

Universität zu Lübeck  
Institut für Telematik

Bachelorarbeit

Design und Implementierung eines  
Peer-to-Peer-basierten Overlaynetzwerks

von  
Nils Rohwedder

**Aufgabenstellung und Betreuung:**

Dr. - Ing. Dennis Pfisterer  
Daniel Bimschas, M.Sc.

Lübeck, den 28. Dezember 2011



---

### **Erklärung**

Ich versichere, die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Benutzung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt zu haben.

Lübeck, den 28. Dezember 2011



---

## Aufgabenstellung

Im Rahmen der Tätigkeit an dem WISEBED-Projekt am Institut für Telematik der Universität zu Lübeck tauchte die Fragestellung nach einem Peer-to-Peer-basierten Overlay-Netzwerk auf, welches die Möglichkeit eines Nachrichtenaustauschs bietet.

In WISEBED wird eine Infrastruktur entwickelt, dessen Ziel die Bereitstellung einer europaweiten Testumgebung für Algorithmen, Protokolle und Anwendungen für drahtlose Sensornetzwerke ist. Das Hauptaugenmerk liegt dabei zum Einen auf der Verfügbarkeit einer großen Anzahl von Sensorknoten und zum Anderen auf der technischen Vielfalt der einzelnen vernetzten Testumgebungen, der Sensorik und der Infrastruktur zum Management und zur Nutzung dieses Sensorverbundes. Das Ziel von WISEBED ist primär der Aufbau und die Bereitstellung eines größeren Sensorverbundes, um theoretisch entwickelte Algorithmen für Sensornetzwerke auch praktisch in größerem Maßstab testen zu können.

Während der Laufzeit von WISEBED entsteht dabei ein großes, europaweit verteiltes und über das Internet verbundenes System von Sensornetzwerken. Eine Software soll es Benutzern der WISEBED-Infrastruktur gestatten, nicht nur auf ein einzelnes Sensornetzwerk zugreifen zu können, sondern eine Föderation aus Einzelnetzwerken zu erstellen, die aus Anwendersicht wie ein homogenes, einzelnes Sensornetzwerk erscheint und so die europaweite Verteiltheit verbirgt. Dies erlaubt die Föderation existierender Sensornetzwerke zu einem virtuellen Gesamtgebilde in dem Nachrichten so ausgetauscht werden können, als wären die einzelnen Sensorknoten in gegenseitiger Funkreichweite. [3]

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt dabei auf einem Konzept für den Nachrichtenaustausch, welches verschiedene Nachrichtentypen eines *Message Exchange Pattern* abdeckt. Dabei soll aber darauf geachtet werden, dass nicht ein für WISEBED spezifisches Pattern, sondern ein für verschiedenste Szenarien anderer Anwendungsbereiche verteilter Peer-to-Peer-Architekturen denkbares Pattern, entwickelt wird. Des weiteren soll ein effizientes *Reliable Messaging*-System integriert werden, welches dem Nutzer einen schnellen und zuverlässigen Nachrichtenaustausch ermöglicht. Dabei soll dem Nutzer die freie Wahl des zu übertragenden Inhalts überlassen werden, sowie gegebenenfalls Erweiterungspotenzial für zusätzliche Nachrichtentypen bieten. Aufbauend auf einer Analyse der Anforderungen soll hierbei zunächst ein Konzept entworfen und anschließend implementiert werden. Es soll darauf geachtet werden ausgereifte, bereits existierende Technologien zu verwenden. Die Funktionalität sowie ausreichende Performanz der Implementierung soll schließlich durch eine Evaluation gezeigt werden.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Herangehensweise . . . . .	1
1.2	Gliederung der Arbeit . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Peer-to-Peer Architektur . . . . .	3
2.1.1	Was ist Peer-to-Peer? . . . . .	4
2.1.2	Routing . . . . .	4
2.1.3	Peer-to-Peer Overlay-Netzwerk . . . . .	5
2.1.4	Topologien . . . . .	6
2.2	Remote Procedure Call (RPC) . . . . .	6
2.2.1	Verfahren . . . . .	6
2.2.2	Ablauf . . . . .	7
2.2.3	Realisierungen . . . . .	7
2.3	Netty . . . . .	7
2.3.1	Architektur . . . . .	9
2.4	Google Protocol Buffers . . . . .	11
2.4.1	Nachrichten-Generierung . . . . .	12
2.4.2	Protobuf und RPC . . . . .	13
2.5	Uberlay . . . . .	13
2.5.1	Architektur . . . . .	13
2.5.2	Pfadvektor Protokoll . . . . .	14
2.5.3	Round Trip Time Protokoll . . . . .	16
2.6	Maven . . . . .	16
2.6.1	Funktionsweise . . . . .	17
2.6.2	Maven in dieser Arbeit . . . . .	19
2.7	Mockito . . . . .	19
2.7.1	Mockito in dieser Arbeit . . . . .	19
2.7.2	Weitere Funktionen . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Entwurf</b>	<b>21</b>
3.1	Message Exchange Pattern . . . . .	21
3.1.1	Definition . . . . .	22
3.2	Architektur . . . . .	24
3.2.1	Aufbau . . . . .	24
3.2.2	Erläuterung . . . . .	24
3.3	Protokoll . . . . .	25
3.3.1	Struktur . . . . .	25
3.3.2	Nachrichten . . . . .	26

<b>4</b>	<b>Implementierung</b>	<b>29</b>
4.1	Einleitung und Überblick . . . . .	29
4.2	Protokoll . . . . .	30
4.3	Übermep-core . . . . .	33
4.3.1	Einleitung . . . . .	33
4.3.2	Schnittstellen . . . . .	33
4.3.3	Implementierung und Abhängigkeiten . . . . .	40
4.3.4	Messaging . . . . .	47
4.3.5	Konfiguration . . . . .	51
4.4	Beispiele . . . . .	52
4.4.1	Aufbau eines Peer-to-Peer Netzwerk . . . . .	52
4.4.2	Kommunikation . . . . .	53
4.5	Zukünftige Erweiterungen . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Evaluation</b>	<b>61</b>
5.1	Netzwerk-Topologien . . . . .	61
5.2	Evaluationskriterien . . . . .	61
5.2.1	Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Payload-Größe . . . . .	62
5.2.2	Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Hop-Anzahl . . . . .	62
5.3	Testergebnisse . . . . .	62
5.3.1	Boxplot . . . . .	62
5.3.2	Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Payload-Größe . . . . .	64
5.3.3	Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Hop-Anzahl . . . . .	64
5.3.4	Schlussfolgerung . . . . .	66
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>69</b>
	<b>Verzeichnisse</b>	<b>71</b>
	Abbildungsverzeichnis . . . . .	71
	Abkürzungsverzeichnis . . . . .	73
	Bibliographie . . . . .	75



# 1 Einleitung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, eine Bibliothek zu entwickeln, welche einem Nutzer die Möglichkeit bietet ein Overlay-Peer-to-Peer Netzwerk aufzubauen, um mit Hilfe von Nachrichtentypen eines *Message Exchange Patterns* einen Informationsaustausch zu ermöglichen.

## 1.1 Herangehensweise

Im Rahmen dieser Arbeit wird dabei im ersten Schritt das benötigte Message Exchange Pattern definiert und spezifiziert. Dabei handelt es sich um Nachrichtentypen der Kommunikationsform *Unicast* und *Multicast*. Im zweiten Schritt wird mittels dieser Definition ein Protokoll entworfen, welches die Kommunikation der verschiedenen Nachrichtentypen ermöglicht. Im dritten Schritt werden Technologien gesucht, welche zum einen den Aufbau eines Peer-to-Peer Netzwerk und zum anderen den Nachrichtenaustausch mit Hilfe der Protokollschicht ermöglichen. Im vierten und letzten Schritt wird schließlich eine Architektur entworfen und implementiert, welche sich an der gewählten Technologie sowie der entwickelten Protokollschicht orientiert.

## 1.2 Gliederung der Arbeit

Nach der oben erfolgten Einführung in die Herangehensweise, ist die Arbeit im Folgenden in 5 Kapitel aufgeteilt.

Im Kapitel 2 wird dem Leser ein Überblick über die Grundlagen gegeben, auf denen diese Arbeit basiert. Zunächst wird in Abschnitt 2.1 das Konzept der Peer-to-Peer-Architektur erklärt. Was ist die Besonderheit gegenüber dem klassischen Client-Server-Architektur-Ansatz, was für Topologien gibt es und was sind Peer-to-Peer-Overlay-Netzwerke. Danach wird das Verfahren der Remote Procedure Calls in Abschnitt 2.2 erläutert. Anschliessend werden in den Abschnitten 2.3, 2.4 und 2.5, das Netty-Framework, das Google-Protobuf-Projekt und das Overlay-Projekt erklärt, welche die Basis der entwickelten Bibliothek bilden. Abschließend wird in den Abschnitten 2.6 und 2.7 noch kurz auf das Build-Tool Maven sowie das Test Framework Mockito eingegangen.

Das Kapitel 3 gibt dem Leser einen Überblick über den Entwurf der Implementierung. Dazu werden in Abschnitt 3.1 die zugrundeliegenden Message Exchange Patterns definiert und spezifiziert. Anschließend wird in Abschnitt 3.2

das Architektur-Konzept beleuchtet, um abschliessend das der Bibliothek zugrundeliegende Protokoll in Abschnitt 3.3 zu definieren und zu beschreiben.

Im Kapitel 4 wird die Implementierung des im Kapitel 3 beschriebenen Entwurfs vorgestellt. Dazu wird zunächst in Abschnitt 4.1 eine Einleitung sowie ein kurzer Überblick darüber gegeben, wie die Implementierung aufgebaut ist. Anschließend wird in Abschnitt 4.2 die Implementierung des Protokolls beschrieben. Danach wird der Kern der Implementierung in Abschnitt 4.3 vorgestellt. Dazu werden im einzelnen die Schnittstellen, die Implementierungen einzelner Komponenten, die Implementierung des Messaging-Systems sowie die Konfiguration einzelner Peers vorgestellt. Anschließend wird anhand von Beispielen in Abschnitt 4.4 veranschaulicht, wie die Implementierung benutzt wird. Abschließend wird in Abschnitt 4.5 noch kurz auf zukünftige Erweiterungen eingegangen.

Im Kapitel 5 wird die Evaluation der Implementierung beschrieben. Dazu werden zunächst die verwendeten Netzwerk-Topologien und anschließend die Evaluationskriterien erläutert. Abschließend werden die gemessenen Ergebnisse präsentiert und bewertet.

Das Kapitel 6 liefert eine kurze Zusammenfassung dieser Bachelorarbeit, einen kurzen Ausblick über die Zukunft von diesem Projekt sowie einen Überblick in welchen Anwendungsbereichen die Implementierung verwendet werden kann.

## 2 Grundlagen

Im diesem Kapitel werden die technischen Grundlagen dieser Arbeit erörtert, welche im Entwurf und der daraus resultierenden Implementierung angewendet werden. Im Abschnitt 2.1 wird das Peer-to-Peer Architektur-Konzept vorgestellt, welche die Basis dieser Arbeit bildet. Anschließend wird im Abschnitt 2.2 das Verfahren von Remote Procedure Calls erläutert, welches einen Bestandteil dieser Arbeit bildet. Danach wird im Abschnitt 2.3 das Netty-Framework beschrieben, welches zusammen mit dem Uberlay Projekt, beschrieben in Abschnitt 2.5, die Basis des Architektur-Entwurfes bildet. Im Abschnitt 2.4 wird das Google Protobuf Projekt beschrieben, welches die Protokoll-Schicht dieser Arbeit bildet. Danach wird in Abschnitt 2.6 das Projektverwaltungs- und Buildtool Maven vorgestellt und erläutert in wieweit sich dieses Tool in dieser Arbeit wiederfindet. Abschließend wird die Java-Programmbibliothek Mockito vorgestellt, welches hier zum Testen der Implementierung verwendet wurde.

### 2.1 Peer-to-Peer Architektur

[4] Die klassische Internetkommunikation basiert auf der Client-Server-Architektur. Ausgewählte Server (meist abhängig von Leistungsfähigkeit) bieten Dienste, Dateien, Inhalte etc. an, die Clients konsumieren diese Ressourcen. Der Vorteil hierbei: Kennen Clients einen ausgeählten Server, so lassen sich Dienste, Daten oder Inhalte leicht auffinden. Allerdings besitzt diese Architektur ebenfalls einige Nachteile:

- Ist ein Server vorübergehend nicht erreichbar, so sind deren sämtlich angebotene Ressourcen ebenfalls nicht verfügbar. Dies entspricht dabei dem System des *Single Point of Failure*, d.h. der Ausfall des Servers sorgt für den Zusammenbruch des ganzen Systems (Netzwerk). Dies kann zwar durch z.B. redundante Datenhaltung verhindert werden, verschiebt dabei aber nur das eigentliche Problem des Systems und löst es nicht.
- Die theoretisch zur Verfügung stehenden Ressourcen von Clients sind für andere Clients nicht verfügbar. So ist z.B. das *Filesharing*, bei dem Nutzer untereinander Dateien teilen oder das Nutzen der *Grid Computing* Technologie in dem Rechenleistung geteilt wird, nicht oder nur bedingt möglich.

### 2.1.1 Was ist Peer-to-Peer?

Die Peer-to-Peer-Architektur ist ein alternatives Konzept um diese Nachteile aufzulösen.

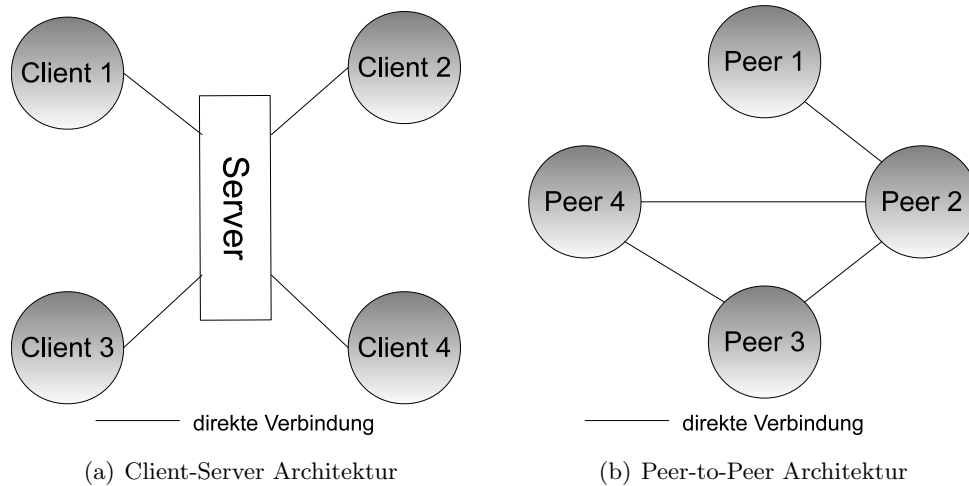


Abbildung 2.1: Client-Server vs. Peer-to-Peer

Peer-to-Peer-Netzwerke sind verteilte Systeme, bestehend aus mehreren Knoten, die *Peers* genannt werden. Jeder Peer im Netzwerk ist ein gleichwertiger Partner (*Peer*: engl. für *Gleichgestellter*) und kann sowohl Client als auch Server-Aufgaben ausführen. Peers eines Netzwerks kommunizieren unmittelbar miteinander, (siehe Abbildung 2.1) dies bedeutet aber *nicht*, dass jeder Peer mit jedem weiteren Peer des Netzwerks verbunden sein muß. Es bedeutet lediglich, dass Peers keine Server benötigen, um Informationen auszutauschen. So ist im Beispiel in Abbildung 2.1 einzig Peer 1 mit Peer 2, Peer 2 mit Peer 3 und Peer 4 und Peer 3 mit Peer 4 verbunden. Das Peer-to-Peer-Architektur-Konzept erlaubt aber trotzdem die Kommunikation zwischen sämtlichen Peers des Netzwerk (wie z.B. zwischen Peer 1 und Peer 4).

### 2.1.2 Routing

Um die Kommunikation zwischen Peers eines Netzwerks, unabhängig ihrer Topologie, zu ermöglichen, müssen die Informationen, wo und wie einzelne Peers zu erreichen sind, für jeden Peer verfügbar sein. (möchte, bezogen auf Abbildung 2.1(b), z.B. Peer 1 mit Peer 4 kommunizieren). Diese Informationen wo und wie Peers erreicht werden können, werden in sogenannten *Routing-Tabellen* gespeichert. Die Such- und Weiterleitungsverfahren, welche die Routing-Tabellen zum Auffinden von Knoten in Netzwerken benötigen, nennt man dann *Routingverfahren*. Das Routingverfahren eines Netzwerks ist implementierungsabhängig, das bedeutet, jedes Peer-to-Peer Netzwerk kann sein eigenes Routingverfahren besitzen. Bekannte Routingverfahren in Peer-to-Peer-Netzwerken sind z.B. *CAN*

(*Content Addressable Network*) [2] oder *Chord* [2] welche auf der Datenstruktur *DHT* (*Distributed Hash Table*) [2] aufsetzen.

Da ein Peer-to-Peer Netzwerk hoch-dynamisch ist, da sich Knoten jederzeit vom Netzwerk an und wieder abmelden können, bzw. Knoten vorübergehend nicht verfügbar sein können, müssen sich die Routing-Tabellen dynamisch an das Netzwerk anpassen, d.h. Peer-to-Peer Netzwerke sind selbstorganisierend. Daraus resultiert eine hohe Fehlertoleranz, da selbst durch den Ausfall von einem oder mehreren Knoten die Kommunikation weiterhin gewährleistet bleibt.

### 2.1.3 Peer-to-Peer Overlay-Netzwerk

Die Kommunikation eines Peer-to-Peer Overlay-Netzwerks findet auf einer eigenen Netzwerktopologie, dem Overlay, statt. Diese Topologie setzt auf eine bestehende physikalische Netzwerktopologie, dem Underlay, auf. Der Vorteil hierbei ist, dass das Routen und Addressieren von Peers unabhängig von der physikalischen Netzwerkstruktur arbeitet. Aus diesem Grund besitzen Overlay-Netzwerke typischerweise eigene Addressierungen und Routing-Verfahren.

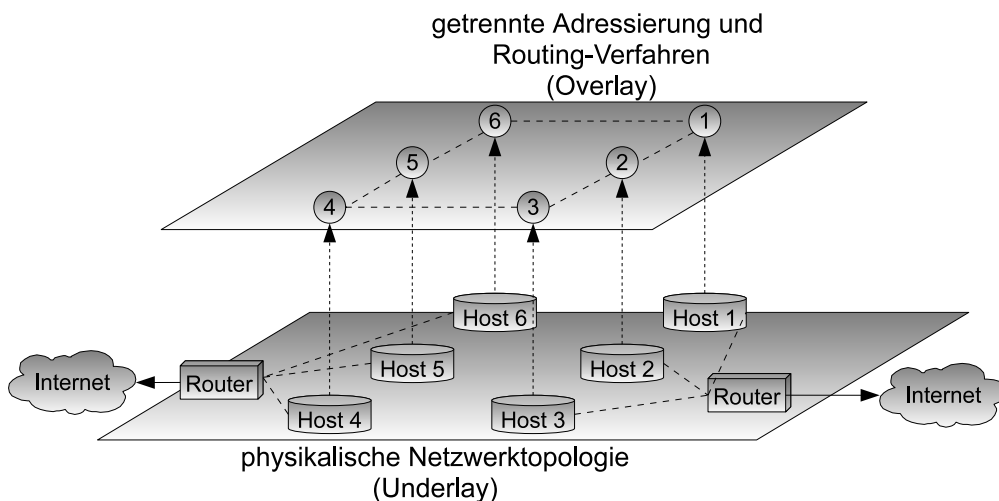


Abbildung 2.2: Netzwerk mit einer Overlay- und einer Underlay-Topologie

Ein Peer-to-Peer-Overlay-Netzwerk mit einer darunterliegenden Underlay Topologie ist in Abbildung 2.2 anhand eines Beispiels zu erkennen. Die physikalische Netzwerktopologie (Underlay) besteht dabei aus 6 Hosts, wobei jeweils 3 Hosts mittels einem Router über das Internet miteinander verbunden sind. Das Overlay wiederum besteht aus 6 Peers. Jedem Peer wird dabei jeweils ein Host des Underlay zugeordnet. Die Peers sind ringförmig miteinander verbunden. Es besitzt eigene Addressierungs- sowie Routingverfahren für Nachrichten, welche unabhängig von der Struktur des Underlay arbeiten.

### 2.1.4 Topologien

Es wird zwischen zwei Arten von Peer-to-Peer-Overlay-Netzwerk-Topologien unterschieden: *Single-Hop* und *Multi-Hop*. Ein *Hop* entspricht dabei einer Etappe von einem Netzknoten zum nächsten. Im Folgenden wird nun der Unterschied dieser beiden Modelle erklärt.

**Single-Hop** Single-Hop-Topologie bedeutet: Bei der Kommunikation von einem Peer des Netzwerks zu einem beliebig anderen Peer wird *immer nur ein* Hop, also eine Etappe zurückgelegt.

**Multi-Hop** Multi-Hop-Topologie bedeutet: Bei der Kommunikation von einem Peer des Netzwerks zu einem beliebig anderen Peer, wird *immer mindestens ein* Hop zurückgelegt. Das bedeutet, ein Großteil der Daten die übertragen werden, laufen über Peers die als Zwischenstationen fungieren. So ist z.B. die in Abbildung 2.2 beschriebene Overlay-Topologie eine Multi-Hop-Topologie, da der Peer 1 eine Nachricht zum Peer 3 über den Peer 2 versenden muss.

## 2.2 Remote Procedure Call (RPC)

### 2.2.1 Verfahren

Remote Procedure Call (RPC) ist ein Verfahren zur Abwicklung von Interprozesskommunikation welche den Austausch von Daten in verteilten Systemen erlaubt. Dafür muss dieser Aufruf, welcher von einem Client zu dem auf-

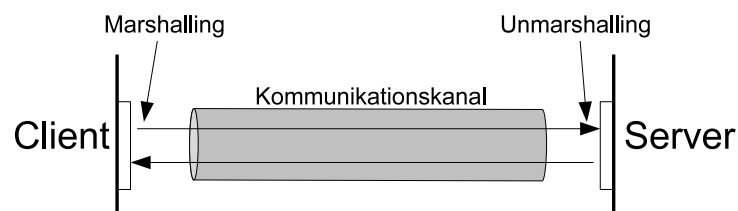


Abbildung 2.3: Übertragung eines Remote-Procedure-Call

rufenden Server übertragen wird, in eine Nachricht serialisiert werden. Diese Serialisierung nennt man *Marshalling*. Der serialisierte Aufruf wird dann über einen Kommunikationskanal übertragen und beim Server deserialisiert, die Deserialisierung heißt *Unmarshalling*. Der Ablauf ist dabei in Abbildung 2.3 zu erkennen.

Dieses Verfahren erlaubt den Aufruf von entfernter Prozeduren (z.B. auf einem verbundenen Remote-Peer). Der Konsument wird dabei im Allgemeinen als Client, der Dienstleister als Server bezeichnet.

## 2.2.2 Ablauf

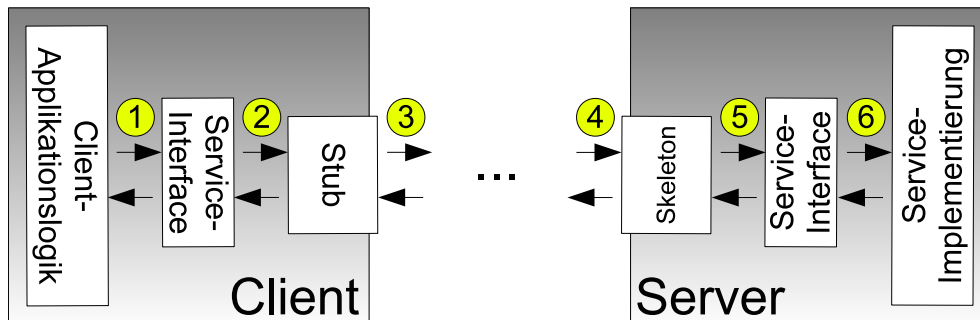


Abbildung 2.4: Ablauf eines Remote-Procedure-Call

Der Ablauf eines Remote Procedure Calls sieht wie folgt aus:

Auf dem Client wird für eine Applikationslogik (1) mittels einem Service-Interface (2) ein Stub (Stellvertreter) generiert. Dieser Stub serialisiert den Aufruf (Marshalling), welcher dann über einen Kommunikationskanal an den Server übertragen wird (3). Auf dem Server wird dann die serialisierte Nachricht vom Skeleton (4) in einen Aufruf deserialisiert (Unmarshalling). Mittels dem Service-Interface (5) (demselben wie am Client) wird dann die entsprechende Service-Implementierung aufgerufen (6). Das Ergebnis wird über den Server-Skeleton serialisiert, an den Stub des Clients übertragen und anschliessend wieder deserialisiert. Das Ergebnis kann schließlich in der Applikationslogik am Client verarbeitet werden.

Die Abbildung 2.4 zeigt dabei den oben beschriebenen Ablauf eines RPC.

## 2.2.3 Realisierungen

Für die Verwendung von RPC gibt es mehrere verschiedene Arten der Realisierung. Im Zusammenhang anwendungsorientierter Middleware wäre da zum einen *CORBA* [11] zu nennen, einer Spezifikation für objektorientierte Programmiersprachen. Im Bereich kommunikationsorientierter Middleware wäre da *Web services* [14] zu nennen, einem System um den Aufruf verteilter Webanwendungen zu unterstützen. In dieser Implementierung wird die vom Google-Protobuf-Projekt [5] mitgelieferte RPC-Variante realisiert (siehe dazu Abschnitt 2.4).

## 2.3 Netty

Die Implementierung dieser Arbeit basiert auf Netty [9], einem asynchronen *network application framework*. Die Architektur setzt sich dabei aus drei Teilen zusammen:

- **Pipelines:** Der Transport in Netty findet über Sockets statt. Jeder Socket ist mit einer *ChannelPipeline* verbunden, welche *ChannelHandler* bereithält, die für die Verarbeitung der Nachrichten sorgen. Die Nachrichten-Paketen werden dabei mittels einem *Event-Driven* Client-Server-Model verarbeitet.
- **Codecs:** Die zu übermittelnden Objekte werden mittels entsprechenden Decodern und Encodern in Nachrichten-Pakete umgewandelt.
- **Buffers:** Die Nachrichten-Pakete werden mittels des *Zero-Copy Mechanismus* in *ChannelBuffer* verpackt und dann versendet.

Im Folgenden werden zunächst die beiden eingeführten Begriffe, Event-Driven Architektur und Zero-Copy Mechanismus erklärt, bevor anschliessend die Architektur selbst beschrieben wird.

### Event-Driven Architektur

Normalerweise wird auf Multi-Thread-Servern beim Empfangen von Requests ein Thread pro Request erzeugt. Dies birgt mehrere Nachteile:

- Da der Thread die meiste Zeit mit dem Warten auf I/O-Operationen verbringt, befindet sich der Thread den Großteil seiner Zeit im Zustand des Leerlaufs. Daraus ergibt sich eine Verschwendung von Ressourcen.
- Außerdem ist das Erzeugen von Threads teuer und bringt den Seiteneffekt von Verzögerungszeiten mit sich. Das Verwenden von Threadpools kann dies zwar verbessern, aber nicht verhindern.

Genau hier setzt die *Event-Driven Architektur* an. Jeder Aufruf einer I/O-Operation führt zum auslösen eines nicht-blockierenden Events. So wird z.B. ein Event ausgelöst, wenn Daten auf ein Socket geschrieben werden. Das Verbinden bzw. Trennen von Kommunikationskanälen führt ebenfalls zum auslösen eines Events. Dabei wird das Verarbeiten eines Events an einen sogenannten *Worker Thread*, aus einem Pool von Threads, weitergeleitet, welcher dann das Event an die Handler in der Pipeline weiterreicht. Dabei können sich verschiedene Events einen Worker Thread teilen.

### Zero-Copy Mechanismus

Beim Versenden von Nachrichten-Paketen liegen die zu versendeten Daten typischerweise auf der Festplatte oder im Kernel-eigenen Cache vor. Im Folgenden soll davon ausgegangen werden, dass die Daten im Kernel-space vorliegen.

Für das Schreiben der Daten auf einem Client-Socket, müssen diese allerdings im Socket-Buffer vorliegen. Normalerweise würde dies über einen Kopiervorgang geschehen, welcher die Daten aus dem Kernel-space über den Userspace in den Socket-Buffer kopiert. Nun hat der Kopiervorgang vom Kernel-space in den User-space den Nachteil der schlechten Performance, zumal sich der Inhalt nicht



verändert hat.

Anstatt diese Daten nun hin und her zu kopieren, wird beim Zero-Copy-Ansatz ein virtueller Puffer im User-space erzeugt, welcher einzig *Pointer* auf den tatsächlichen Inhalt im Kernel-space generiert. Wird dann beim Schreiben der Daten in den Socket-Buffer auf den Inhalt zugegriffen, werden dann lediglich der Pointer gelesen und der Speicherinhalt vom Kernel-space via *Direct Memory Access* in den Socket-Buffer geschrieben. Derselbe Mechanismus gilt dann ebenso für das Empfangen von Nachrichten am Server, also beim Verschieben von Daten-Paketen aus dem Socket-Buffer in den Kernel-space.

Eine ausführlichere Beschreibung der beiden Mechanismen – Event-Driven und Zero-Copy Mechanismus – ist auf der Dokumentationsseite von Netty unter <http://www.jboss.org/netty/documentation.html> zu finden.

In dieser Arbeit spielt der Zero-Copy Mechanismus für Nachrichten von geringer Größe eine ungeordnete Rolle, gewinnt aber an Bedeutung, je größer die zu versendeten Nachrichten werden.

### 2.3.1 Architektur

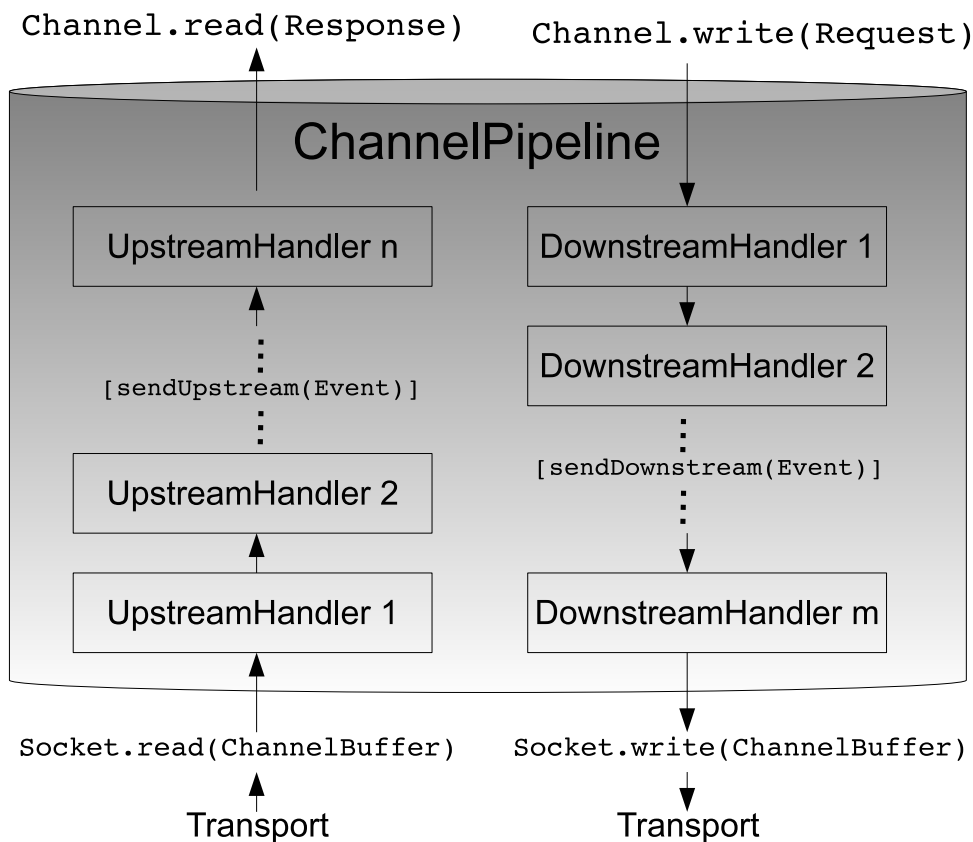


Abbildung 2.5: Vereinfachte Netty-Pipeline-Architektur

Im folgenden soll nun auf die wesentlichen, für diese Arbeit relevanten Aspekte der Netty-Architektur eingegangen werden. Hierfür soll die Abbildung 2.5 die Architektur des Netty-Frameworks veranschaulichen. Sie spiegelt dabei aber nicht die tatsächliche Realisierung in Netty wieder.

Für weiterführende Information, die über diese Arbeit hinaus gehen, steht die Netty-Projektseite zur Verfügung. (<http://www.jboss.org/netty>)

### Pipelines und Buffers

Das Netty-Framework bietet die Möglichkeit Nachrichten von einem Client-Socket zu einem Server-Socket zu senden. Jeder Socket besitzt eine **ChannelPipeline**. Die Kommunikation findet dabei über einen **Channel** statt, welcher zwischen einem Client-Socket und einem Server-Socket aufgebaut wird. Wie bereits erwähnt, basiert Netty auf der Event-driven Architektur, d.h. die Nachrichten werden als **ChannelEvents** verschickt. Dabei gibt es verschiedene Arten von ChannelEvents, am wichtigsten hierbei ist das **MessageEvent**, welches den Empfänger eines Events, den **ChannelFuture** (also das Ergebnis der asynchronen Verarbeitung) sowie die Nachricht selbst enthält.

Wie in Abbildung 2.5 zu erkennen ist, enthält die ChannelPipeline beliebig viele **ChannelHandler**, die dann für die Verarbeitung der Nachricht sorgen. Das Prinzip hierbei ist relativ simpel: Die Nachrichten werden in der Pipeline von einem Handler zum nächsten weitergereicht. Für die Richtung ist dabei entscheidend, ob eine Nachricht downstream (sendend) oder upstream (empfangend) verarbeitet wird. Downstream werden die Nachrichten von oben nach unten (top-down) in der Pipeline weitergereicht, upstream von unten nach oben (bottom-up). Ist ein Handler für eine Nachricht verantwortlich, so wird diese dort verarbeitet und anschließend weitergereicht, wenn nicht wird sie direkt, ohne Verarbeitung, weitergereicht. ChannelHandler können dabei unterschiedliche Aufgaben erfüllen, wie z.B. das De-/Encodieren von Nachrichten oder das Abarbeiten einer Applikationslogik. Die ChannelHandler in der Pipeline sind positionsbezogen. Beim Versenden muss schlußendlich der letzte, für den Nachrichtentyp verantwortliche ChannelHandler in der ChannelPipeline, dafür sorgen, dass die Nachricht serialisierbar ist, d.h. vom Framework über den Channel versendet werden kann.

Es gibt dabei zwei Arten von ChannelHandlern: Klassen die das Interface **ChannelDownstreamHandler** implementieren sind für das Verarbeiten von versendeten Nachrichten und Klassen die das Interface **ChannelUpstreamHandler** implementieren für das Verarbeiten von empfangenden Nachrichten zuständig.

Die Nachricht selbst, wird in einen **ChannelBuffer** verpackt und dann übertragen. Dabei wendet Netty für den Kopiervorgang den bereits beschriebenen Zero-Copy Mechanismus an. Der ChannelBuffer selbst besteht aus einem zusammengesetzten byte-array und hält für die primitiven Datentypen eigene Methoden wie, *readByte*, *readInt*, *writeByte*, *writeInt*, ... bereit.

## Codecs

Die Serialisierung bzw. Deserialisierung von Nachrichten findet bei Netty über Encoder (Serialisierer) bzw. Decoder (Deserialisierer) statt. Die Dekodierte Nachricht, also die eigentliche Protokoll-Nachricht, wird dann über die Channels mittels der ChannelEvents versendet.

Dabei gibt es die Möglichkeit mitgelieferte De-/Encoder zu verwenden (wie z.B. für Http- oder String-Nachrichten) oder eigene En-/Decoder zu implementieren. Für das De- bzw. Enkodieren von Nachrichten gibt es zwei Möglichkeiten: Zum einen das Verwenden von Netty bereitgestellten Dekodern und Enkodern (wie z.B. **HttpRequestEncoder**, **HttpRequestDecoder** und **HttpResponseEncoder**, **HttpResponseDecoder**) oder das Implementieren von eigenen De- bzw. Enkodern. Die Implementierung von eigenen De- bzw. Enkodern soll hier nicht näher beschrieben werden, zumal dies anhand von Beispiel-Applikationen auf der Netty-Homepage nachvollzogen werden kann. Die genutzten De- und Enkoder müssen dann in die ChannelPipeline hinzugefügt werden.

In dieser Implementierung werden die Protokoll-Nachrichten unter Verwendung des Google-Protobuf-Projekts [5] versendet. Um diese nutzen zu können, müssen als De- bzw. Enkoder die von Netty mitgelieferten **ProtobufDecoder** und **ProtobufEncoder** der Pipeline hinzugefügt werden.

Im folgenden wird nun auf die Google-Protobuf-Nachrichten eingegangen.

## 2.4 Google Protocol Buffers

Google Protocol Buffers (protobuf) ist ein Format zu Serialisierung von strukturierten Daten (wie z.B. Nachrichtenprotokollen) mittels einer *Interface Definition Language* (IDL). Google Protobuf erlaubt dabei eine programmiersprachenunabhängige und effiziente Protokollnachrichten-Serialisierung.

Die Effizienz wird unter anderem dadurch erreicht, dass für die Serialisierung von zu übertragenden Daten eine Kodierung variabler Länge, sogenannte *Varints*, verwendet werden. Dabei gilt die Regel: Je größer die Zahl, desto mehr Bytes werden benötigt, d.h. die Anzahl der Bytes ist abhängig von der Größe der Zahl. Dabei wird diese Form der Serialisierung eben nicht nur für Zahlen (wie z.B. *int32*, *int64*), sondern auch für andere Datentypen (wie z.B. für Längenfelder von *Strings*) verwendet [6]. Eine genaue Erklärung wie Varints enkodiert bzw. dekodiert werden, findet sich auf der entsprechenden Dokumentationsseite von protobuf [6].

Des weiteren wurde protobuf als Binärformat konstruiert und ist deshalb schneller als andere Formate die nicht Binärdaten enthalten, aber dasselbe Prinzip verfolgen, wie z.B. textbasierte Serialisierungsformate.

Um nun strukturierte Daten zu serialisieren, muß man diese mittels einer *.proto*-Datei beschreiben. Diese *proto*-Dateien werden dann mittels dem Protobuf-

eigenen IDL-Compiler *protoc* generiert. Dies bietet den Vorteil der einfachen Erweiterbar- bzw. Austauschbarkeit von Protokoll-Nachrichten.

Die Erweiterbarkeit bzw. Austauschbarkeit ist dadurch gegeben, dass zusätzlich benötigte Felder in der proto-Datei hinzugefügt bzw. ausgetauscht werden können und die Datei dann nur noch erneut kompiliert werden muß.

### 2.4.1 Nachrichten-Generierung

Im folgenden (Listing 2.1) soll eine Beispiel-*Proto*-Nachricht zum Versenden von Buchbestellungs-Nachrichten den Aufbau von Google Protobuf-Nachrichten veranschaulichen. Hierbei handelt es sich um ein Protokoll, bestehend aus einem *BookOrderRequest*- und *BookOrderResponse*-Nachrichtentyp. Die Nachrichtentypen bestehen dabei aus erforderlichen (*required*), optionalen (*optional*) und mehrfachen (*repeated*) Attributen, die wiederum einen Typ, einen Bezeichner und eine Reihenfolge besitzen. Die Typen bestehen dabei aus von protobuf mitgelieferten Datentypen, enums sowie den eigenen definierten Nachrichtentypen *Customer* und *Book*.

```
1 message BookOrderRequest{
2   required Customer customer = 1;
3   required Book book = 2;
4   required bool deliverToCustomer = 3;
5 }
6
7 message BookOrderResponse{
8   required uint64 orderNumber = 1;
9 }
10
11 message Customer{
12   required uint32 customerNumber = 1;
13   enum Gender{
14     UNKNOWN = 0;
15     MALE = 1;
16     FEMALE = 2;
17   }
18   required Gender gender = 2 [default = UNKNOWN];
19   required string name = 3;
20   required string address = 4;
21   optional uint32 phone = 5;
22 }
23
24 message Book{
25   required string title = 1;
26   repeated string authors = 2;
27 }
```

Listing 2.1: Aufbau einer proto-Nachricht

### 2.4.2 Protobuf und RPC

Des weiteren bietet protobuf die Möglichkeit RPC-Services (siehe dazu Abschnitt 2.2) zu generieren, wie im folgenden Beispiel (Listing 2.2) erläutert. Dafür wird im ersten Schritt die Option *java\_generic\_services* (für Java-Applikationen) gesetzt — für weitere Programmiersprachen siehe [7]. Anschließend folgt die Beschreibung des Service, der in diesem Beispiel einen RPC-Aufruf *order* erzeugt, welcher einen *BookOrderRequest* übergeben bekommt und einen *BookOrderResponse* zurückliefert.

```
27 | option java_generic_services = true;
28 |
29 | service BookOrderService {
30 |     rpc order(BookOrderRequest) returns(BookOrderResponse);
31 | }
```

Listing 2.2: Erweiterung der *proto*-Nachricht für RPC

Dieser Service muss dann nur noch der *proto*-Datei angehängt werden.

## 2.5 Uberlay

Das Uberlay-Projekt [8] ist ein *high-performance small-scale overlay network*. Entwickelt wurde das Uberlay-Projekt am Institut der Telematik an der Universität zu Lübeck. Es basiert auf dem Netty-Framework (siehe Abschnitt 2.3) sowie dem Google-Protobuf-Projekt (siehe Abschnitt 2.4).

Uberlay unterstützt den Aufbau von Multi-Hop Netzwerken (siehe Abschnitt 2.1.4) und da in dieser Arbeit Nachrichtentypen des Message Exchange Pattern versendet werden, musste das Uberlay dahingehend angepasst werden, dass die Nachrichtentypen, der verwendeten Multi-Hop Topologie entsprechend übermittelt werden. Dabei wurde die Uberlay Architektur, wie in Abbildung 2.6 beschrieben, nicht verändert.

### 2.5.1 Architektur

Das Uberlay-Netzwerk lehnt sich konzeptuell stark an IP an. Hierzu wurde für den Paket-Transport ein einfaches (mittels Google Protobuf erstelltes) Protokoll entwickelt: das Uberlay-Protokoll (UP).

Anwendungen, welche das Uberlay-Netzwerk verwenden, hängen sich als *ChannelHandler* in die dafür bestimmte *ChannelPipeline* (**ApplicationChannelPipeline**) ein (siehe Abbildung 2.6). Dabei entspricht die *ApplicationChannelPipeline* einer *Netty-ChannelPipeline* (siehe Abschnitt 2.3) zur Verarbeitung von Nachrichten durch entsprechende *Handler*. Nachrichten werden, ähnlich wie bei UDP, an andere Uberlay-Hosts gesendet, indem in den versendeten Protokoll-Nachrichten zusätzlich die Adresse des Ziel-Knotens im Overlay-Netzwerk angegeben werden.

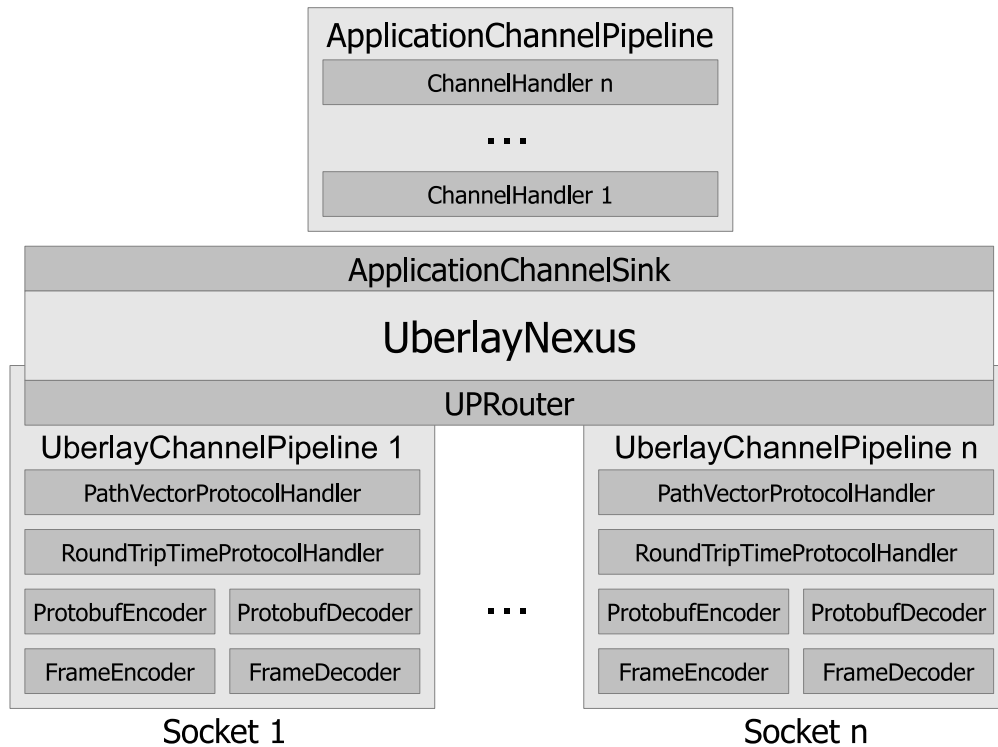


Abbildung 2.6: Overlay Layer Architektur

Die Klasse **UberlayNexus** verbindet nun die **ChannelPipeline** der Applikation, mit einer Menge von Verbindungen zum Overlay-Netzwerk. Sie implementiert eine Router-Funktionalität zum Empfangen (**UPRouter**) und Versenden von Nachrichten (**ApplicationChannelSink**) für UP und wählt je nach Zieladresse den nächsten Channel zum nächsten Hop des Multi-Hop Netzwerk. Der zu benutzende Channel wird mit Hilfe einer Routing-Tabelle ermittelt. Die Routing-Tabelle wird dabei mittels eines implementierten Pfadvektorprotokolls (siehe Abschnitt 2.5.2) erzeugt bzw. aktualisiert. Die Metrik der Routing-Tabellen wiederum werden durch das Round Trip Time Protokoll (siehe Abschnitt 2.5.3) bestimmt.

Die von Overlay konfigurierten Encoder und Decoder, in der **ChannelPipeline** von Overlay (**UberlayChannelPipeline**), sorgen dann für die Serialisierung bzw. Deserialisierung der Protokollnachrichten. Sollte die Zieladresse der eigene Netzknoten sein, so wird die Nachricht vom **UPRouter** wieder an die **ChannelPipeline** der Applikation hoch gesendet (Loopback-Funktionalität).

## 2.5.2 Pfadvektor Protokoll

Wie bereits in Abschnitt 2.1.2 erwähnt, besitzen Overlay-Netzwerke, zur Adressierung von Peers, Routingverfahren. Das *Pfadvektor Routing*, welches in Overlay verwendet wird, wird nun im Folgenden erläutert, wobei dieses Routingver-

fahren kein Overlay-spezifisches Verfahren ist.

### Algorithmus

Das Overlay-Peer-to-Peer Netzwerk unterstützt die Nutzung von Multi-Hop-Topologien (siehe Abschnitt 2.1.4). Das bedeutet, sind Peers nicht direkt miteinander verbunden, so müssen Nachrichten über dazwischenliegende Peers übertragen werden. Das heißt, bezogen auf Abbildung 2.7(a), werden Informationen von Peer A nach Peer D übertragen, so müssen diese z.B. über Peer C übertragen werden. Die Entscheidung welche Peers für diese Weiterleitungen verwendet werden sollen, trifft das implementierte Routing-Protokoll. Das hier verwendete Pfadvektor Protokoll ist eines von diesen und gehört zur Familie der *Distanzvektor Routing Protokolle*.

*Distanzvektor Protokolle* dienen dabei zur Berechnung des kürzesten Weges von einem Start- zu einem Zielknoten. Der Algorithmus sorgt dafür, das in periodischen Abständen eine Kopie der eigenen Routing-Tabelle an die Nachbarknoten weitergegeben werden, um mittels dieser Tabellen den kürzesten Weg zu berechnen bzw. zu aktualisieren.

Der *Pfadvektor Protokoll Algorithmus* arbeitet wie folgt:

Jeder Knoten speichert in seiner Routing-Tabelle nicht nur die von ihm erreichbaren Zielknoten, sondern zusätzlich die möglichen Pfade zu diesem Knoten. Die so entstehende Routing-Tabelle entspricht dann dem *Spannbaum* des Netzwerks. Da sich aber sowohl der benötigte Speicherplatz als auch die benötigte Suchzeit im Vergleich zu einem Spannbaum deutlich vergrößert, wird häufig bei Implementierungen, und so auch bei Overlay, der *minimale Spannbaum* verwendet. Eventuell ausfallende Pfade werden mittels einem Aktualisierungsintervall ersetzt, wobei dieser an die zu erwartende Stabilität des Netzwerks angepasst werden kann. Dies ist, bezogen auf die Zeit- und Platzkomplexität, im Allgemeinen kostengünstiger als die Verwendung der gesamten Spannbäume. So wird z.B. in Abbildung 2.7(b) für den Zielknoten D einzig der Pfad  $A \leftrightarrow C \leftrightarrow D$  in der Routing-Tabelle gespeichert und eben nicht der auch mögliche Pfad  $A \leftrightarrow B \leftrightarrow D$ .

Anhand dieses Pfades kann nun der günstigste Weg von einem Ziel- zu einem Endknoten in einem Multi-Hop-Netzwerk gefunden werden.

**Beispiel** Mittels der in Abbildung 2.7(b) dargestellten Pathvector-Routing-Tabelle kann nun z.B. folgende Frage beantwortet werden:

- Frage von E: Wie komme ich am schnellsten von A nach D?
- Antwort von A: Über die Route  $A \leftrightarrow C \leftrightarrow D$ , da:  
 $3 + 5 = \underline{8} \leq 9 = 2 + 7$

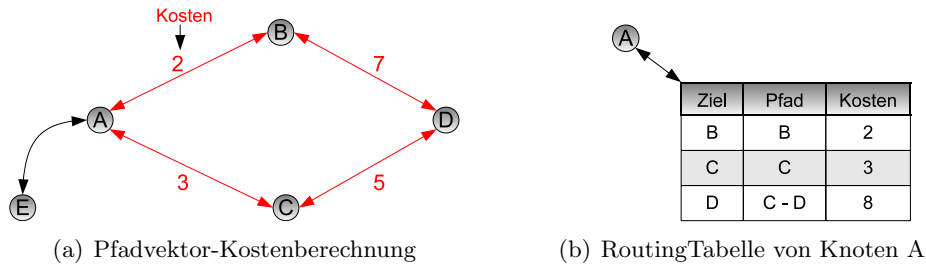


Abbildung 2.7: Pfadvektor Protokoll-Beispiel

### 2.5.3 Round Trip Time Protokoll

Das Round Trip Time Protokoll in Overlay berechnet und aktualisiert gegebenenfalls die Kosten (Metrik) der Routing-Tabellen-Einträge. Die Metrik entspricht dabei der Zeitspanne die vergeht, bis ein Datenpaket von einer Quelle zu einem Ziel und wieder zurück zur Quelle gereist ist. In Abbildung 2.8 ist die Berechnung einer Round Trip Time (RTT) der Route  $A \leftrightarrow B$  zu erkennen.

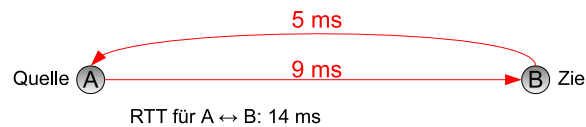


Abbildung 2.8: Berechnung einer Round Trip Time

## 2.6 Maven

Die Entwickler des Maven-Projekts [1] sehen Maven als *software project management and comprehension tool*. Maven wurde entwickelt, um den Build-Prozess eines Projekts zu vereinfachen, weshalb Maven primär auch heute meist als Build-Werkzeug verwendet wird. Maven bietet Entwicklern von Projekten inzwischen aber auch eine Vielzahl von weiteren Möglichkeiten:

- Erzeugen eines Build-Systems, mit dessen Hilfe ganze Projekte gebaut oder einzelne Build-Phasen durchgeführt werden können, wie z.B. das Validieren auf Korrektheit der Struktur des Projektverzeichnis und Verfügbarkeit aller benötigten Projekt-Informationen oder das Testen aller integrierten Software-Tests.
- Deklaratives Erzeugen und Verwalten von relevanten Projektinformationen wie z.B. das Verwalten von Abhängigkeiten zu anderen Projekten.
- Versionierung von Projekt-Releases, einschließlich der automatisierten Veröffentlichung auf der Projektseite.



### 2.6.1 Funktionsweise

#### POM

Das Grundgerüst von Maven ist das Konzept des **Project Object Model**, basierend auf einer Projektbeschreibung mittels XML in der Datei **pom.xml** im Wurzelverzeichnis des Projekts. Sämtliche für das Projekt relevanten Informationen werden in dieser POM, bzw. in anderen Dateien die auf diese POM verweisen, gehalten. Den Aufbau einer POM ist im Listing 2.3 anhand eines leicht angepassten Ausschnittes des Core-Moduls der Implementierung dieser Arbeit zuerkennen.

```

1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2 <project xmlns="http://maven.apache.org/POM/4.0.0"
3       xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
4       xsi:schemaLocation="http://maven.apache.org/POM/4.0.0_
      http://maven.apache.org/xsd/maven-4.0.0.xsd">
5
6   <modelVersion>4.0.0</modelVersion>
7
8   <groupId>de.uniluebeck.itm.ubermep</groupId>
9   <artifactId>core</artifactId>
10  <name>Ubermep :: Core</name>
11  <packaging>jar</packaging>
12  <version>0.1</version>
13
14  <dependencies>
15    <dependency>
16      <groupId>de.uniluebeck.itm.uberlay</groupId>
17      <artifactId>core</artifactId>
18      <version>0.1</version>
19    </dependency>
20
21    <dependency>
22      <groupId>commons-logging</groupId>
23      <artifactId>commons-logging</artifactId>
24      <type>jar</type>
25      <scope>compile</scope>
26    </dependency>
27  </dependencies>
28
29 </project>

```

Listing 2.3: Aufbau einer POM

Dabei haben die XML-Tags die folgende Bedeutung:

- **groupId** enthält die eindeutige Produktgruppe unter welcher das Projekt entwickelt wird. (meist in der Form einer umgekehrten Domain wie: de.uniluebeck.
- **artifactId** enthält die eindeutige Kennung (ID) des Artefakts in der Produktgruppe. Artefakte dienen dabei dem Bauen von Projekten, z.B. beim Erzeugen einer JAR, ist der Dateiname aus **<articfactId>-<version>.jar** zusammengesetzt.

- **name** beschreibt den vollen ausgeschriebenen Namen des Projekts.
- **packaging** definiert den Erstellungstyp des Artefakts des Projekts, wie z.B. **jar**, **war**, **ear** oder **pom**. Um das Generieren kümmern sich Maven-Plugins.
- **version** enthält die aktuelle Versionsnummer des Artefakts, welche zur Versionierung von Projekten benötigt werden.
- **dependencies** enthalten die Abhängigkeiten auf Artefakte anderer Projekte.

Die komplette XML-Schema-Datei für Maven 4.0.0 ist unter <http://maven.apache.org/xsd/maven-4.0.0.xsd> verfügbar.

### Verzeichnisstruktur

Maven erzeugt die Verzeichnisstruktur eines Softwareprojekts entsprechend des Prinzips *Convention over Configuration*, d.h. es verwendet Konventionen. In einem übergeordneten POM, dem Super POM, werden die Konventionen definiert. Alle Untermodule erben die Eigenschaften des Super POMs. Die Untermodule, die selbst jeweils ein POM enthalten, können geerbte Attribute überschreiben, Ausnahme hierbei, die nicht im Super POM definierten Attribute: **modelVersion** (Version der Maven-Implementierung), **groupId**, **artifactId** und **version**. Aus diesem Grund sind diese Attribute auch die einzigen, die beim Anlegen eines neuen Projekts angegeben werden müssen. Hieraus ergibt sich eine Standard-Verzeichnisstruktur wie sie im Listing 2.6.1 anhand eines Ausschnitts des Ubermep-Core Unter-Moduls zu erkennen ist.

```

1 | uberkep-core
2 | -- pom.xml
3 | -- src
4 | | -- main
5 | | | -- java
6 | | | | -- de
7 | | | | | -- uniluebeck
8 | | | | | -- itm
9 | | | | | -- uberkep
10 | | | | | -- mep
11 | | | | | | -- Peer.java
12 | | | -- resources
13 | | | | -- log4j.properties
14 | | | | -- mep.proto
15 | | -- test
16 | | | -- java
17 | -- target
18 | | -- classes
19 | | | -- de
20 | | | | -- uniluebeck
21 | | | | | -- itm
22 | | | | | -- uberkep
23 | | | | | -- mep
24 | | | | | | -- Peer.class
25 | | | | -- log4j.properties

```

```

26 | | '-- mep.proto
27 | | '-- core-0.1.jar
28 | | '-- test-classes

```

Im Hauptverzeichnis befindet sich in der `pom.xml` das POM. Im Unterverzeichnis `src/main/java` befindet sich der Quellcode. Die Quellcode-Dateien werden dann in Verzeichnissen entsprechend der Namen der packages abgelegt. Zusätzlich benötigte Ressourcen finden sich im Verzeichnis `src/main/resources`. Das Verzeichnis `target/classes` enthält schließlich die compilierten Quellcode-Dateien, sowie das gesamte compilierte gepackte Projekt. Das Ausführen einzelner Build-Phasen, sogenannter *Goals*, erfolgt dabei im Wurzelverzeichnis des Projekts, im Falle von *compile* durch das Ausführen des Befehls `mvn compile`.

### 2.6.2 Maven in dieser Arbeit

Diese Arbeit verwendet Maven um die verschiedenen teils voneinander abhängigen Module zu trennen. Hierbei gibt es eine **Parent POM**: das **Ubermep-Parent**. Diese Parent-POM ist zuständig für sämtliche Untermodule wie **Uberlay-Parent** oder **Ubermep-Core**.

## 2.7 Mockito

Mockito [12] ist eine Java-Programmbibliothek zum Erstellen von sogenannten *Mock-Objekten* in Unit-Tests. *Mock-Objekte* dienen dabei als Platzhalter für tatsächliche Java-Objekte. Diese Mock-Objekte helfen dann dem Entwickler dabei das korrekte Verhalten von Interfaces zu testen. Der Vorteil hierbei: die zu testenden Interfaces können isoliert von ihren Abhängigkeiten, also ihrer Umgebung getestet werden. Diese *Mock-Objekte* können dabei *Testgetriebene Entwicklung* (TDD) bzw. *Verhaltensgetriebene Softwareentwicklung* (BDD) vereinfachen.

### 2.7.1 Mockito in dieser Arbeit

In dieser Arbeit wird Mockito dafür eingesetzt, um zu überprüfen und sicherzustellen, dass ausgewählte Vorgänge das tun, wofür sie vorgesehen sind. Dies wird sowohl über die korrekten Rückgabewerte als auch das Überprüfen interner Aufrufe gewährleistet. Das folgende vereinfachte Beispiel in den Listings 2.4 und 2.5 soll dabei die hier verwendete Funktionsweise veranschaulichen:

```

1 | public class PhoneBook{
2 |     private final List<PhoneBookEntry> entryList;
3 |
4 |     public PhoneBook(List<PhoneBookEntry> entryList) {
5 |         this.entryList = entryList;
6 |     }
7 |

```

```
8      public void add(PhoneBookEntry entry){
9          this.entryList.add(entry);
10     }
11 }
```

Listing 2.4: Klasse PhoneBook

Angenommen es existiert nun das Interface *PhoneBookEntry*. Jetzt kann man das korrekte Verhalten der Methode *add(PhoneBookEntry entry)* der Klasse *PhoneBook* wie folgt testen:

```
1  @RunWith(MockitoJUnitRunner.class)
2  public class PhoneBookTest {
3      @Mock
4      List<PhoneBookEntry> entryList;
5
6      @Mock
7      PhoneBookEntry entry;
8
9      PhoneBook phoneBook; //zu testendes Objekt
10
11     @Test
12     public void testAdd(){
13         phoneBook = new PhoneBook(entryList);
14
15         phoneBook.add(entry);
16         verify(entryList, times(1)).add(entry);
17                                     // Bestätigen das intern die
18                                     // Methode entryList.add(entry)
19                                     // einmal aufgerufen wird
20     }
21 }
```

Listing 2.5: Testklasse PhoneBookTest

Der Vorteil hierbei: *nur* das Verhalten der Klasse *PhoneBook* wird getestet, nicht das der Interfaces *PhoneBookEntry* bzw. *List*.

### 2.7.2 Weitere Funktionen

An dieser Stelle soll auf die weiteren vielfältigen Funktionalitäten von Mockito nicht weiter eingegangen werde. Sei hier nur auf die Dokumentationsseite von Mockito [\[13\]](#) verwiesen, wo diese näher beschrieben und anhand von Beispielen leicht nachzuvollziehen sind.

## 3 Entwurf

In diesem Kapitel wird der Entwurf der in Kapitel 4 beschriebenen Implementierung erklärt. In Abschnitt 3.1 werden die Message Exchange Pattern definiert und anschließend näher beschrieben.

Diese Patterns liefern die Basis des im Abschnitt 3.2 dargestellten Architektur-entwurfs der Applikation, sowie die des in Abschnitt 3.3 spezifizierten Protokolls.

### 3.1 Message Exchange Pattern

Message Exchange Pattern (MEP) ist eine Bezeichnung für ein Kommunikationsmodell das den Austausch von Nachrichten spezifizieren. Aufgrund dieser Patterns kann ein Protokoll, also eine Vereinbarung zwischen Knoten definiert werden, welche Typen von Nachrichten ausgetauscht werden.

Im Folgenden werden nun die Message Exchange Pattern, die in dieser Arbeit Verwendung finden, spezifiziert, wobei der Aufbau dabei wie folgt ist:

**{Pattern}**

- {Anfrage-Typ}: {Anzahl}
- {Antwort-Typ}: {Anzahl}

Anmerkung: Die in der Definition verwendete Zahl  $n$  entspricht dabei einer unbekannten, aber endlichen Zahl.

Der Anfrage-/Antwort- Typ hat dabei die folgende Bedeutung:

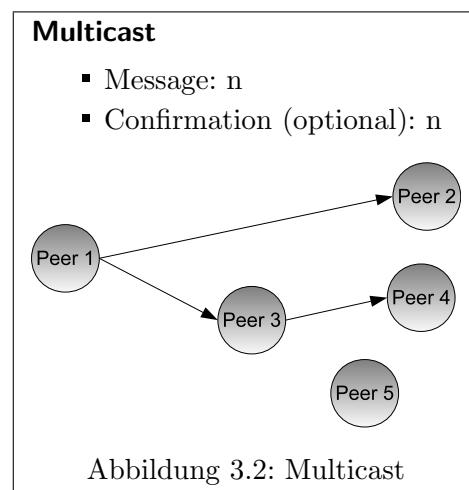
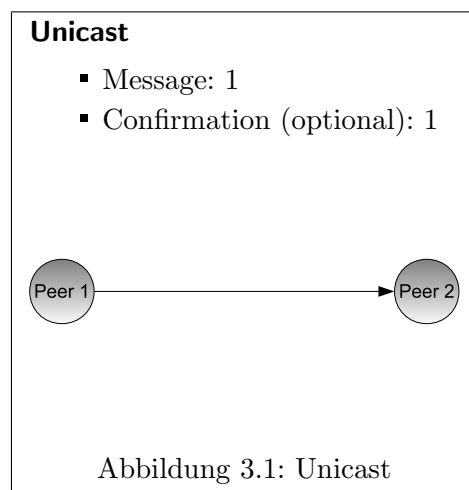
- *Message*: Nachricht mit der Struktur: **adresse, inhalt**
- *Confirmation*: Bestätigung mit der Struktur: **adresse**
- *Request*: Anfrage mit der Struktur: **adresse, inhalt**
- *Response*: Antwort mit der Struktur: **adresse, inhalt**

### 3.1.1 Definition

#### One-way:

**Unicast** Eine Unicast Nachricht wird an eine Adresse verschickt. Diese Nachricht beinhaltet einen Inhalt. Optional wird *eine* Bestätigung zurückgeschickt. Dabei enthält eine Bestätigung *keinen* Inhalt.

**Multicast** Eine Multicast Nachricht wird an mehrere Adressen verschickt. Alle Nachrichten beinhalten den selben Inhalt. Optional wird *jeweils eine* Bestätigungen zurückgeschickt. Dabei enthalten die Bestätigungen *keinen* Inhalt. Eine Multicast Nachricht wird erst zum letzt möglichen Verteiler vervielfältigt, entspricht also *nicht* n Unicast Nachrichten.

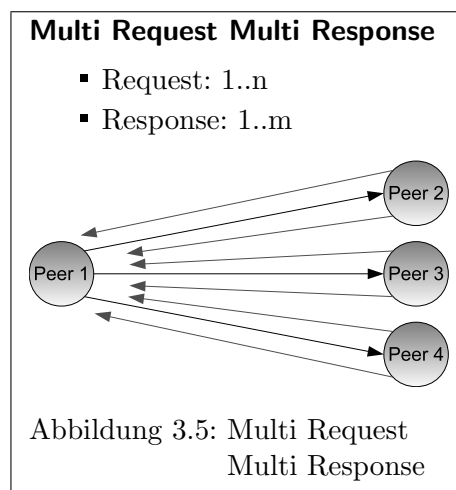
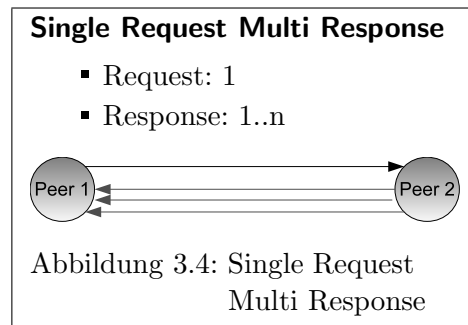
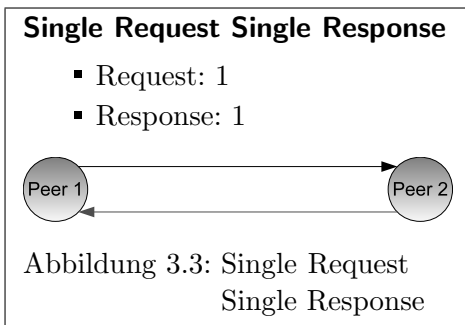


#### Request-Response:

**Single Request Single Response** Eine Single Request Single Response Nachricht entspricht einer Unicast Nachricht, die *eine* Antwort zurückgeschickt. Diese Antwort enthält ebenfalls einen Inhalt.

**Single Request Multi Response** Eine SingleRequestMultiResponse Nachricht entspricht einer Unicast Nachricht, die *mehrere* Antworten zurückgeschickt. Diese Antworten enthalten ebenfalls jeweils einen Inhalt.

**Multi Request Multi Response** Eine MultiRequestMultiResponse Nachricht entspricht einer Multicast Nachricht, die *jeweils eine oder mehrere* Antworten zurückgeschickt. Diese Antworten enthalten ebenfalls jeweils einen Inhalt.



Aus der oben beschriebenen Definition kann nun, mittels der Unterscheidung zwischen *Unreliable* (Anfrage ohne Bestätigung bzw. Antwort) und *Reliable* (Anfrage mit Bestätigung bzw. Antwort), das folgende komplette Pattern abgeleitet werden:

- Unreliable Messaging
  - Unreliable Unicast
  - Unreliable Multicast
- Reliable Messaging
  - Reliable Unicast
  - Reliable Multicast
  - Single Request Single Response
  - Single Request Multi Response
  - Multi Request Multi Response

### Anmerkung

Bei der Betrachtung der oben beschriebenen Definition könnte nun die Frage aufkommen, warum hier zwischen dem *Unreliable* und *Reliable* Messaging (z.B. bei Unicast-Nachrichten) unterschieden wird. Bei jedem Nachrichtenversand eines Reliable Messaging Pattern wird jeweils eine Bestätigung bzw. Antwort zum Sender zurückgeschickt. Dieses bedeutet allerdings sowohl einen zusätzlichen Netzwerkverkehr als auch eine zusätzliche Wartezeit auf die Antwort, obwohl diese gegebenenfalls gar nicht benötigt wird.

## 3.2 Architektur

Wie bereits erwähnt setzt diese Bachelorarbeit auf dem Netty-Framework (Abschnitt 2.3) auf. Dementsprechend orientiert sich die gewählte Architektur an diesem Framework. Die Architektur setzt sich dabei aus der Channel-Architektur und der Pipeline-Architektur zusammen.

### 3.2.1 Aufbau

Die gewählte Channel-Architektur ist aus den folgenden Komponenten zusammengesetzt:

- **Unicast / Multicast Channel:** wird einzig zum Versenden von Unicast und Multicast Nachrichten verwendet.
- **Single Request Single Response Channel:** wird einzig zum Versenden von Single Request Single Response Nachrichten verwendet.
- **Multi Response Channel:** wird einzig zum Versenden von Multi Response Nachrichten, namentlich Single Request Multi Response und Multi Request Multi Response verwendet.
- **RPC Channel:** wird einzig zum Aufruf von Remote Procedure Calls verwendet.

Die Zusammensetzung der einzelnen Komponenten ist in Abbildung 3.6 veranschaulicht, dabei ist die Transportschicht durch das Overlay-Projekt (Abschnitt 2.5) gegeben. Die Channel sind mittels einer Multiplexer / Demultiplexer - Logik, mit der Transportschicht verbunden. Jeder Channel besitzt eine eigene Pipeline, die wiederum Handler enthält, die für die Verarbeitung der Nachrichten sorgen.

### 3.2.2 Erläuterung

Die gewählte Architektur, welche oben beschrieben ist, orientiert sich an dem Aufbau der Netty-Architektur. Unicast bzw. Multicast Nachrichten liefern Con-



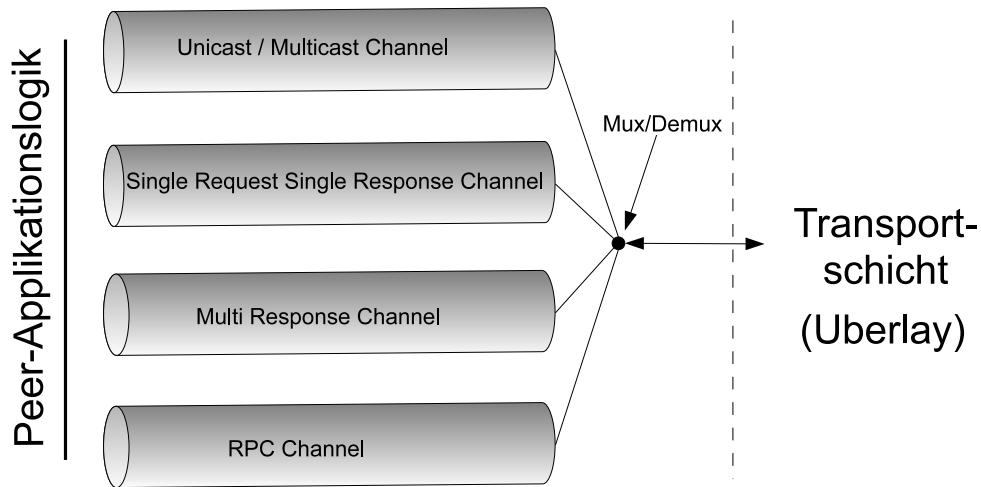


Abbildung 3.6: Vereinfachte Channel-Architektur

firmations zurück, die keinen Payload enthalten. Responses des Request-Response-Pattern, namentlich Single Request Single Response, Single Request Multi Response und Multi Request Multi Response liefern Responses zurück, welche mittels eigener ChannelFuture-Objekte, erzeugt werden. Der RPC Channel wiederum ermöglicht die Benutzung von Protobuf (Abschnitt 2.4).

### 3.3 Protokoll

Im Folgenden Abschnitt werden nun die, im Abschnitt 3.1 spezifizierten Message Exchange Pattern in ein Protokoll umgewandelt. Mittels diesem Protokoll können dann Nachrichtentypen des Message Exchange Pattern über den entsprechenden Channel versendet werden.

#### 3.3.1 Struktur

Dieser Abschnitt zeigt den schematischen Aufbau des verwendeten Protokolls und beschreibt deren benötigte und optionale Felder. In Abbildung 3.7 ist die Struktur des Protokolls zu sehen. Dabei sind die optionalen Felder mit \* gekennzeichnet. Diese Felder werden nur übertragen, wenn sie benötigt werden.

ID	Typ	Reliable	Akt. Nachricht*	Anz. Nachrichten*	Payload
----	-----	----------	-----------------	-------------------	---------

Abbildung 3.7: Schematischer Aufbau des Protokolls

Die in Abbildung 3.7 beschriebenen Felder haben die folgende Bedeutung:

- **ID**: ermöglicht die eindeutige Identifizierung einer Nachricht.
- **Typ**: besteht aus einem der folgenden möglichen Nachrichtentypen:
  - UNICAST
  - MULTICAST
  - SINGLE\_RESPONSE\_REQUEST
  - MULTI\_RESPONSE\_REQUEST
  - SINGLE\_RESPONSE
  - MULTI\_RESPONSE
  - RPC\_REQUEST
  - RPC\_RESPONSE
- Das Flag **Reliable** wird gesetzt falls eine Nachricht zu dem *Reliable Messaging* Pattern gehört.
- **Akt. Nachricht**: wird *nur* für MultiResponse-Nachrichten übertragen. Dieses Feld zeigt an welche Nummer die entsprechende Response besitzt. Beispiel: (*Aktuelle Nachricht*) **2** von (*Anzahl Nachrichten*) 4.
- **Anz. Nachrichten**: wird *nur* für MultiResponse-Nachrichten benötigt und beschreibt die zu erwartenden Responses.
- **Payload**: enthält den zu übertragene Inhalt.

### 3.3.2 Nachrichten

Im Folgenden wird nun die oben spezifizierte Struktur auf die Nachrichtentypen des Message Exchange Pattern angewendet. Dabei wurden in der Beschreibung die Felder *ID* und *Payload* nicht berücksichtigt, da diese auf die unterschiedlichen Nachrichtentypen keinen Einfluss haben. Desweiteren werden die Elemente *x* und - eingeführt. Sie besitzen die folgende Bedeutung:

- x* := gesetzt
- := nicht gesetzt

**Unreliable Messaging****Unreliable Unicast**

Typ	Reliable
UNICAST	-

(a) Unreliable Unicast-Request

**Unreliable Multicast**

Typ	Reliable
MULTICAST	-

(b) Unreliable Multicast-Request

**Reliable Messaging****Reliable Unicast**

Typ	Reliable
UNICAST	x

(c) Reliable Unicast-Request

**Reliable Multicast**

Typ	Reliable
MULTICAST	x

(d) Reliable Multicast-Request

**Single Request Single Response**

Typ	Reliable
SINGLE_RESPONSE_REQUEST	x

(e) Single Request Single Response-Request

Typ	Reliable
SINGLE_RESPONSE	x

(f) Single Request Single Response-Response

### Multi Response

Im Folgenden werden Single Request Multi Response und Multi Request Multi Response Nachrichten in einem *Multi Response*-Typ zusammengefasst. Die Unterscheidung hierbei wird über das Feld ID geregelt.

Typ	Reliable
MULTI_RESPONSE_REQUEST	x

(g) Multi Response-Request

Typ	Reliable	Akt. Nachricht	Anz. Nachrichten
MULTI_RESPONSE	x	x	x

(h) Multi Response-Response

### Remote Procedure Call

Typ	Reliable
RPC_REQUEST	-

(i) RPC-Request

Typ	Reliable
RPC_RESPONSE	-

(j) RPC-Response

## 4 Implementierung

In diesem Kapitel wird die Implementierung, genannt *Ubermep*, des in Kapitel 3 vorgestellten Architekturentwurfs erläutert.

In Abschnitt 4.1 wird zunächst ein Überblick über die Struktur der Implementierung gegeben. Danach wird erläutert wo und wie die im Grundlagenteil in Kapitel 2 vorgestellten Technologien Anwendung finden. Anschließend wird das im Entwurfskapitel spezifizierte Protokoll in Abschnitt 4.2 sowie die entwickelte Bibliothek, also der Kern der Implementierung in Abschnitt 4.3 genauer beleuchtet.

In Abschnitt 4.4 wird dann anhand von Beispielen gezeigt, wie ein Peer-to-Peer Overlay-Netzwerk mittels der Implementierung erzeugt werden kann und wie man über das Netzwerk Nachrichten des Message Exchange Pattern versendet, sowie Remote Procedure Calls über das Netzwerk ausgeführt werden.

Abschließend wird in Abschnitt 4.5 eine Auswahl von möglichen zukünftigen Erweiterung der Implementierung vorgestellt.

### 4.1 Einleitung und Überblick

Wie bereits in Abschnitt 2.6 erläutert wurde diese Arbeit mittels dem Build-Tool Maven entworfen. Daraus ergibt sich eine Projektstruktur bestehend aus verschiedenen Maven-Untermodulem welche im Folgenden Abschnitt erläutert werden.

#### Struktur und Komponenten

Diese Implementierung besteht aus 5 verschiedenen Untermodulem welche in einem sogenannten *Multi Module Project* zusammengefasst werden. Jedes Untermodul erbt von der Parent POM des **Ubermep-parent** Moduls. Die Aufteilung der verschiedenen Module ist hierbei im Listing 4.1 zu erkennen.

```
1 | uberkep-parent
2 | -- uberlay
3 |   '-- uberlay-core
4 | -- uberkep-cmdline
5 | -- uberkep-core
6 | -- uberkep-example
7 | '-- uberkep-gui
```

Listing 4.1: Ausschnitt aus der Uberkep-parent pom.xml

Im Folgenden nun eine kurze Beschreibung der einzelnen Module:

- **ubermep-parent** ist das Parent-Modul dieser Arbeit, welches den POM enthält. In seiner **pom.xml** werden dabei die enthaltenen Untermodule, sowie die in den Untermodulen benötigten Abhängigkeiten definiert. Diese Abhängigkeiten werden dann an die Untermodule vererbt.
- **ubermep-cmdline** enthält den Einstiegspunkt zum starten der Applikation aus der Kommandozeile.
- **ubermep-core** enthält die Bibliothek von **ubermep**. Dieses Modul hält unter anderem das zentrale Interface **Peer** bereit, welches benötigt wird um ein Overlay-Netzwerk zu erzeugen und Nachrichten des Message Exchange Pattern auszutauschen. Dieses Modul wird in Abschnitt 4.3 detailliert erklärt.
- **ubermep-example** enthält Beispiel-Anwendungen wie **ubermep-core** genutzt werden kann.
- **ubermep-gui** enthält eine Grafische Oberfläche zum Erzeugen eines Overlay-Netzwerks sowie zum Senden von Nachrichten des Message Exchange Pattern.

Da nur das Modul **Ubermep-core** die Bibliothek von **ubermep** enthält, wird in diesem Kapitel, in Abschnitt 4.3 auch nur auf dieses Modul näher eingegangen. Im Folgenden aber zunächst die Implementierung des in Abschnitt 3.3 vorgestellten Protokolls.

## 4.2 Protokoll

Wie im Abschnitt 2.4 bereits erläutert, wird zum Generieren der Protokoll-Nachrichten Google-Protobuf verwendet. Im Listing 4.2 ist die mittels der Protobuf-IDL erstellten Protokoll-Datei zu erkennen, die auf der Spezifikation des Protokoll-Entwurfs (3.3) des Entwurfskapitel 3 basiert. Diese kann dann unter Benutzung des Protobuf-Compiler als serialisierte Protokoll-Nachricht über den Kommunikationskanal versendet werden.

### MEPPacket

Das serialisierbare Protokoll dieser Applikation, das *MEPPacket*, ist wie folgt aufgebaut:

```
1 message MEPPacket {  
2     required bool reliable = 1;  
3     required MessageType messageType = 2;  
4     required bytes payload = 3;  
5  
6     optional uint32 requestID = 4;  
7     optional bool exceptionOccurred = 5;  
8     optional uint32 currentMessageNumber = 6;  
9     optional uint32 totalMessageNumber = 7;
```

```

10|    optional RPCMessage rpcMessage = 8;
11| }

```

Listing 4.2: MEP.proto

Es besteht aus den benötigten (*required*) Feldern:

- **reliable** spezifiziert ob eine Unicast bzw. Multicast-Nachricht *reliable* und *unreliable* ist. Request-Response-Nachrichten sind immer *reliable*
- **messageType** beschreibt den Pattern - Typ der Nachricht. Eine genauere Beschreibung findet sich weiter unten.
- **payload** enthält den Inhalt einer Nachricht

sowie den optionalen (*optional*) Feldern, die nur übertragen werden, wenn benötigt:

- **requestID** wird intern für die Abarbeitung von Request-Response-Nachrichten benötigt. Jeder Request bekommt beim Aufruf eine RequestID zugewiesen. Wird die über die RequestID gekennzeichnete korrespondierende Response empfangen, so wird der Request als erfolgreich ausgeliefert gewertet.
- **exceptionOccured** zeigt an ob Server-seitig, also auf der Seite des Empfängers, beim Abarbeiten des *payloads* eine Ausnahme aufgetreten ist
- **currentMessageNumber** zeigt an, welche Nummer die Antwort besitzt. Dieses Feld wird ausschließlich für MultiResponse-Nachrichten benötigt
- **totalMessageNumber** zeigt an, wieviel Antworten versendet bzw. erwartet werden. Dieses Feld wird ausschließlich für MultiResponse-Nachrichten benötigt
- **rpcMessage** beschreibt eine RPC-Message. Eine genauere Erläuterung findet sich weiter unten.

**MessageType** Der Aufzählungstyp *MessageType* spezifiziert den Pattern -Typ der Nachricht und ist wie folgt aufgebaut:

```

12| enum MessageType {
13|     UNICAST = 1;
14|     MULTICAST = 2;
15|     SINGLE_RESPONSE_REQUEST = 3;
16|     MULTI_RESPONSE_REQUEST = 4;
17|     SINGLE_RESPONSE = 5;
18|     MULTI_RESPONSE = 6;
19|     RPC_REQUEST = 7;
20|     RPC_RESPONSE = 8;
21| }

```

Listing 4.3: MEP.proto

Der MessageType enthält die folgenden Nachrichten-Typen:

- **UNICAST** ist zuständig für Unicast Nachrichten; hierbei findet keine Unterscheidung zwischen *unreliable* bzw. *reliable* Unicast statt. Dies wird über das Flag **reliable** im **MEPPacket** spezifiziert

- **MULTICAST** ist zuständig für Multicast Nachrichten; auch hierbei findet keine Unterscheidung zwischen unreliable bzw. reliable Multicast statt.
- **SINGLE\_RESPONSE\_REQUEST** beschreibt einen SingleRequestSingle-Response-Request
- **MULTI\_RESPONSE\_REQUEST** beschreibt einen SingleRequestMulti-Response-Request sowie für ein MultiRequestMultiResponse-Request
- **SINGLE\_RESPONSE** ist zuständig für einen SingleRequestSingleResponse-Response
- **MULTI\_RESPONSE** ist zuständig für einen SingleRequestMultiResponse-Response sowie für einen MultiRequestMultiResponse-Response
- **RPC\_REQUEST** beschreibt einen RPC-Request
- **RPC\_RESPONSE** beschreibt einen RPC-Response

**RPCMessage** Die **RpcMessage** wird, wie oben bereits erwähnt für den Aufruf eines Remote Procedure Calls benötigt und ist wie folgt aufgebaut:

```

22 message RpcMessage {
23     required string serviceName = 1;
24     required string methodName = 2;
25     required ServiceType serviceType = 3;
26 }
```

Listing 4.4: MEP.proto

Der *RpcMessage*-Typ besteht aus den benötigten (*required*) Feldern:

- **serviceName** enthält den Klassen-Namen des aufzurufenden RPC-Services
- **methodName** enthält den Methoden-Name des aufzurufenden RPC-Services
- **serviceType** beschreibt den Typ des aufzurufenden Service. Eine genauere Beschreibung findet sich weiter unten.

Da die Parameter mittels des eigens generierten Protobuf-RPC-Requests übergeben werden (siehe Abschnitt 2.4), brauchen diese nicht in der Protokoll-Nachricht zu übertragen werden.

**ServiceType** In *ubermep* wird zwischen einem blockierendem und nicht-blockierendem RPC-Aufruf unterschieden. Aus diesem Grund muss der **ServiceType** für die Beschreibung des *RpcMessage*-Typ übertragen werden. Dieser ist wie folgt aufgebaut:

```

27 enum ServiceType {
28     SERVICE = 1;
29     BLOCKING_SERVICE = 2;
30 }
```

Listing 4.5: MEP.proto



Der *ServiceType* besteht aus den Feldern:

- **SERVICE** wird gesetzt wenn der RPC-Service als nicht-blockierender Aufruf verwendet wird
- **BLOCKING\_SERVICE** wird gesetzt wenn der RPC-Service als blockierender Aufruf verwendet wird

## 4.3 Ubermep-core

Das Modul **Ubermep-core** enthält zum Einen das oben beschriebene Protokoll, als auch wie bereits erwähnt die Kernimplementierung dieser Arbeit. Es enthält das Interface **Peer** zum Erzeugen von Peers, mit welchem dann der Aufbau eines Peer-to-Peer Overlay-Netzwerks möglich ist. Über dieses Netzwerk kann man dann Nachrichten von einem Peer zu einem weiteren Peer, bzw. mehreren weiteren Peers senden. Des weiteren ist es möglich über einen Peer einen Remote Procedure Call (siehe Abschnitt 2.2) auf einem anderen Peer des Overlay-Netzwerks auszuführen. Im Folgenden wird nun erläutert, wie die Struktur des Moduls **Ubermep-core** aufgebaut ist

### 4.3.1 Einleitung

Im Folgenden werden zunächst die Aufgaben eines Peers in *ubermep* beschrieben.

Ein Peer in *ubermep* besitzt die Aufgabe, ein Overlay-Netzwerk zu erzeugen oder sich mit einem bestehenden Netzwerk zu verbinden bzw. ggf. sich von diesem zu trennen. Hierfür wird die Möglichkeit des Startens und Stoppens eines Peers benötigt. Des weiteren wird neben dem Senden von unterstützten Nachrichtentypen des Message Exchange Pattern, die Möglichkeit zum Verarbeiten von empfangenden Nachrichteninhalten benötigt. Abschließend ist das Ausführen von Remote-Procedure Calls sowie das Hinzufügen von zusätzlichen Handlern zum Verarbeiten von eigenen Nachrichtentypen erforderlich.

### 4.3.2 Schnittstellen

Im Folgenden nun die entscheidenden Schnittstellen des *Ubermep-core* Moduls, welche die oben beschriebenen Aufgaben definieren. Anschließend folgen die entsprechenden Implementierung der Schnittstellen sowie die Abhängigkeiten der Schnittstellen untereinander.

#### **Peer**

Aus der Beschreibung zum Erzeugen, Verbinden bzw. Trennen eines Peers ergibt sich nun die folgende Schnittstelle:

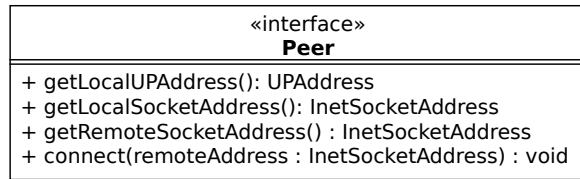


Abbildung 4.1: Aufbau des Peer-Interface

- *getLocalUPAddress()* gibt die lokale UPAdresse zurück, welche die eindeutige Addressierung für Nachrichten in einem Overlay-Netzwerk ermöglicht. Sie ist vom Typ **UPAddress**, kommt aus dem Overlay-Projekt (2.5) und ist eine Unterklasse vom Typ **SocketAddress** aus dem Package *java.net*. Die typische Addressierung in einem Peer-to-Peer Overlay-Netzwerk erfolgt dabei z.B. über eine **URN** (Uniform Resource Name), welche wie folgt aufgebaut ist: *urn:namensraum:id*, also z.B. *urn:itm:1* für den ersten Knoten im itm-Namensraum.
- *getLocalSocketAddress()* gibt die lokale SocketAdresse zurück. Sie ist vom Typ **InetSocketAddress** aus dem Package *java.net*, enthält einen *hostname*, typischerweise eine IPv4 oder eine IPv6 Adresse und einen Port. An diese lokale SocketAdresse wird dann der Netty-Channel zum Nachrichtenaustausch gebunden.
- *getRemoteSocketAddress()* gibt die remote SocketAdresse vom Typ **InetSocketAddress** zurück, mit welcher der Peer beim Start verbunden wurde.
- *connect(InetSocketAddress remoteAddress)* verbindet den Peer mit einem weiteren Peer welcher zu der übergebenen *remoteAddress* gehört.

Die weiteren Aufgaben eines Peers in *ubermep* sind nun in den folgenden Service-Interfaces definiert.

## Service

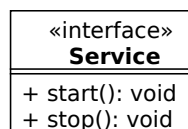


Abbildung 4.2: Aufbau des Service-Interface

Die Aufgaben eines Services sind:

- *start()* startet einen Peer und erzeugt bzw. verbindet diesen mit einem Netzwerk.

- *stop()* stoppt einen Peer und trennt diesen vom Netzwerk

### UbermepService

Der UbermepService hat die Aufgabe eigene hinzugefügte Nachrichtentypen zu unterstützen.

«interface» <b>UbermepService</b>
+ registerChannelHandler(channelHandler: SimpleChannelHandler): void + registerUpstreamHandler(upstreamHandler: ChannelUpstreamHandler): void + registerDownstreamHandler(downstreamHandler: ChannelDownstreamHandler): void + write(o: Object, urn: UPAddress): void

Abbildung 4.3: Aufbau des UbermepService-Interface

**Unterstützung eigener Nachrichtentypen** Für die Unterstützung von eigens Hinzugefügten Nachrichtentypen sind die folgenden Methoden von Bedeutung:

- *registerChannelHandler(SimpleChannelHandler handler)* fügt einen SimpleChannelHandler (aus dem Netty-Framework 2.3) an einem Peer hinzu. SimpleChannelHandler können sowohl empfangende, als auch gesendete Nachrichten verarbeiten.
- *registerUpstreamHandler(ChannelUpstreamHandler handler)* fügt einen ChannelUpstreamHandler (aus dem Netty-Framework 2.3) an einem Peer hinzu. ChannelUpstreamHandler sind einzig für das Verarbeiten von Empfangenden Nachrichten zuständig.
- *registerDownstreamHandler(ChannelDownstreamHandler handler)* fügt einen ChannelDownstreamHandler (aus dem Netty-Framework 2.3) an einem Peer hinzu. ChannelDownstreamHandler sind einzig für das Verarbeiten von Gesendeten Nachrichten zuständig.

Für das Nutzen von eigenen Nachrichtentypen müssen dann eigene entsprechend Handler implementiert und an einem Peer mittels der entsprechenden *register*-Methode registriert werden. In den eigens implementierten ChannelHandlern müssen die jeweiligen zuständigen Methoden überschrieben bzw. implementiert werden. Diese ChannelHandler werden der ChannelPipeline der entsprechenden Peers gemäß der Architektur des Netty-Frameworks hinzugefügt.

Für die Implementierung gibt es dabei drei verschiedene Varianten, wobei aber jeweils immer für das Verarbeiten von Empfangenden Nachrichten die Methode *handleUpstream(ChannelHandlerContext ctx, ChannelEvent e)*, sowie fürs Verarbeiten von Versendeten Nachrichten die Methode *handleDownstream(ChannelHandlerContext ctx, ChannelEvent e)* überschrieben werden muss:

- **Variante 1:** Umbau einer Empfangenden / Gesendeten Nachricht in einen unterstützten Nachrichtentyp des Message Exchange Pattern wie z.B. in

eine SingleRequestSingleResponse-Nachricht.

- **Variante 2:** Hinzufügen von eigenen oder mitgelieferten Netty- Decodern bzw. Encodern (2.3)
- **Variante 3:** Hinzufügen von eigenen Protokoll-Nachrichten mittels des Google-Protobuf Projekts (2.4). Zusätzlich muss dann ein ProtobufDecoder für die entsprechende Protokoll-Nachricht der Pipeline hinzugefügt werden.

Anschliessend können dann diese Nachrichten mittels der folgenden Methoden versendet werden:

- *write (Object object, UAddress urn)* versendet eine *One-way* -Pattern-Nachricht an einen Empfänger
- *write(Object object, UAddress urn, Class channelFutureClass)* versendet eine *Request-Response* -Pattern-Nachricht und bekommt eine Antwort mittels der als Parameter übergebenen ChannelFuture-Klasse zurück. Die übergegebene ChannelFuture-Klasse muss eine Implementierung der Abstrakten Klasse **UbermepAbstractChannelFuture** aus dem Package *mep.channel.future* sein. Wobei einzig und allein der Konstruktor implementiert werden muss.

Ein Beispiel für das Versenden eines eigens hinzugefügten Nachrichtentyp mittels Variante 1 ist im Abschnitt 4.4 zu finden.

### UbermepUnreliableService



Abbildung 4.4: Aufbau des UbermepUnreliableService-Interface

Die Aufgabe des UbemepUnreliableService liegt in der Versendung von Unreliable Nachrichten (siehe Kapitel 3.1 ) und haben dementsprechend nur die eine Methode:

- *send(UnreliableRequest request)* versendet einen UnreliableRequest.

### UbermepReliableService

Die Aufgabe des UbermepReliableService liegt in der Versendung von Reliable Nachrichten (siehe Kapitel 3.1) und haben dementsprechend nur die eine Methode:

- *send(ReliableRequest request)* versendet einen ReliableRequest und gibt den Response als ListenableFuture-Objekt zurück.



Abbildung 4.5: Aufbau des UbermepReliableService-Interface

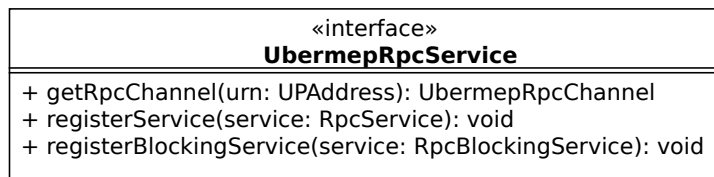
**UbermepRpcService**

Abbildung 4.6: Aufbau des UbermepRpcService-Interface

Die Aufgabe des UbermepRpcService liegt in der Verarbeitung von Remote Procedure Calls (RPC). Für das Ausführen von RPC's sind dabei die folgenden Methoden von Bedeutung:

- *getRpcChannel(UAddress urn)* erzeugt einen RpcChannel zu einer Adresse eines Peers des Overlay-Netzwerk
- *registerService(RpcService service)* registriert einen RpcService an einem Peer, so dass dieser von anderen Peers aufgerufen werden kann
- *registerBlockingService(RpcBlockingService service)* registriert einen RpcBlockingService an einem Peer zum Ausführen eines RPC

Der Ablauf ist dabei wie folgt: zuerst registriert man einen RpcService an einem Peer. Anschliessend lässt man sich einen RpcChannel zu einer Adresse eines Peers erzeugen. Über diesen Channel kann man dann einen RPC ausführen. Der Unterschied zwischen einem (Non-Blocking) RpcService und einem RpcBlockingService ist der, dass ein RpcService ein nicht-blockierender Aufruf ist, welcher den Rückgabewert in einem RpcCallback zurückgibt, während der RpcBlockingService ein blockierender Aufruf ist der den Rückgabewert über den Methodenaufruf zurückbekommt.

Das Erzeugen und Aufrufen eines RPC ist im Abschnitt 4.4 anhand eines Beispielaufrufes zu erkennen.

**RequestListenerService**

Zum Verarbeiten von Requests werden *Listener* verwendet. Diese Listener werden mittels der folgenden Methoden an einem Peer registriert:

- *addRequestListener(UnicastMulticastRequestListener listener)* fügt ein UnicastMulticastRequestListener an dem jeweiligen Peer hinzu

«interface» <b>RequestListenerService</b>
+ addRequestListener(listener: UnicastMulticastRequestListener): void + addRequestListener(listener: SingleRequestSingleResponseRequestListener): void + addRequestListener(listener: MultiResponseRequestListener): void

Abbildung 4.7: Aufbau des RequestListenerService-Interface

- *addRequestListener(SingleRequestSingleResponseRequestListener listener)* fügt ein SingleRequestSingleResponseRequestListener an dem jeweiligen Peer hinzu
- *addRequestListener(MultiResponseRequestListener listener)* fügt ein MultiResponseRequestListener an dem jeweiligen Peer hinzu

Diese Listener arbeiten dabei nach dem Pattern der *Chain of responsibility*. Das bedeutet die Listener eines Typs werden hintereinander in einer Kette angeordnet. Dann durchläuft eine Anfrage die Kette. Ist ein Listener dabei, der auf die Anfrage reagiert, wird dieser verwendet und der Aufruf beendet. Wenn nicht, wird weiter nach diesem Muster die Kette abgearbeitet. Reagiert kein Listener auf die Anfrage, gilt das Verarbeiten eines Nachrichten-Inhalts als fehlgeschlagen.

Im Folgenden nun die verschiedenen Listener-Schnittstellen:

#### UnicastMulticastRequestListener

«interface» <b>UnicastMulticastRequestListener</b>
+ handleUnicastMulticastRequest(senderUrn: String, payload: byte[]): boolean

Abbildung 4.8: Aufbau des UnicastMulticastRequestListener-Interface

- *handleUnicastMulticastRequest(String senderUrn, byte[] payload)* verarbeitet den Inhalt von Unicast und Multicast Requests. Liefert *true* zurück wenn Inhalt erfolgreich gelesen wurde, sonst *false*.

#### SingleRequestSingleResponseRequestListener

- *handleSingleRequestSingleResponseRequest(String senderUrn, byte[] request-Payload)* verarbeitet den Inhalt von SingleRequestSingleResponse-Requests. Liefert einen Response-Inhalt als *byte[]* zurück wenn Request-Inhalt erfolgreich verarbeitet wurde, sonst *null*. Falls bei Verarbeitung eine *Exception* auftritt, wird ein *MEPSingleResponseExceptionEvent* geworfen.

«interface» <b>SingleRequestSingleResponseRequestListener</b>
+ handleSingleRequestSingleResponseRequest(senderUrn: String, payload: byte[]): byte[]

Abbildung 4.9: Aufbau des SingleRequestSingleResponseRequestListener-Interface

### MultiResponseRequestListener

- *handleMultiResponseRequest(MultiResponseHandle responseHandle, String senderUrn, byte[] requestPayload)* verarbeitet den Inhalt von *einem* MultiResponseRequest. Liefert *true* zurück wenn Inhalt erfolgreich verarbeitet wurde, sonst *false*. Falls bei Verarbeitung eine *Exception* auftritt, wird ein *MEP-MultiResponseExceptionEvent* geworfen.

«interface» <b>MultiResponseRequestListener</b>
+ handleMultiResponseRequest(handle: MultiResponseHandle, urn: String, payload: byte[]): boolean

Abbildung 4.10: Aufbau des MultiResponseRequestListener-Interface

Für das Erzeugen der einzelnen Antworten eines MultiResponseRequests, muß jeweils die folgende Methode des MultiResponseHandle-Interface aufgerufen werden:

«interface» <b>MultiResponseHandle</b>
+ handleSingleResponse(payload: byte[], current: int, total: int): void

Abbildung 4.11: Aufbau des MultiResponseHandle-Interface

### MultiResponseHandle

- *handleSingleResponse(byte[] payload, int current, int total)* erzeugt eine Antwort mit dem entsprechenden Inhalt und sendet diese zurück. Der Parameter *current* entspricht dabei der Zahl der aktuellen Nachricht und *total* der Gesamt-Anzahl der zurückzusendenden Nachrichten, wobei zu beachten ist, das der Wert *total* immer gleich bleiben sollte.

Für die Listener: *SingleRequestSingleResponseRequestListener* und *MultiResponseRequestListener* gilt dabei: ist an einem Peer kein entsprechender RequestListener registriert, bzw. fühlt sich für den Inhalt einer Nachricht kein RequestListener verantwortlich, so wird von der Applikation default-mäßig eine *RequestListenerNotFoundException* geworfen. Diese wird einem *MEPExceptionEvent*

übergeben welches dann zu einer ErrorResponse zusammengesetzt wird, die dann an den Sender der Request-Response-Nachricht übertragen wird.

Des weiteren gibt es client-seitig einen zusätzlichen Listener für den Eingang von MultiResponse-Responses:

### ProgressListenerRunnable

«interface» <b>ProgressListenerRunnable</b>	
+ progress(senderUrn: String, payload: byte[], current: int, total: int): void	
+ run(): void	

Abbildung 4.12: Aufbau des ProgressListenerRunnable-Interface

- *progress(String senderUrn, byte[] payload, int current, int total)* wird bei Eingang einer MultiResponse aufgerufen

Ein ProgressListenerRunnable kann dann über das ResponseFuture eines ReliableRequests über die Methode `addListener(ProgressListenerRunnable listener, Executer executer)` hinzugefügt werden.

### 4.3.3 Implementierung und Abhängigkeiten

#### PeerImpl

Im Folgenden werden nun die Abhängigkeiten um den zentralen Einstiegspunkt des Ubermep-core Moduls, die **PeerImpl**, genauer beleuchtet. Die entsprechende Struktur ist dabei in Abbildung 4.13 zu erkennen. Anmerkung: Um das Schaubild nicht unnötig zu verkomplizieren sind dabei die Methoden weggelassen. Die weggelassenen Methoden wurden bereits oben in der entsprechenden Schnittstellenbeschreibung erklärt.

Die PeerImpl besitzt eine Aggregationsabhängigkeit zum OverlayModule aus dem Overlay-Projekt. Des weiteren ist sie die Oberklasse des AbstractPeer welche die Adressierung eines Peer steuert. Der AbstractPeer wiederum ist die Oberklasse des Interface Peer, welches wiederum die Interfaces Service, ServiceHandler, UbermepService, UbermepUnreliableService sowie UbermepReliableService implementiert. Die Implementierungen sämtlicher Service-Interfaces sind dabei in der PeerImpl zu finden.

Bevor hier nun die ServiceHandler-Interfaces beschrieben werden, soll nun kurz auf den AbstractServiceHandler eingegangen werden. Dieser AbstractServiceHandler bildet die Basis der nun folgenden ServiceHandler welche sich für den Austausch von Nachrichten des Message Exchange Pattern verantwortlich zeichnen. Der AbstractServiceHandler implementiert dabei das bereits beschriebene



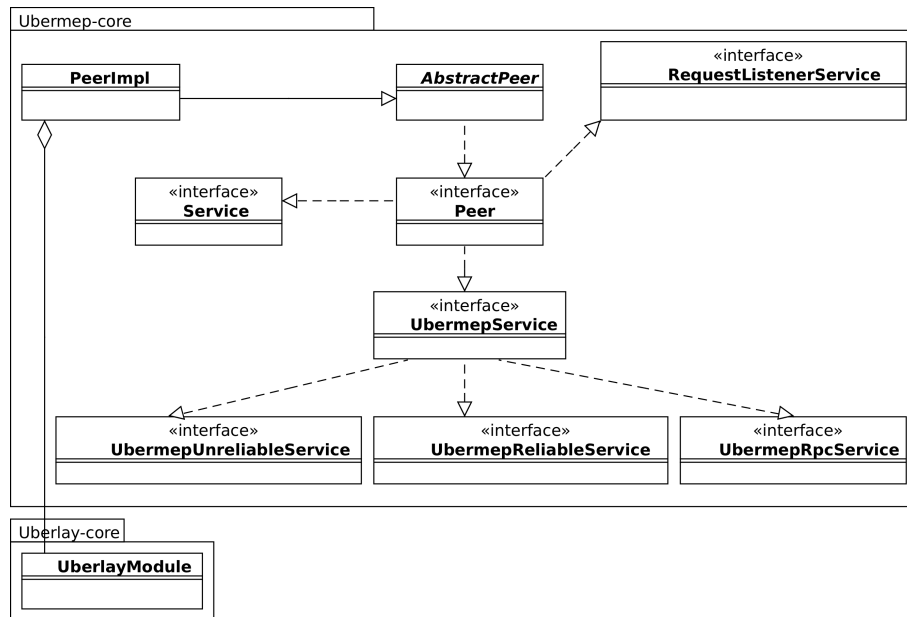


Abbildung 4.13: Vererbungshierarchie und Abhängigkeiten der PeerImpl

RequestListenerService-Interface sowie die SimpleChannelHandler-Klasse aus dem Netty-Framework. Die Abhängigkeiten sind dabei in der Abbildung 4.14 veranschaulicht, wobei hier nur auf die, für den AbstractServiceHandler, entschiedenen Methoden eingegangen wird.

- *messageReceived(ChannelHandlerContext ctx, ChannelEvent e)* wird aufgerufen wenn eine Protokoll-Nachricht im entsprechenden Handler empfangen wurde.
- *handleUpstream(ChannelHandlerContext ctx, ChannelEvent e)* behandelt ein event, das upstream empfangen wurde.
- *handleDownstream(ChannelHandlerContext ctx, ChannelEvent e)* behandelt ein event, das downstream empfangen wurde.

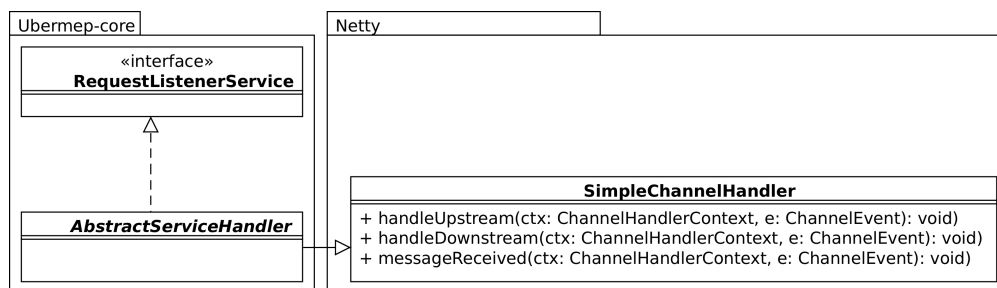


Abbildung 4.14: Abhängigkeiten des AbstractServiceHandler

## UnreliableServiceHandler

Des weiteren besitzt die bereits oben beschriebene PeerImpl eine Aggregationsabhängigkeit zum UnreliableServiceHandler der wiederum eine Oberklasse der AbstractService ist. Im UnreliableServiceHandler sind folgende Methoden von Bedeutung:

- *send(UnreliableRequest request, Channel channel)* sendet ein UnreliableRequest über den im Parameter angegeben *channel*. Gibt keinen Rückgabewert zurück.
- *messageReceived(ChannelHandlerContext ctx, MessageEvent e)* empfängt einen UnreliableRequest und ruft für die registrierten *UnicastMulticastRequestListener* die Methode *handleUnicastMulticastRequest(String senderUrn, byte[] payload)* auf.

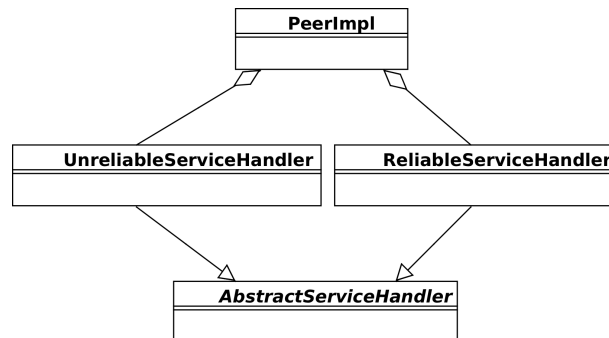


Abbildung 4.15: Abhängigkeiten des Unreliable- und ReliableServiceHandler

## ReliableServiceHandler

Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben enthält das *Reliable Messaging* von Overlay Nachrichten des One-way Pattern und des Request-Response Pattern. Dementsprechend verarbeitet der ReliableServiceHandler Nachrichten des One-way Pattern, namentlich Reliable Unicast und Reliable Multicast, sowie Nachrichten des Request-Response Pattern namentlich SingleRequestSingleResponse, SingleRequestMultiResponse und MultiRequestMultiResponse. Im Folgenden werden nun der ReliableServiceHandler, SingleRequestSingleResponseServiceHandler, SingleRequestMultiResponseServiceHandler sowie MultiRequestMultiResponseServiceHandler näher beschrieben. Die Abhängigkeiten für Nachrichten des One-way Pattern sind dabei in Abbildung 4.15 über das Interface ReliableServiceHandler veranschaulicht. Die Abhängigkeiten für Nachrichten des Request-Response Pattern sind in Abbildung 4.16 veranschaulicht.

Im ReliableServiceHandler sind dabei folgende Methoden von Bedeutung:

- *send(ReliableRequest request, Channel applicationChannel)* sendet ein ReliableRequest über den im Parameter angegeben *channel*. Gibt eine Re-

sponse als Future-Objekt zurück. Eine genau Beschreibung der zurückgelieferten Response findet sich weiter unten im Abschnitt 4.3.4. Falls der Request eine Request-Response-Pattern-Nachricht, wird diese an den korrespondierenden Channel weitergeleitet. Eine ausführliche Beschreibung hierfür findet sich weiter unten im Unterabschnitt *RequestResponseChannel*.

- *messageReceived(ChannelHandlerContext ctx, MessageEvent e)* empfängt ReliableUnicast- bzw. ReliableMulticast-Protokoll-Nachrichten und ruft für die registrierten *UnicastMulticastRequestListener* die Methode *handleUnicastMulticastRequest(String senderUrn, byte[] payload)* auf.
- *handleUpstream(ChannelHandlerContext ctx, ChannelEvent e)* empfängt einen ReliableRequest upstream im ApplicationChannel. Für den Fall dass es sich um einen SingleRequestSingleResponse-Request handelt, wird die Nachricht upstream an den SingleRequestSingleResponseChannel weitergereicht. Falls es sich um einen MultiResponse-Request handelt, wird die Nachricht upstream an den MultiResponseChannel weitergereicht.
- *handleDownstream(ChannelHandlerContext ctx, ChannelEvent e)* empfängt einen ReliableRequest downstream im ApplicationChannel. Für den Fall dass es sich um einen SingleRequestSingleResponse-Request handelt, wird die Nachricht downstream an den SingleRequestSingleResponseChannel weitergereicht.. Falls es sich um einen MultiResponse-Request handelt, wird die Nachricht downstream an den MultiResponseChannel weitergereicht. Sonst wird die oben beschriebene *send(request, applicationChannel)* aufgerufen.

**SingleRequestSingleResponseServiceHandler** Im *SingleRequestSingleResponseServiceHandler* werden nur *SingleRequestSingleResponse*-Nachrichten verarbeitet. Dabei sind die folgenden Methoden von Bedeutung:

- *messageReceived(ChannelHandlerContext ctx, MessageEvent e)* empfängt *SingleRequestSingleResponse*-Protokoll-Nachrichten. Für den Fall dass es sich um einen *SingleRequestSingleResponse*-Request handelt wird für die registrierten *SingleRequestSingleResponseRequestListener* die Methode *handleSingleRequestSingleResponseRequest(String senderUrn, byte[] requestPayload)* aufgerufen und eine Response zurückgesendet.
- *handleDownstream(ChannelHandlerContext ctx, ChannelEvent e)* empfängt einen *SingleRequestSingleResponse*-Request downstream im *SingleRequestSingleResponseChannel*, wandelt diese in eine Protokoll-Nachricht um und sendet diese über den ApplicationChannel. Der genaue Ablauf hierbei ist weiter unten im Unterabschnitt des *SingleRequestSingleResponseChannel* zu finden.

**SingleRequestMultiResponseServiceHandler** Im *SingleRequestMultiResponseServiceHandler* werden nur *SingleRequestMultiResponse*-Nachrichten verar-

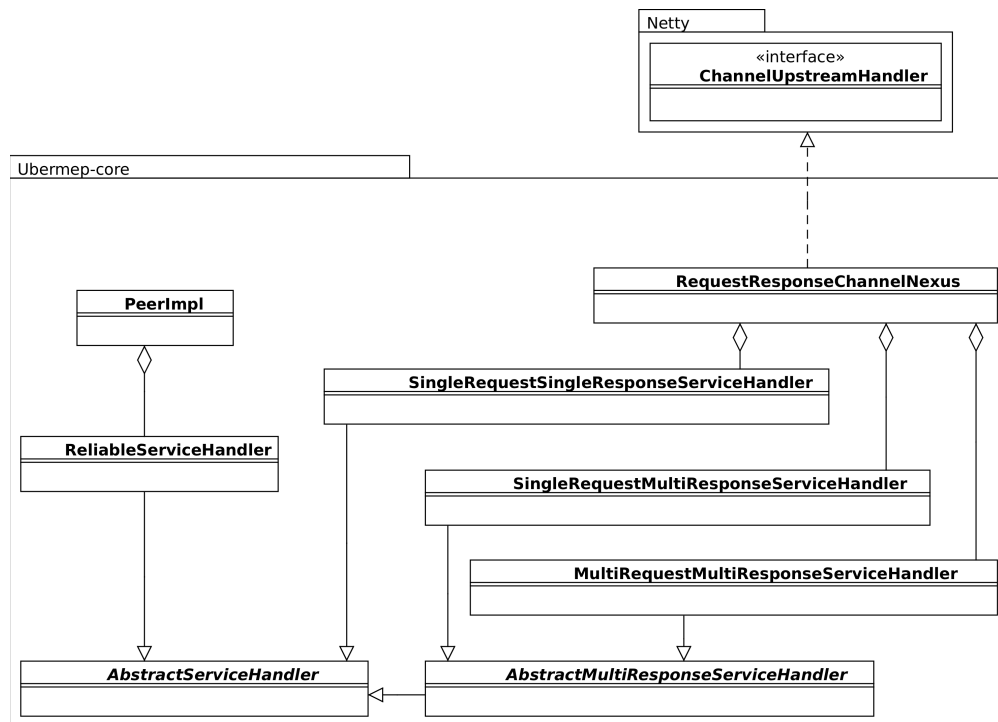


Abbildung 4.16: Aufbau der RequestResponse-ServiceHandler

beitet. Dabei sind die folgenden Methoden von Bedeutung:

- *messageReceived(ChannelHandlerContext ctx, MessageEvent e)* empfängt SingleRequestMultiResponse-Protokoll-Nachrichten. Für den Fall dass es sich um einen SingleRequestMultiResponse-Request handelt wird zusätzlich für die registrierten *MultiResponseRequestListener* die Methode *handleMultiResponseRequest(MultiResponseHandle responseHandle, String senderUrn, byte[] requestPayload)* aufgerufen. Über das MultiResponseHandle werden dann einzeln Responses zurückgesendet.
- *handleDownstream(ChannelHandlerContext ctx, ChannelEvent e)* empfängt einen SingleRequestMultiResponse-Request downstream im MultiResponseChannel, wandelt diese in eine Protokoll-Nachricht um und sendet diese über den ApplicationChannel. Der genaue Ablauf hierbei ist weiter unten im Unterabschnitt des *SingleRequestSingleResponseChannel* zu finden.

**MultiRequestMultiResponseServiceHandler** Im MultiRequestMultiResponse-ServiceHandler werden nur MultiRequestMultiResponse-Nachrichten verarbeitet. Dabei ist einzig die folgenden Methode von Bedeutung:

- *handleDownstream(ChannelHandlerContext ctx, ChannelEvent e)* empfängt einzig MultiRequestMultiResponse-Requests. Diese werden intern in einzelne SingleRequestMultiResponse-Requests umgewandelt und downstream in der MultiResponse-Pipeline an den SingleRequestMultiResponseSer-

viceHandler weitergereicht.

## RpcServiceHandler

Ubermep unterstützt den Aufruf von Remote Procedure Calls (RPC) (siehe Abschnitt 2.2 im Grundlagenkapitel) auf einzelnen Peers des Peer-to-Peer-Netzwerks. Dazu muss an einem Peer eine *UbermepRpcChannel* generiert werden, über welchen dann der RPC aufgerufen werden kann. Die nähere Beschreibung des *UbermepRpcChannel* ist weiter unten im Unterabschnitt *UbermepRpcChannel* zu finden. Im Folgenden wird nun der *RpcServiceHandler*, welcher sich für die Abarbeitung der Remote Procedure Calls verantwortlich zeichnet, näher beschrieben.

Im *RpcServiceHandler* werden nur *Remote Procedure Call*-Nachrichten verarbeitet. Dabei sind die folgenden Methoden von Bedeutung:

- *messageReceived(ChannelHandlerContext ctx, MessageEvent e)* empfängt RPC-Protokoll-Nachrichten, ruft die entsprechende Methode auf und sendet das Ergebnis als Response-Protokoll-Nachricht zurück.
- *callRPCAndReturnResponse(Channel channel, UPAddress destUrn, ...)* wird vom *UbermepRpcChannel* aufgerufen um einen RPC in eine RPC-Protokoll-Nachricht umzubauen und diese über den *ApplicationChannel* zu versenden. Gibt die RPC-Response-Protokoll-Nachricht in dem im Parameter übergebenen Callback zurück.

## Überblick

Bevor nun die verschiedenen Channel erläutert werden, ein kurzer Überblick über das Zusammenspiel der oben beschriebenen verschiedenen ServiceHandler. Dies soll anhand eines Sequenzdiagramm für den Aufruf einer Single Request Single Response Nachricht veranschaulicht werden. Dabei ist in der Abbildung 4.17 der Ablauf für einen Empfang server-seitig vereinfacht dargestellt, wobei in der Abbildung dafür das Wort *SingleRequestSingleResponse* als SRSR abgekürzt ist.

Der Ablauf ist dabei wie folgt: Der Server-Socket liest bytes und reicht diese an den entsprechenden (Protobuf)-Decoder weiter. Dieser dekodiert die Nachricht und erzeugt daraus eine Protokoll-Nachricht. Diese wird als *ChannelEvent* upstream über die registrierten *ChannelHandler* an den *SingleRequestSingleResponseServiceHandler* weitergereicht. Der verantwortliche registrierte *SingleRequestSingleResponseRequestListener* bekommt den Payload übergeben, arbeitet den Request-Payload ab und gibt einen Response-Payload zurück an den *SingleRequestSingleResponseRequestListener* der daraus eine korrespondierende Response-Protokoll-Nachricht erzeugt. Diese Nachricht wird dann über die Handler der Pipeline downstream zum (Protobuf)-Dekoder durchgereicht. Der Dekoder serialisiert die bytes und sendet diese an den Client-Socket zurück.

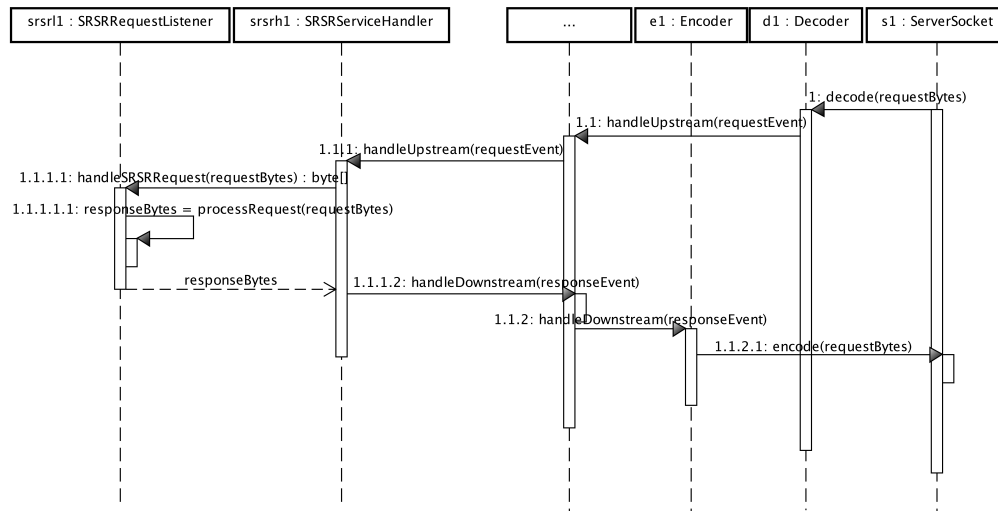


Abbildung 4.17: sequenz

Der Ablauf für die weiteren Nachrichtentypen des Message Exchange Pattern ist dabei analog, wobei sich jeweils nur der ServiceHandler und RequestListener verändert.

## RequestResponseChannel

Wie bereits in der ChannelArchitektur im Abschnitt 3.2.1 des Entwurfskapitel beschrieben, besitzt Ubermep neben dem UnicastMulticastChannel eigene RequestResponseChannel, namentlich *SingleRequestSingleResponseChannel* bzw. *MultiResponseChannel*. Im Folgenden werden nun diese beiden Channels näher beschrieben. Das Zusammenspiel der verschiedenen Channels ist dabei in Abbildung 4.18 veranschaulicht.

**SingleRequestSingleResponseChannel** Über den SingleRequestSingleResponseChannel können ausschließlich SingleRequestSingleResponseRequests versendet werden. Dabei ist einzig die folgende Methode von Bedeutung:

- *write(SingleRequestSingleResponseRequest request)* sendet einen SingleRequestSingleResponseRequest über den SingleRequestSingleResponseChannel. Der Response wird als Future-Objekt zurückgegeben. Eine genaue Beschreibung der zurückgelieferten Response findet sich weiter unten im Abschnitt 4.3.4.

**MultiResponseChannel** Über den MultiResponseChannel können ausschließlich MultiResponseRequests, namentlich SingleRequestMultiResponseRequest bzw. MultiRequestMultiResponseRequest versendet werden. Dabei ist einzig die folgenden Methode von Bedeutung:

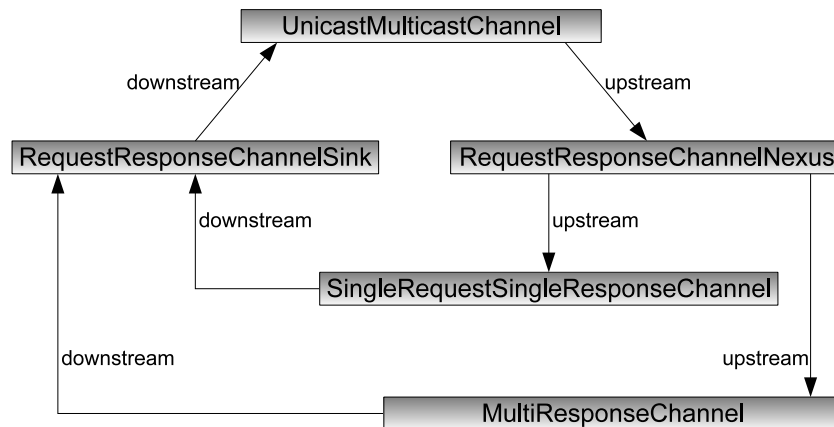


Abbildung 4.18: Handling der RequestResponse-Events in Ubermep

- *write(Request request)* sendet einen MultiResponseRequest über den MultiResponseChannel. Der Response wird als Future-Objekt zurückgegeben. Eine genaue Beschreibung der zurückgelieferten Response findet sich weiter unten im Abschnitt 4.3.4.

### UbermepRpcChannel

Ubermep besitzt einen eigenen Channel für den Aufruf von Remote Procedure Calls, den UbermepRpcChannel. Mittels diesem Channel können Stubs generiert werden, über die dann der RPC aufgerufen werden kann. Die, für den Aufruf entscheidenden Methoden, bezieht der UbermepRpcChannel aus dem Protobuf-Projekt. Die Abbildung 4.19 veranschaulicht hierbei die Abhängigkeiten. Die Methoden haben dabei die folgende Bedeutung:

- *callBlockingMethod(Descriptors.MethodDescriptor method, ...)* ruft einen blockierenden Remote Procedure Call auf und gibt die Antwort als Protokoll-Nachricht zurück. Blockierend hierbei bedeutet, dass diese Methode solange den Aufrufer *blockiert* bis eine Antwort empfangen wurde.
- *callMethod(Descriptors.MethodDescriptor method, ...)* ruft einen nicht-blockierende Remote Procedure Call auf und gibt die Antwort als Protokoll-Nachricht in dem als Parameter übergebenen Callback zurück, wobei der Aufrufer hierbei *nicht blockiert* wird.

#### 4.3.4 Messaging

Im Folgenden Abschnitt werden nun die von Ubermep unterstützten Nachrichten-Pattern spezifiziert. Zuerst werden die Nachrichten des UnreliableMessaging-Pattern beschrieben danach die Nachrichten des ReliableMessaging.

In der nun folgenden Spezifikation haben dabei die verwendeten Eigenschaften

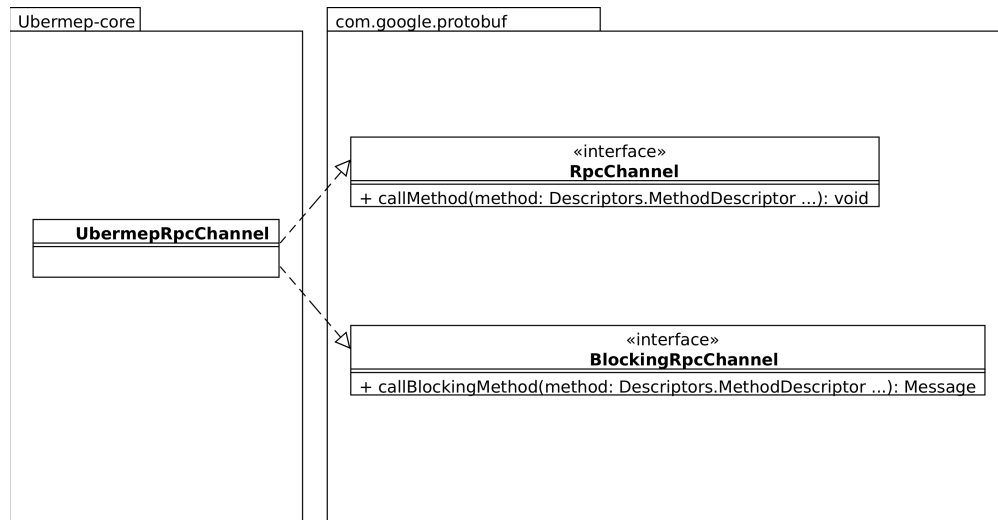


Abbildung 4.19: Abhängigkeiten des UbermepRpcChannel

die folgende Bedeutung:

- **Parameter:** die der Nachricht zu übergebenen Parameter
- **PayloadListener:** der verantwortliche PayloadListener server-seitig zum Lesen des Request-Inhalts und Schreiben des Response-Inhalts
- **Response:** die zu erwartende Response bei erfolgreichem ausliefern der Nachricht
- **Optionale Parameter:** die der Nachricht optional zu übergebenen Parameter, wobei diese immer über entsprechende *Setter* gesetzt werden
- **Erfolgreich ausgeliefert bei:** gibt an, wann eine Nachricht als *Erfolgreich ausgeliefert* gilt. Nur dann wird auch die entsprechende Response zurückgegeben
- **ProgressListener:** das zu implementierende Interface client-seitig
- **Zurückgeliefert bei:** gibt an, wann eine Nachricht an den Sender zurückgeliefert wird

## UnreliableRequest

In diesem Abschnitt werden nun die Nachrichten des UnreliableMessaging-Pattern beschrieben.

**UnreliableUnicastRequest** Ein UnreliableUnicastRequest ist wie folgt spezifiziert:



<b>Parameter</b>	remoteAddress : UAddress payload : byte[]
<b>PayloadListener</b>	UnicastMulticastRequestListener (lesen)
<b>Response</b>	keine

**UnreliableMulticastRequest** Ein UnreliableMulticastRequest ist wie folgt spezifiziert:

<b>Parameter</b>	remoteAddresses : Collection<UAddress> payload : byte[]
<b>PayloadListener</b>	UnicastMulticastRequestListener (lesen)
<b>Response</b>	keine

### ReliableRequest

In diesem Abschnitt werden die Nachrichten des ReliableMessaging-Pattern spezifiziert.

**ReliableUnicastRequest** Ein ReliableUnicastRequest ist wie folgt spezifiziert:

<b>Parameter</b>	remoteAddress : UAddress payload : byte[]
<b>optionale Parameter</b>	timeOut : int timeOutUnit : TimeUnit
<b>PayloadListener</b>	UnicastMulticastRequestListener (lesen)
<b>Response</b>	ReliableUnicastResponse
<b>Erfolgreich ausgeliefert bei</b>	Eingang der Nachricht am Empfänger-Peer

**ReliableMulticastRequest** Ein ReliableMulticastRequest ist wie folgt spezifiziert:

<b>Parameter</b>	remoteAddresses : Collection<UAddress> payload : byte[]
<b>optionale Parameter</b>	timeOut : int timeOutUnit : TimeUnit
<b>PayloadListener</b>	UnicastMulticastRequestListener (lesen)
<b>Response</b>	ReliableMulticastResponse
<b>Erfolgreich ausgeliefert bei</b>	Eingang der Nachricht am Empfänger-Peer

Anmerkung: Eine ReliableMulticastResponse enthält die Responses als Map. Die Responses werden dabei in der Map-üblichen Weise, also als *Key, Value*-Paar der Response-Map hinzugefügt. Der *Key* entspricht dabei der UAddress des geantworteten Peers, der *Value* einer einzelnen Response vom Typ *ReliableMulticastResponse.SingleReliableMulticastResponse*.

**SingleRequestSingleResponseRequest** Ein `SingleRequestSingleResponseRequest` ist wie folgt spezifiziert:

<b>Parameter</b>	<code>remoteAddress</code> : <code>UPAddress</code> <code>payload</code> : <code>byte[]</code>
<b>optionale Parameter</b>	<code>timeOut</code> : <code>int</code> <code>timeOutUnit</code> : <code>TimeUnit</code>
<b>PayloadListener</b>	<code>SingleRequestSingleResponseRequestListener</code> (lesen und schreiben)
<b>Response</b>	<code>SingleRequestSingleResponseResponse</code>
<b>Erfolgreich ausgeliefert bei</b>	Eingang der Nachricht am Empfänger-Peer <b>und</b> erfolgreicher Verarbeitung eines <code>PayloadListener</code>

**SingleRequestMultiResponseRequest** Ein `SingleRequestMultiResponseRequest` ist wie folgt spezifiziert:

<b>Parameter</b>	<code>remoteAddress</code> : <code>UPAddress</code> <code>payload</code> : <code>byte[]</code>
<b>optionale Parameter</b>	<code>timeOut</code> : <code>int</code> <code>timeOutUnit</code> : <code>TimeUnit</code>
<b>PayloadListener</b>	<code>MultiResponseRequestListener</code> (lesen und schreiben)
<b>ProgressListener</b>	<code>ProgressListenerRunnable</code>
<b>Response</b>	<code>SingleRequestMultiResponseResponse</code>
<b>Erfolgreich ausgeliefert bei</b>	Eingang der Nachricht am Empfänger-Peer <b>und</b> erfolgreicher Verarbeitung eines <code>PayloadListener</code>

**MultiRequestMultiResponseRequest** Ein `MultiRequestMultiResponseRequest` ist wie folgt spezifiziert:

<b>Parameter</b>	<code>remoteAddresses</code> : <code>Collection&lt;UPAddress&gt;</code> <code>payload</code> : <code>byte[]</code>
<b>optionale Parameter</b>	<code>timeOut</code> : <code>int</code> <code>timeOutUnit</code> : <code>TimeUnit</code>
<b>PayloadListener</b>	<code>MultiResponseRequestListener</code> (lesen und schreiben)
<b>ProgressListener</b>	<code>ProgressListenerRunnable</code>
<b>Response</b>	<code>MultiRequestMultiResponseResponse</code>
<b>Erfolgreich ausgeliefert bei</b>	Eingang der Nachricht am Empfänger-Peer <b>und</b> erfolgreicher Verarbeitung eines <code>PayloadListener</code>

Anmerkung: Eine `MultiResponse-Response` enthält die Responses als Map. Die Responses werden dabei in der Map-üblichen Weise, also als *Key, Value*-Paar der Response-Map hinzugefügt. Der *Key* entspricht dabei der `UPAddress` des geantworteten Peers, der *Value* einer einzelnen Response vom Typ `SingleMultiResponseResponse`.

**ReliableResponse**

Einzig Nachrichten des oben beschriebenen ReliableMessaging-Pattern liefern Responses zurück. Dabei gibt es, wie oben spezifiziert, für einen erfolgreich ausgelieferten ReliableRequest einen korrespondierenden ReliableResponse. Des weiteren gibt es für diesen Request ReliableResponses bei nicht erfolgreicher Übertragung. Im Folgenden werden nun diese beschrieben.

**ErrorResponse** Eine ErrorResponse ist wie folgt spezifiziert:

<b>Parameter</b>	request : Request localAddress : UAddress cause : Throwable
<b>Zurückgeliefert bei</b>	Fehlerhafter Übertragung einer Nachricht

**TimeOutResponse** Eine TimeOutResponse ist wie folgt spezifiziert:

<b>Parameter</b>	request : Request localAddress : UAddress
<b>Zurückgeliefert bei</b>	TimeOut während der Auslieferung, ausgelöst durch: TimeOut des Request wenn gesetzt, sonst DefaultTimeOut (siehe dazu Abschnitt 4.3.5 )

**4.3.5 Konfiguration**

Die Konfiguration von Ubermep erfolgt über das konfigurieren der einzelnen Peers des Netzwerks. Dies geschieht über Variablen der Klasse *PeerConfig*. Die nun folgenden Spezifikationen sind dabei wie folgt aufgebaut:

{Variablenname}

- {Verwendung}
- {Typ}
- {DefaultValue}

**Konfiguration eines Peers**

Die Konfiguration eines Peers ist wie folgt spezifiziert:

**CORE\_POOL\_SIZE**

- **Verwendung:** Die Größe der von Overlay verwendeten ThreadPools
- **Typ:** int
- **DefaultValue:** 10

#### **DEFAULT\_TIMEOUT**

- **Verwendung:** Die DefaultTimeOut für ReliableRequests.
- **Typ:** int
- **DefaultValue:** 30

#### **DEFAULT\_TIMEOUT\_TIMEUNIT**

- **Verwendung:** Die Default-Zeiteinheit der DEFAULT\_TIMEOUT
- **Typ:** TimeUnit
- **DefaultValue:** TimeUnit.SECONDS

#### **OverlayModule.RTT\_REQUEST\_INTERVAL**

- **Verwendung:** Das Interval in dem die RoutingTabellen eines Peers mittels des RoundTripTime-Protokolls von Overlay aktualisiert werden. (siehe dazu Abschnitt 2.5.3 im Grundlagenkapitel)
- **Typ:** int
- **DefaultValue:** 10

#### **OverlayModule.RTT\_REQUEST\_INTERVAL\_TIMEUNIT**

- **Verwendung:** Die Default-Zeiteinheit des RTT\_REQUEST\_INTERVAL
- **Typ:** int
- **DefaultValue:** TimeUnit.SECONDS

## **4.4 Beispiele**

Im Folgenden soll nun anhand von Beispielen die Funktionalität von Ubermep veranschaulicht werden. Dazu wird ein kleines Peer-to-Peer Netzwerk mit 3 Knoten erzeugt, über die dann Nachrichten des Message Exchange Pattern versendet werden können.

### **4.4.1 Aufbau eines Peer-to-Peer Netzwerk**

Im nun folgenden Beispiel wird ein Peer-to-Peer Netzwerk wie folgt aufgebaut:

Der entsprechende Quellcode sieht dabei wie folgt aus:

```
1 | // Peers erzeugen ...
2 | Peer server = new PeerImpl(new UPAddress("urn:itm:1"),
3 |     new InetSocketAddress("0.0.0.0", 8080));
4 | Peer transitHost = new PeerImpl(new UPAddress("urn:itm:2"),
5 |     new InetSocketAddress("0.0.0.0", 8081),
```

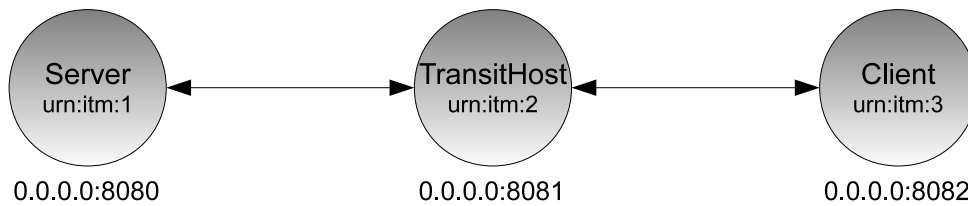


Abbildung 4.20: Aufbau eines einfachen Peer-to-Peer Netzwerk

```

6      new InetSocketAddress("0.0.0.0", 8080));
7  Peer client = new PeerImpl(new UAddress("urn:itm:3"),
8      new InetSocketAddress("0.0.0.0", 8082),
9      new InetSocketAddress("0.0.0.0", 8081));
10
11 // Peers starten ...
12 server.start();
13 transitHost.start();
14 client.start();
15
16 // ... kommuniziere ein wenig ...
17
18 // Peers stoppen
19 client.stop();
20 transitHost.stop();
21 server.stop();
  
```

Listing 4.6: Aufbau eines einfachen Peer-to-Peer Netzwerk

#### 4.4.2 Kommunikation

Nachdem nun das Netzwerk aufgebaut ist, kann über die Knoten kommuniziert werden. In den nun folgenden Beispielen sollen Nachrichten erzeugt und versendet werden, um ausgewählte Peers (Nodes) zu *flashen*. *Flashen* bedeutet hier: Das Aufspielen einer neuen Firmware auf einem Knoten. Diese Funktionalität spielt z.B. eine Rolle in *Wireless Sensor Networks (WSN's)*. Dafür werden in den folgenden Beispielen der String `flashNode` als `ByteArray` übertragen und ausgewertet.

#### Unreliable Messaging

Um nun Unicast- bzw. Multicast-Requests für das flashen von Nodes verarbeiten zu können, muss zuerst der entsprechende `UnicastMulticastRequestListener` wie folgt erzeugt werden, dabei sei angenommen das eine entsprechende Methode `flashNode()` mit der oben beschriebenen Funktionalität vorhanden ist:

```

1  UnicastMulticastRequestListener
   flashNodeUnicastMulticastRequestListener = new
   UnicastMulticastRequestListener() {
2      public boolean handleUnicastMulticastRequest(String senderUrn,
   byte[] payload) {
  
```

```

3      if (new String(payload).equals("flashNode")) {
4          // aufrufen von flashNode()
5          flashNode();
6          return true;
7      } else {
8          return false;
9      }
10     }
11 };

```

Listing 4.7: Erzeugen eines UnicastMulticastRequestListener

Nun muss noch der *flashNodeUnicastMulticastRequestListener* am entsprechenden Peer server-seitig hinzugefügt werden.

```

1 server.addRequestListener(
    flashNodeUnicastMulticastRequestListener);

```

Listing 4.8: Hinzufügen eines UnicastMulticastRequestListener

**UnreliableUnicastRequest** Anschließend kann ein entsprechender UnreliableUnicastRequest an den Server wie folgt versendet werden:

```

1 UnreliableRequest request = new UnreliableUnicastRequest(server.
    getLocalUPAddress(), "flashNode".getBytes());
2 client.send(request);

```

Listing 4.9: Senden eines UnreliableUnicastRequest

**UnreliableMulticastRequest** Der Aufruf eines UnreliableMulticastRequest geschieht analog zu dem eines UnreliableUnicastRequest.

```

1 List<UPAddress> urns = new ArrayList<UPAddress>() {{
2     add(server.getLocalUPAddress());
3     add(...);
4 }};
5
6 UnreliableRequest request = new UnreliableMulticastRequest(urns,
    "flashNode".getBytes());
7 client.send(request);

```

Listing 4.10: Senden eines UnreliableMulticastRequest

## Reliable Messaging

Nachrichten des Reliable Messaging Patterns können als blockierende als auch als nicht-blockierende Aufrufe versendet werden. Im Folgenden Beispiel werden nun die beiden Aufrufe dargestellt:

```

1 final ListenableFuture<Response> responseFuture = client.send(
    request);
2
3 //blockierender Aufruf
4 Response response = responseFuture.get();
5

```

```

6 //nicht-blockierender Aufruf
7 responseFuture.addListener(new Runnable() {
8     public void run() {
9         Response response = responseFuture.get();
10    }, new ScheduledThreadPoolExecutor(1));
11 ...

```

Listing 4.11: Blockierender und nicht-blockierender Nachrichtenempfang

In den folgenden Beispielen werden zur Vereinfachung nur blockierende Aufrufe beschrieben.

**ReliableUnicastRequest** Mit Hilfe eines `ReliableUnicastRequest` kann nun überprüft werden, ob die Methode `flashNode()` tatsächlich aufgerufen wurde.

```

1 ReliableRequest request = new ReliableUnicastRequest(server.
    getLocalUPAddress(), "flashNode".getBytes());
2 Future<Response> responseFuture = client.send(request);
3
4 Response response = responseFuture.get();
5 if (response instanceof ReliableUnicastResponse){
6     // tu was mit Response
7 }

```

Listing 4.12: Senden eines `ReliableUnicastRequest` als blockierender Aufruf

**ReliableMulticastRequest** Der Aufruf eines `ReliableMulticastRequest` geschieht analog zu dem eines `ReliableUnicastRequest`.

```

1 List<UPAddress> urns = new ArrayList<UPAddress>() {{
2     add(transitHost.getLocalUPAddress());
3     add(...);
4 }};
5
6 ReliableRequest request = new ReliableMulticastRequest(urns, "
    flashNode".getBytes());
7 Future<Response> responseFuture = client.send(request);
8
9 Response response = responseFuture.get();
10 // "überprüfe Responses ... über: response.getResponsees()

```

Listing 4.13: Senden eines `ReliableMulticastRequest`

**SingleRequestSingleResponseRequest** Um einen `SingleRequestSingleResponseRequest` für das flashen eines Nodes verarbeiten zu können, muss zuerst der entsprechende `SingleRequestSingleResponseRequestListener` server-seitig wie folgt erzeugt und hinzugefügt werden, dabei sei auch hier angenommen das eine entsprechende Methode `flashNode()` mit der beschriebenen Funktionalität vorhanden ist:

```

1 SingleRequestSingleResponseRequestListener
    flashNodeSingleRequestSingleResponseRequestListener = new
    SingleRequestSingleResponseRequestListener() {
2     public byte[] handleSingleRequestSingleResponseRequest(String
        senderUrn, byte[] payload) throws UbermepExceptionEvent {

```

```

3      if (new String(payload).equals("flashNode")) {
4          try {
5              // aufrufen von flashNode()
6              flashNode();
7              return "flashNode:_Done".getBytes();
8          } catch (Exception e){
9              throw
10                 new UbermepSingleResponseExceptionEvent(e.getCause());
11          }
12      } else {
13          return null;
14      }
15  }
16  };
17
18  server.addRequestListener(
    flashNodeSingleRequestSingleResponseRequestListener);

```

Listing 4.14: Erstellen eines SingleRequestSingleResponseRequestListener

Anschließend kann nun mit Hilfe eines SingleRequestSingleResponseRequest überprüft werden, ob die Methode *flashNode()* tatsächlich aufgerufen wurde:

```

1  ReliableRequest request = new SingleRequestSingleResponseRequest
    (server.getLocalUPAddress(), "flashNode".getBytes());
2  Future<Response> responseFuture = client.send(request);
3
4  Response response = responseFuture.get();
5  if (response instanceof SingleRequestSingleResponseResponse){
6      // tu was mit Response, z.B. payload überprüfen
7  }

```

Listing 4.15: Senden eines SingleRequestSingleResponseRequest

**SingleRequestMultiResponseRequest** Um einen MultiResponseRequest für das flashen eines Nodes verarbeiten zu können, muss zuerst der entsprechende MultiResponseRequestListener server-seitig wie folgt erzeugt und hinzugefügt werden, dabei sei auch hier angenommen das eine Methode *flashNode()* mit der bereits beschriebenen Funktionalität vorhanden ist ,wobei die Methode hier den Fortschritt in Prozent als Integer-Wert zurückgibt:

```

1  MultiResponseRequestListener
    flashNodeMultiResponseRequestListener = new
    MultiResponseRequestListener() {
2  public boolean handleMultiResponseRequest(MultiResponseHandle
    responseHandle, String senderUrn, byte[] payload) throws
    UbermepExceptionEvent {
3      if (new String(payload).equals("flashNode")) {
4          // aufrufen von flashNode()
5          int percentDone = flashNode();
6          while(percentDone < 50){;}
7          // wenn flashNode() zu 50% fertig
8          responseHandle.handleSingleResponse("flashNode:50%_done".
            getBytes(), 1, 2);
9          while(percentDone < 100){;}
10         // wenn flashNode() fertig

```



```

11         responseHandle.handleSingleResponse("flashNode:100%_done".
12             getBytes(), 2, 2);
13         return true;
14     } else {
15         return false;
16     }
17 };
18
19 server.addRequestListener(flashNodeMultiResponseRequestListener)
    ;

```

Listing 4.16: Hinzufügen eines MultiResponseRequestListener

Anschließend kann nun mit Hilfe eines SingleRequestMultiResponseRequest überprüft werden, ob die Methode *flashNode()* tatsächlich aufgerufen wurde und wie der Fortschritt ist.

```

1 ReliableRequest request = new SingleRequestMultiResponseRequest(
2     server.getLocalUPAddress(), "flashNode".getBytes());
3
4 Future<Response> responseFuture = client.send(request);
5
6 Response response = responseFuture.get();
7 if (response instanceof SingleRequestMultiResponseResponse){
8     // überprüfe Responses ... über: response.getResponses()
9 }

```

Listing 4.17: Senden eines SingleRequestMultiResponseRequest

**MultiRequestMultiResponseRequest** Der Aufruf eines MultiRequestMultiResponseRequest geschieht analog zu dem eines SingleRequestMultiResponseRequest.

```

1 List<UPAddress> urns = new ArrayList<UPAddress>() {{
2     add(server.getLocalUPAddress());
3     add(...);
4 }};
5
6 ReliableRequest request = new MultiRequestMultiResponseRequest(
7     urns, "flashNode".getBytes());
8
9 Future<Response> responseFuture = client.send(request);
10
11 //auf Response warten
12 Response response = responseFuture.get();
13 if (response instanceof MultiRequestMultiResponseResponse){
14     // "überprüfe Responses ... über: response.getResponses()
15 }

```

Listing 4.18: Senden eines MultiRequestMultiResponseRequest

Ein ProgressListener für MultiResponse-Nachrichten läßt sich wie folgt client-seitig hinzufügen:

```

1 //erzeuge ProgressListenerRunnable
2 ProgressListenerRunnable progressListenerRunnable = new
3     ProgressListenerRunnable() {
4     public void progress(String senderUrn, byte[] payload, int
5         current, int total) {

```

```

4      //tu etwas mit einzeln empfangener Response z.B.
5      log.info("received:_" + current + "_of_" + total);
6  }
7
8  public void run() {
9      //tu etwas mit komplett empfangener MultiResponse z.B.
10     Response response = responseFuture.get();
11 }
12 };
13
14 // ProgressListener dem ResponseFuture hinzufügen
15 responseFuture.addListener(progressListenerRunnable, new
    ScheduledThreadPoolExecutor(2));

```

Listing 4.19: Verwenden eines ProgressListener

## RPC

In dem nun folgenden Beispiel soll veranschaulicht werden, wie Remote Procedure Calls in Ubermep aufgerufen werden können. Dies wird mittels der bereits beschriebenen Funktionalität des flashens von Nodes veranschaulicht. Dazu muß zuerst mittels der Protobuf-IDL (siehe Abschnitt 2.4 im Grundlagenkapitel) ein FlashNodeServiceProtokoll erzeugt werden. Im Listing 4.20 ist dafür ein Beispiel-Protokoll erstellt worden, welches anschließend mittels des protoc-Compiler in ein Java-Klasse übersetzt wird. Der Aufruf erfolgt dabei über einen FlashNodeRequest, welcher den Parameter *delay* enthält. Das Ergebnis wird über den FlashNodeResponse zurückgegeben, wobei dafür der Parameter *success* hinzugefügt wurde.

```

1 option java_generic_services = true;
2
3 service FlashNodeService {
4     rpc flashNode(FlashNodeRequest) returns (FlashNodeResponse);
5 }
6
7 message FlashNodeRequest{
8     required uint32 delay = 1;
9 }
10
11 message FlashNodeResponse{
12     required bool success = 1;
13 }

```

Listing 4.20: FlashNodeServiceProtocol.proto

Anschließend wird eine Implementierung des Service-Interface erzeugt, wobei im Folgenden Beispiel eine Implementierung des BlockingInterface verwendet wurde. Im Folgenden sei auch hier angenommen das eine Methode *flashNode()* mit der bereits beschriebenen Funktionalität vorhanden ist ,wobei die Methode hier als Parameter einen *delay* als Verzögerung des Aufrufs übergeben bekommt.

```

1 public class FlashNodeBlockingServiceImpl implements
    FlashNodeServiceProtocol.FlashNodeService.BlockingInterface,
    RpcBlockingService{

```

```

2  @Override
3  public FlashNodeServiceProtocol.FlashNodeResponse flashNode(
4      RpcController controller, FlashNodeServiceProtocol.
5      FlashNodeRequest request) throws ServiceException {
6      // aufrufen von flashNode(delay)
7      flashNode(request.getDelay());
8      return FlashNodeServiceProtocol.FlashNodeResponse.newBuilder()
9          .setSuccess(true).build();
10 }
11
12 @Override
13 public BlockingService getRpcBlockingService() {
14     return FlashNodeServiceProtocol.FlashNodeService.
15         newReflectiveBlockingService(this);
16 }
17 }

```

Listing 4.21: Implementierung des FlashNodeBlockingService

Im Folgenden soll nun ein RPC, über dem bereits oben erzeugten Peer-to-Peer Netzwerk, vom Client auf dem Server ausgeführt werden. Hierfür muss zuerst die *FlashNodeBlockingServiceImpl* am entsprechenden Peer server-seitig hinzugefügt werden. Anschließend kann ein entsprechender *FlashNodeRequest* mittels des RPC-Channel auf dem Server wie folgt aufgerufen werden:

```

1  //Service am Server registrieren
2  server.registerService(new FlashNodeBlockingServiceImpl());
3
4  // erzeuge RPC-Request mit delay=10
5  FlashNodeServiceProtocol.FlashNodeRequest request =
6      FlashNodeServiceProtocol.FlashNodeRequest.newBuilder().
7      setDelay(10).build();
8
9  // hole RPC-Channel
10 UebermepRpcChannel blockingServerRpcChannel = client.
11     getRpcChannel(blockingServerUrn);
12 // erzeuge neuen Blocking-Stub für FlashNodeService mittels RPC-
13 Channel
14 FlashNodeServiceProtocol.FlashNodeService.BlockingInterface
15     blockingService = FlashNodeServiceProtocol.FlashNodeService.
16     newBlockingStub(blockingServerRpcChannel);
17
18 try {
19     //rufe flashNodeService auf
20     FlashNodeServiceProtocol.FlashNodeResponse rpcResponse =
21         blockingService.flashNode(new RpcControllerImpl(), request
22             );
23
24     // tu was mit RPC-Response, z.B. success überprüfen
25 } catch (ServiceException e) {
26     // tu was mit ServiceException
27 }

```

Listing 4.22: Aufruf des FlashNodeBlockingService

Der Aufruf eines (non-blocking)-Service ist analog und soll deshalb hier nicht weiter vertieft werden. Nur soviel: der Service-Aufruf benötigt eine zusätzliche (non-blocking)-Service-Implementierung sowie einen Callback der aber einfach

über:

```
1 | MEPRpcCallback<FlashNodeServiceProtocol.FlashNodeResponse>  
   |     callback = new RpcCallbackImpl<FlashNodeServiceProtocol.  
   |     FlashNodeResponse>();
```

Listing 4.23: Erzeugung eines FlashNodeServiceCallback

erzeugt werden kann.

## 4.5 Zukünftige Erweiterungen

Folgende Erweiterungen sind fest für die nähere Zukunft eingeplant: *[ausführlicher...]*

[!!!]

- Bilden von Peer-to-Peer-Communities und in diesem Zusammenhang auch Erweiterung um *Broadcast*-Messaging für einzelne Communities
- Hinzufügen einer Peer-to-Peer-Proxy-Funktionalität und daraus resultierend auch das Hinzufügen einer Firewall-Funktionalität für bestimmte Peers zum kontrollieren von deren Netzwerkverkehr
- Erweiterung des RoundTripTime-Protokoll von Overlay um Anpassbarkeit der Zeitintervalle, z.B. mittels dem *Trickle*-Algorithmus [10]

# 5 Evaluation

## 5.1 Netzwerk-Topologien

In den Abbildungen 5.1 und 5.2 ist der Aufbau des Evaluationsszenarios zu sehen. Dabei handelt es sich zum Einem um Single-Hop- und zum Anderen um Multi-Hop- Netzwerke. Die Nachrichten zur Evaluation werden dabei immer von einem Peer A zu einem Peer B und ggf. zurückgesendet. Jeder Peer wird dabei als Loopback-Interface an einem Rechner gestartet. Damit die Evaluationsergebnisse mit Szenarien der realen Umwelt vergleichbar sind, wurde für die Evaluation ein Emulator erzeugt, welcher eine Übertragungsrate von 16 MBit/s emuliert.



Abbildung 5.1: Single-Hop-Topologie

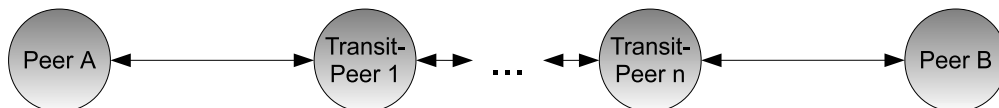


Abbildung 5.2: Multi-Hop-Topologie

## 5.2 Evaluationskriterien

Zur Evaluation der Implementierung wurden zwei Kriterien verwendet:

- Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Payload-Größe
- Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Hop-Anzahl

Im Folgenden werden nun diese beiden Kriterien näher erläutert.

### 5.2.1 Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Payload-Größe

Das Kriterium *Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Payload-Größe* zeigt das Verhältnis der Übertragungsdauer zu der Größe des übertragenen Payloads. Dabei wurden Single Request Single Response-Nachrichten in einem Single-Hop-Netzwerk versendet. Die gemessene Übertragungsdauer entspricht dabei der Zeit vom Versand einer Nachricht bis zum Empfang der Antwort. Dabei variiert die Größe des Request-Payloads, der Response-Payload aber ist immer jeweils 1 Byte groß. Mittels diesem Kriterium lässt sich feststellen wie sich die Übertragungsdauer, in Abhängigkeit der Größe einer Nachricht, verhält.

### 5.2.2 Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Hop-Anzahl

Das Kriterium *Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Hop-Anzahl* berechnet das Verhältnis der Übertragungsdauer zu der Anzahl an Hops in einem Netzwerk. Dabei wurde die Übertragungsdauer für ein SingleHop-Netzwerk, sowie MultiHop-Netzwerke der Größe 2, 3, 4 und 5 Hops gemessen. Desweiteren wurde die Übertragungszeit für den Nachrichtenversand mittels Overlay, sowie für den Nachrichtenversand mittels Unicast, SingleRequestSingleResponse und RPC gemessen. Dafür wurden Nachrichten mit einer Größe  $< 1$  Byte über das entsprechende Netzwerk gesendet. Die gemessene Übertragungsdauer für Overlay und Unicast entspricht dabei der Zeit vom Versand bis zum Empfang der Nachricht. Für SingleRequestSingleResponse und RPC entspricht die gemessene Übertragungsdauer der Zeit vom Versand bis zum Empfang der Antwort, wobei für RPC ein BlockingService verwendet wurde. Mittels diesem Kriterium lässt sich feststellen inwieweit sich gegebenenfalls die Übertragungsdauer eines Nachrichtentyps zu der Anzahl an Hops verhält.

Bei beiden Kriterien wurde die Übertragungszeit in bereits verbundenen Netzwerken gemessen, d.h. die benötigte Zeit zum Aufbau eines Netzwerks ist hier nicht inkludiert.

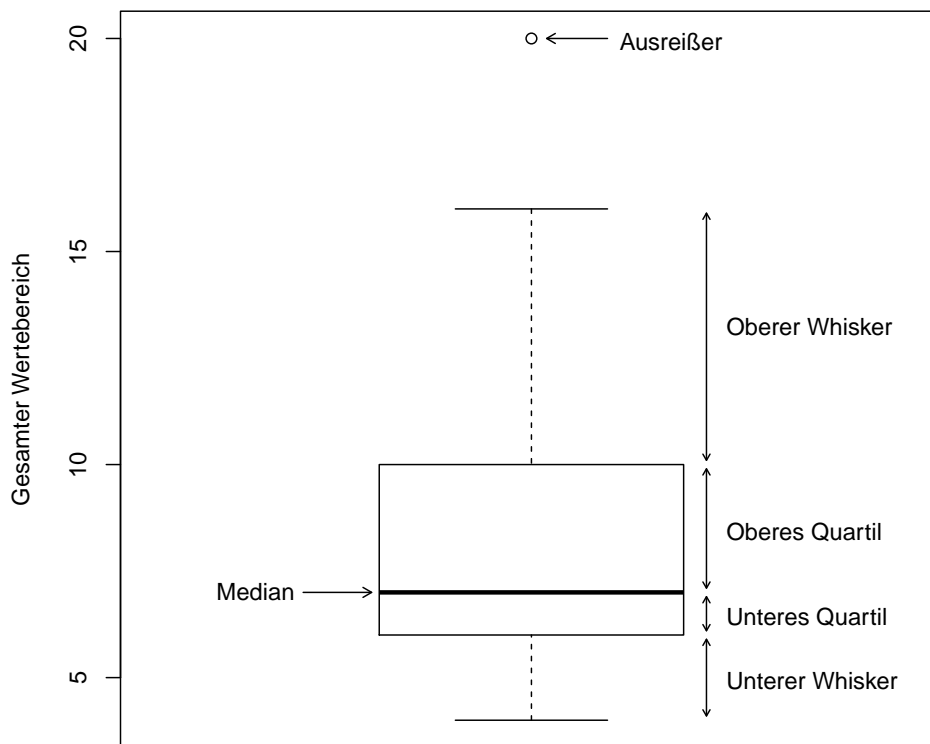
## 5.3 Testergebnisse

Für das Generieren der Testläufe wurden Testprogramme mit Java geschrieben, welche die oben beschriebene Netzwerk-Topologien erzeugen und über diese die Nachrichten versenden, sowie die Übertragungsdauer misst. Diese Ergebnisse werden in sogenannten *Boxplots* dargestellt. Im Folgenden werden nun Boxplots erläutert.

### 5.3.1 Boxplot

Ein Boxplot ist ein Diagramm, das zur grafischen Darstellung der Verteilung von Daten verwendet werden kann. Der Boxplot vermittelt dabei schnell einen

Überblick, in welchem Bereich die Daten liegen und wie sie sich in diesem verteilen. Ein Beispiel-Boxplot ist dabei in Abbildung 5.3 zu erkennen. Die Verteilung wird dabei mittels eines Medians, zwei Quartilen und den beiden Whiskern dargestellt. Im Folgenden werden nun Quartile, Whisker und der Median erklärt.



Boxplot für einen Wertebereich

Abbildung 5.3: Boxplot-Beispiel

**Quartil** Das Quartil, begrenzt durch das *Obere Quartil* und *Untere Quartil*, beschreibt die mittleren 50 % der Werte. Die Länge vom oberen Quartil zum unteren Quartil entspricht dabei dem Interquartilsabstand (IQR), welcher die Streuung der Werte zeigt.

**Whisker** Der Whisker, begrenzt durch den *Oberen Whisker* und *Unteren Whisker*, beschreibt den gesamten Wertebereich, sofern die Werte dabei nicht au-

ßerhalb des 1,5 -fachen IQR zum jeweiligen Quartil liegen. Sofern ein Wert ausserhalb des 1,5-fachen IQR liegt, wird dieser als *Ausreißer* deklariert.

**Median** Ein Median ist der *Zentralwert*, welcher die Mitte eines Wertebereichs zeigt. Dafür wird der Wertebereich der Größe nach geordnet. Der Wert in der Mitte entspricht dann dem Median. Ist die Anzahl der Werte gerade, wird das arithmetische Mittel der beiden mittleren Werte berechnet. Aus diesem Grund hat der Median die Eigenschaft, dass die eine Hälfte der Werte über diesem und die andere darunter liegt.

Die nun im Folgenden dargestellten Ergebnisse entsprechen einer Messung von 100 versendeten Nachrichten. Zu Testzwecken wurden auch bis zu 1000 Nachrichten versendet und deren Übertragungszeit gemessen. Dabei sind die entscheidenden Ergebnisse, wie Quartile, Whisker und Medians nahezu identisch, einige Ausreißer allerdings sorgten für eine unübersichtliche Darstellung, weshalb die Messung auf 100 Nachrichten beschränkt wurde.

### 5.3.2 Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Payload-Größe

Die Abbildung 5.4 zeigt die gemessenen Ergebnisse des Kriteriums *Payload zu Übertragungsdauer*.

Die x-Achse zeigt die Größe der versendeten Nachricht, wobei die Größe logarithmisch steigt. Die y-Achse zeigt die Übertragungsdauer in Millisekunden in logarithmischer Skalierung.

Bei der Auswertung der Ergebnisse schien zunächst verwunderlich, das sich die Übertragungszeiten für Payloads  $\leq 1$  KB scheinbar linear bei 2 Millisekunden bewegen. Da sich aber die Übertragungszeiten für Nachrichten der Payload-Größe  $< 1$  KB, bei einer Übertragungsrate von 16 MBit/s im Nanosekundenbereich verändern, lässt sich dies auf Messungenauigkeiten und Rundungsfehler zurückführen. Für Payload-Größen  $> 1$ KB, bei der sich die Übertragungszeit im Millisekundenbereich verändert, ist zu erkennen: erhöht sich die Größe des Payloads logarithmisch, so steigt mit ihr auch logarithmisch die Übertragungsdauer.

### 5.3.3 Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Hop-Anzahl

Die Abbildungen 5.5 und 5.6 zeigen die Ergebnisse des Kriteriums *Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Hop-Anzahl*. Die Abbildung 5.5 zeigt dabei die Ergebnisse für den Nachrichtenversand mittels Overlay und dem Message Exchange Pattern Unicast. Die Abbildung 5.6 zeigt die Ergebnisse des Kriteriums *Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Hop-Anzahl* für den Nachrichtenversand mittels dem Message Exchange Pattern Single Request Single Response und den Aufruf für ein RPC. Die x-Achse zeigt jeweils die Anzahl der Hops die für einen Nachrichtenversand passiert werden. Sendet beispielsweise der Peer



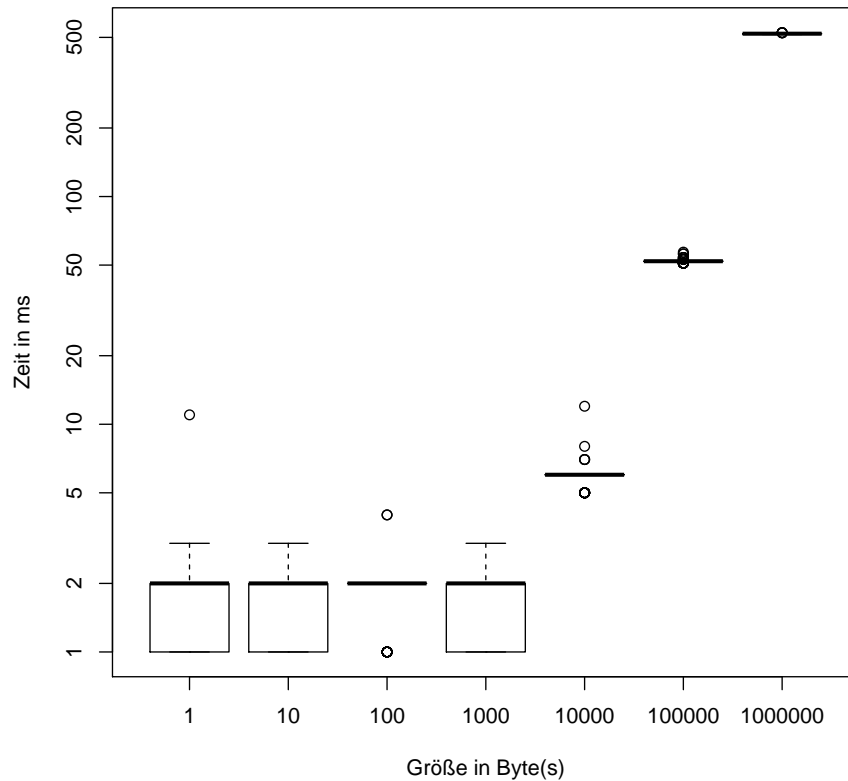


Abbildung 5.4: Ergebnisse: Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Payload-Größe

A eine Unicast-Nachricht über ein 3-Hop Netzwerk an Peer B, so muss diese Nachricht 3 Hops passieren. Für Single Request Single Response-Nachrichten, sowie den Aufruf mittels RPC kommt dieselbe Anzahl für die Antwort hinzu. In der Summe werden insgesamt also 6 Hops passiert. Auf der y-Achse ist die Übertragungsdauer des Nachrichtenaufrufs in Millisekunden abgebildet.

Aus den Ergebnissen der Abbildung 5.5 lässt sich einerseits feststellen, dass der zu Overlay äquivalente Nachrichtentyp Unicast, keinen zusätzlichen Overhead im Vergleich zum Nachrichtenversand mittels Overlay produziert. Die vergleichbaren Mediane unterscheiden sich um maximal 1 ms, das bedeutet, die Übertragungsdauer ist nahezu identisch, folglich produziert die Versendung von Unicast-Nachrichten keinen zusätzlichen Overhead für den Versand mittels Overlay. Des weiteren ist zu erkennen, dass die Übertragungsdauer linear mit der Anzahl der zu passierenden Hops steigt.

Aus den Ergebnissen der Abbildung 5.6 lässt sich feststellen, dass sich der vergleichbare Versand des Nachrichtentyps Single Request Single Response, der Aufruf mittels RPC nahezu identisch verhält. Beide Typen benötigen eine ähn-

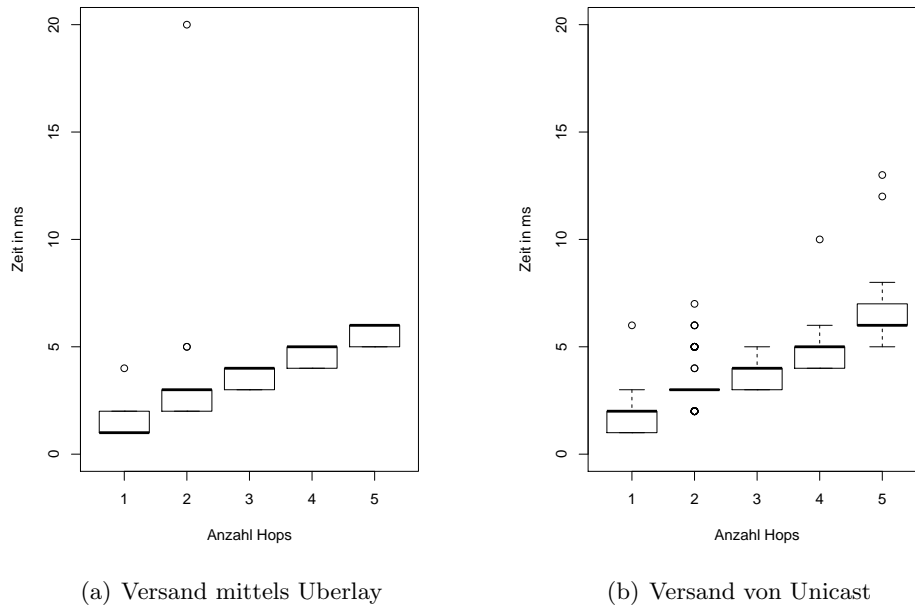


Abbildung 5.5: Ergebnisse: Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Hop-Anzahl für den Nachrichtenversand mittels Overlay sowie den Versand von Unicast-Nachrichten

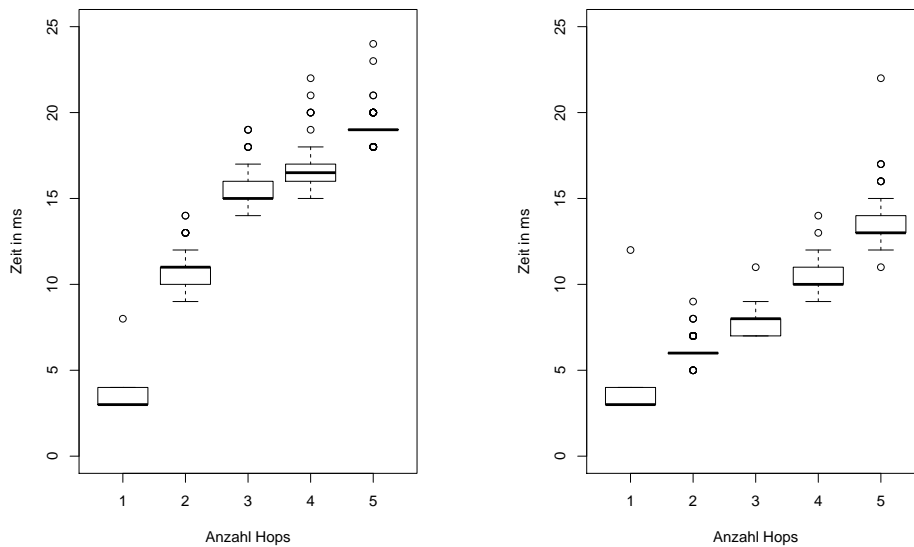
liche Übertragungsdauer und steigen linear zu der Anzahl der passierten Hops. Der zusätzliche Overhead zu Nachrichtentypen des One-way Pattern resultiert aus der Wartezeit auf die Response, welche vor allem durch die Eigenschaft herbeigeführt wird, dass diese Nachrichten die doppelte Anzahl an Hops passieren.

### 5.3.4 Schlussfolgerung

Aus den ermittelten Ergebnissen der beiden Evaluationskriterien *Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Payload-Größe* und *Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Hop-Anzahl* lassen sich nun abschließend, für den Nachrichtenversand mittels Übermep, folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Übermep produziert keinen zusätzlichen Overhead zu vergleichbaren Nachrichtenübermittlungen mittels Overlay.
- Die Übertragungszeit der Nachrichtentypen von Übermep steigt linear in Abhängigkeit der Anzahl der passierten Hops.
- Die Übertragungszeit steigt linear in Abhängigkeit der Größe des übertragenen Payloads.

Des weiteren lässt sich sagen, dass die Ergebnisse beider Kriterien durchaus akzeptabel sind und sich im Rahmen des Erwarteten bewegen. Da Übermep für



(a) Versand von Single Request Single Response Nachrichten

(b) Aufruf mittels RPC

Abbildung 5.6: Ergebnisse: Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Hop-Anzahl für den Versand von Single Request Single Response Nachrichten sowie den Aufruf mittels RPC

den Nachrichtentransport das Overlay-Projekt verwendet, ließe sich eine Verbesserung vor allem durch die Reduktion der Übertragungsdauer des Nachrichtenversands mittels Overlay herbeiführen, z.B. durch die Verringerung der Aktualisierungszeit des Round Trip Time Protokolls und daraus resultierend eine Reduktion des Nachrichtenaufkommens in Overlay. Für Payloads der Größe  $\geq 1$  MB läßt sich vermutlich eine Verringerung der Verarbeitungszeit und daraus resultierend auch eine Reduktion der Übertragungszeit durch die Erhöhung des Java-Heap-Space herbeiführen.



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde eine Java-Bibliothek zum Aufbau eines Peer-to-Peer Overlay Netzwerks entwickelt, welches den Austausch von Nachrichten ermöglicht.

Dazu wurden zu Beginn des Projekts Anforderungen spezifiziert. Aus der grundlegendsten Funktionalität, dem *Reliable Messaging* wurde schließlich in der Entwurfsphase ein *Message Exchange Pattern* definiert und spezifiziert, welches mittels einem daraus resultierenden Architekturkonzept umgesetzt und implementiert wurde. Diese Umsetzung wurde schließlich auf Basis der Anforderung der *Effizienz des Nachrichtenaustauschs* getestet.

Die Evaluation der Implementierung ergibt zum Einen, ein akzeptables Verhalten der Übertragungszeit der Nachrichten in Abhängigkeit der Nachrichtengröße. Zum Anderen ergibt sie keinen zusätzlichen Overhead zum vergleichbaren Nachrichtenaustausch mittels dem zugrundeliegenden Overlay-Projekt. Der sich ergebende Overhead der Request-Response Pattern im Vergleich zu Nachrichtentypen des One-way Pattern ergibt sich durch die zusätzliche Wartezeit auf die Response und bewegt sich daher im Rahmen des erwarteten.

Da diese Implementierung hochgradig vom zugrundeliegenden Overlay-Projekt abhängig ist, liegt für die Zukunft das primäre Augenmerk auf der Optimierung von Overlay. Optimierungsansätze liegen hier vor allem in Bezug auf eine Reduktion der Übertragungszeit des Nachrichtenversands von Overlay, sowie eine Verbesserung der Performanz für den Aufbau von Overlay-Netzwerken, in Bezug auf sich hoch dynamisch ändernde Netzwerke. Da bislang Overlay nur eine statische Festlegung der Aktualisierungszeit bietet, könnte hier, z.B. durch die dynamische Anpassung der Aktualisierungszeit der Routing-Tabellen eine deutlich bessere Performanz erreicht werden. Allerdings sollte man sich immer auch der Problematik des gegebenenfalls daraus resultierenden zusätzlich aufkommenden Netzwerkverkehrs bewußt sein.

Die Einsatzgebiete von Übermep sind vielfältig und reichen von der Verwendung für den Nachrichtenaustausch kleinerer Datenmengen in Sensornetzwerken bis zur Verwendung für den Nachrichtenaustausch mittlerer bis großer Datenmengen in File-Sharing-Netzwerken. Die Unterstützung verteilter Funktionsaufrufe mittels RPC, ermöglicht des weiteren die Nutzung verteilter Rechenressourcen z.B. im Bereich des Grid-Computing. Auch der Funktionalität von WebServices, beispielsweise durch verteilte Bereitstellung von Diensten, ist ein möglicher Anwendungsbereich.



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Client-Server vs. Peer-to-Peer . . . . .	4
2.2	Netzwerk mit einer Overlay- und einer Underlay-Topologie . . . . .	5
2.3	Übertragung eines Remote-Procedure-Call . . . . .	6
2.4	Ablauf eines Remote-Procedure-Call . . . . .	7
2.5	Vereinfachte Netty-Pipeline-Architektur . . . . .	9
2.6	Uberlay Layer Architektur . . . . .	14
2.7	Pfadvektor Protokoll-Beispiel . . . . .	16
2.8	Berechnung einer Round Trip Time . . . . .	16
3.1	Unicast . . . . .	22
3.2	Multicast . . . . .	22
3.3	Single Request     Single Response . . . . .	23
3.4	Single Request     Multi Response . . . . .	23
3.5	Multi Request     Multi Response . . . . .	23
3.6	Vereinfachte Channel-Architektur . . . . .	25
3.7	Schematischer Aufbau des Protokolls . . . . .	25
4.1	Aufbau des Peer-Interface . . . . .	34
4.2	Aufbau des Service-Interface . . . . .	34
4.3	Aufbau des UbermepService-Interface . . . . .	35
4.4	Aufbau des UbermepUnreliableService-Interface . . . . .	36
4.5	Aufbau des UbermepReliableService-Interface . . . . .	37
4.6	Aufbau des UbermepRpcService-Interface . . . . .	37
4.7	Aufbau des RequestListenerService-Interface . . . . .	38
4.8	Aufbau des UnicastMulticastRequestListener-Interface . . . . .	38
4.9	Aufbau des SingleRequestSingleResponseRequestListener-Interface . . . . .	39
4.10	Aufbau des MultiResponseRequestListener-Interface . . . . .	39
4.11	Aufbau des MultiResponseHandle-Interface . . . . .	39
4.12	Aufbau des ProgressListenerRunnable-Interface . . . . .	40
4.13	Vererbungshierarchie und Abhängigkeiten der PeerImpl . . . . .	41
4.14	Abhängigkeiten des AbstractServiceHandler . . . . .	41
4.15	Abhängigkeiten des Unreliable- und ReliableServiceHandler . . . . .	42
4.16	Aufbau der RequestResponse-ServiceHandler . . . . .	44
4.17	sequenz . . . . .	46
4.18	Handling der RequestResponse-Events in Ubermep . . . . .	47
4.19	Abhängigkeiten des UbermepRpcChannel . . . . .	48
4.20	Aufbau eines einfachen Peer-to-Peer Netzwerk . . . . .	53
5.1	Single-Hop-Topologie . . . . .	61

5.2	Multi-Hop-Topologie . . . . .	61
5.3	Boxplot-Beispiel . . . . .	63
5.4	Ergebnisse: Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Payload-Größe	65
5.5	Ergebnisse: Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Hop-Anzahl für den Nachrichtenversand mittels Overlay sowie den Versand von Unicast-Nachrichten . . . . .	66
5.6	Ergebnisse: Übertragungsdauer in Abhängigkeit der Hop-Anzahl für den Versand von Single Request Single Response Nachrichten sowie den Aufruf mittels RPC . . . . .	67



## Abkürzungsverzeichnis

BDD .....	Behavior Driven Development
CAN .....	Content Addressable Network
DHT .....	Distributed Hash Table
IDL .....	Interface Definition Language
IQR .....	Interquartilsabstand
MEP .....	Message Exchange Pattern
POM .....	Project Object Model
RPC .....	Remote Procedure Call
TDD .....	Test Driven Development
UP .....	Uberlay Protocol
URN .....	Uniform Resource Name
WSN .....	Wireless Sensor Network



# Bibliographie

- [1] APACHE, S. F. Maven. <http://maven.apache.org/>.
- [2] BALAKRISHNAN, H., KAASHOEK, M. F., KARGER, D., MORRIS, R., AND STOICA, I. Looking up data in p2p systems. *Communications of the ACM - Web science* (2003).
- [3] BIMSCHAS, D. Infrastruktursoftware zur Föderation von Sensornetzwerk-Testbeds. Master's thesis, Universität zu Lübeck, 2009.
- [4] DUNKEL, J., EBERHART, A., FISCHER, S., KLEINER, C., AND KOSCHEL, A. *System-Architekturen für verteilte Anwendungen*. Hanser, 2008.
- [5] GOOGLE. Google Protocol Buffers. <http://code.google.com/p/protobuf/>.
- [6] GOOGLE. Google Protocol Buffers. <http://code.google.com/apis/protocolbuffers/docs/encoding.html>.
- [7] GOOGLE. Google Protocol Buffers. <http://code.google.com/intl/de-DE/apis/protocolbuffers/docs/proto.html#options>.
- [8] INSTITUT DER TELEMATIK AN DER UNIVERSITÄT ZU LÜBECK. Uberlay. <https://github.com/itm/uberlay>.
- [9] JBOSS. JBoss-Netty. <http://www.jboss.org/netty>.
- [10] LEVIS, P., BREWER, E., CULLER, D., GAY, D., MADDEN, S., PATEL, N., POLASTRE, J., SHENKER, S., SZEWCZYK, R., AND WOO, A. The emergence of a networking primitive in wireless sensor networks. *Communications of the ACM - Web science* (2008).
- [11] OMG. Common Object Request Broker Architecture (CORBA)-Specifications. <http://www.omg.org/spec/CORBA/>.
- [12] SZCZEPAN FABER. Mockito. <http://code.google.com/p/mockito/>.
- [13] SZCZEPAN FABER. Mockito. <http://docs.mockito.googlecode.com/hg/latest/org/mockito/Mockito.html>.
- [14] WORLD WIDE WEB CONSORTIUM. Web services. <http://www.w3.org/TR/ws-arch/#relwwwrest>.

