(IOException ioe) {
    System.err.println("I/O error: " + ioe);
}
```

Fernaufrufsemantiken

Fehler bei Fernaufrufen

Reaktion des Fernaufrufsystems auf Fehler

- In der Anwendung begründete Fehler
  - Fehlersituationen treten bei lokalem Methodenaufruf ebenfalls auf
  - Beispiele
    - Falsche Eingaben
    - Programmierfehler in der Anwendung

    [Vergleiche: `VSAuctionException` bei `VSAuctionService.registerAuction()`]
  - Reaktion des Fernaufrufsystems
    - Aus Sicht des Fernaufrufsystems: Reguläres Verhalten
    - Keine Fehlerbehandlung im Fernaufrufsystem → Transparente Signalisierung

- Im Fernaufruf begründete Fehler
  - Fehlersituationen sind bei lokalem Methodenaufruf nicht relevant
  - Beispiele
    - Rechner: Prozess-, Programm-, Rechnerabsturz, Verzögerungen (Überlast)
    - Nachrichten: Reihenfolgeänderung, Korrumpierung, Verlust
    - Verbindung: Verlangsamung, Abbruch
  - Reaktion des Fernaufrufsystems
    - Fehlerbehandlung im Fernaufrufsystem
    - Signalisierung nur bei Scheitern der Fehlerbehandlung

Fehlersituationen im Vergleich

- Rechnerfehler
  - Lokaler Methodenaufruf
    - Aufrufer und Aufgerufener in gleichem Maße betroffen
    - Im Fehlerfall sind beide abgestürzt bzw. langsam
  - Fernaufruf
    - Aufrufer und Aufgerufener können unabhängig ausfallen
    - Im Fehlerfall ist eventuell nur einer betroffen
- Kommunikationsfehler
  - Lokaler Methodenaufruf
    - Keine Netzwerkkommunikation
    - Fehlerart nicht relevant
  - Fernaufruf
    - Temporäre oder sogar dauerhafte Fehler möglich
    - Nicht alle Fehler lassen sich im Fernaufrufsystem tolerieren

⇒ **Komplexeres Fehlermodell macht vollständig transparente Fernaufrufe unmöglich!**

Umgang mit Fehlern auf Fernaufrufsystemebene

- Fehlertolerierung
  - Einsatz von Fernaufrufsemantiken
  - Problem: Nicht alle Fehler lassen sich tolerieren
- Fehlersignalisierung
  - **Verletzung der Transparenzeigenschaften**
    - Benachrichtigung an den Benutzer des Fernaufrufsystems
    - Benutzer des Fernaufrufsystems muss darauf vorbereitet sein
  - Umsetzung in Java RMI mittels `java.rmi.RemoteException`
    - Muss von jeder Methode einer `Remote`-Schnittstelle geworfen werden
    - Unterklassen von `RemoteException` (Beispiele)

Exception	Beschreibung
`ConnectException`	Verbindungsaufbau fehlgeschlagen
`ServerError`	Auspacken der Anfrage, Ausführung der Methode oder Einpacken der Antwort fehlgeschlagen
`NoSuchObjectException`	Remote-Objekt nicht (mehr) verfügbar
`UnknownHostException`	Remote-Host nicht bekannt

Fehlererkennung bei Fernaufrufen

- Probleme
  - Keine definitive Fehlererkennung (Liegt überhaupt ein Fehler vor?)
  - Keine exakte Fehlerlokalisierung (Wo liegt der Fehler?)
- Beispielszenario: Ein Client erhält keine Antwort auf seine Anfrage
  - Mögliche Gründe
    - Anfrage ging verloren
    - Antwort ging verloren
    - Server ausgefallen
    - Server überlastet
    - Netzwerk überlastet
    - ...
  - Konsequenz: Mindestens einer der beiden Fernaufruf-Teilnehmer kann nicht erkennen, ob (und wenn ja, wo) ein Fehler vorliegt

⇒ **Eine präzise Fehlererkennung ist in verteilten Systemen im Allgemeinen nicht möglich!**

Fernaufrufsemantiken

Fehlertolerante Fernaufrufe

Fernaufrufsemantiken

- Ansatzpunkt
  - Tolerierung von Kommunikationsfehlern
  - Wiederanlaufen nach Rechnerausfällen erfordert zusätzliche Mechanismen
- Semantiken
  - Maybe
  - At-Least-Once
  - At-Most-Once
  - Last-of-Many
- Unterschiede
  - Mehrmaliges Senden von Anfragen
  - Aktualität der Antworten
  - Anzahl der Ausführungen
    - Idempotente Operationen?
    - Duplikaterkennung?
  - Antwortspeicherung $\rightarrow$ Wie lange wird eine Antwort aufgehoben?

At-{Least,Most}-Once

- At-Least-Once
  - Funktionsweise
    - Client wiederholt Anfrage, falls Antwort ausbleibt
    - Client akzeptiert die erste Antwort, die ihn erreicht
  - Eigenschaften
    - Client verwendet eventuell veraltete Antwort
    - Anfragen werden eventuell mehrfach ausgeführt

- At-Most-Once
  - Funktionsweise
    - Client wiederholt Anfrage, falls Antwort ausbleibt
    - Server speichert Antwort
    - Server sendet bei Anfragewiederholungen gespeicherte Antwort
  - Eigenschaften
    - Anfragen werden höchstens einmal ausgeführt
    - Speichern von Antworten erforderlich

Last-of-Many

- Last-of-Many
  - Funktionsweise
    - Client wiederholt Anfrage, falls Antwort ausbleibt
    - Client akzeptiert nur Antwort auf seine aktuellste Anfrage
  - Eigenschaften
    - Keine Antwortspeicherung nötig
    - Anfragen werden eventuell mehrfach ausgeführt

- Implementierung der Semantiken
  - Allgemein: Fernaufruf muss eindeutig identifizierbar sein
    - Client
    - Remote-Objekt
    - Remote-Methode
    - Aufrufzähler
  - Zusätzlich bei LOM: Eindeutige Identifizierung jeder Fernaufrufnachricht
    - Anfragezähler
    - Zuordnung: Antwort zu Anfrage

Idempotenz

- Idempotente Funktionen (Mathematik)
  - Definition

    $$f(x) = f(f(x))$$

  - Beispiele: Operationen auf Mengen
    - Konstante Funktion $f(S) = \{c\}$
    - Hinzufügen eines bestimmten Elements $f(S) = S \cup \{c\}$
    - Entfernen eines bestimmten Elements $f(S) = S \setminus \{c\}$

- Idempotente Operationen (Informatik)
  - Charakteristika mehrfacher Ausführungen
    - Identische Anwendungszustände
    - *(Identische Rückgabewerte)*
  - Beispiele
    - Leseoperationen
    - Zustandsmodifikation durch Setzen neuer Daten
  - Triviale Kombination idempotenter Operationen nicht immer idempotent

Antwortspeicherung

- Problem
  - Server stellt eigene Ressourcen für Fernaufrufe bereit ($\rightarrow$ Antwort-Cache)
  - Mit jedem neuen Fernaufruf werden zusätzliche Ressourcen belegt
  - Wann können die gespeicherten Antworten verworfen werden?
- Lösungsansätze (Kombinationen möglich bzw. nötig)
  - Explizit
    - Benachrichtigung durch Client oder Nachfrage vom Server
    - Problem: Nicht alle Clients können oder wollen sich daran halten
  - Implizit
    - Bei neuem Fernaufruf eines Clients wird die alte Antwort gelöscht
    - Problem: Letzter Fernaufruf eines Clients
  - Timeout
    - Antwortlöschung nach Ablauf eines fernaufrufspezifischen Timeout
    - Als Rückfallposition immer nötig
- Herausforderung: Aufrechterhaltung der Semantikgarantien