

Kapitel 1

Einleitung

Die Bereitstellung multimedialer Dienste, welche als interessantes und kundenbindendes Angebot mit der zunehmenden Verbreitung von Internet-Zugängen hoher Bandbreiten eine immer größere Nachfrage finden, bedarf immenser Ressourcen seitens der Dienstanbieter. Bestehende Technologien setzen umfangreiche eigene Bandbreitenkapazitäten oder die kostenintensive Inanspruchnahme von Ressourcen kommerzieller Verteildienste, der *Content Delivery Networks (CDNs)*, voraus. Der Aufwand beider Ansätze hindert insbesondere kleine, nicht-kommerzielle Institutionen daran, der Öffentlichkeit multimediale Dienste anzubieten.

In der vorliegenden Arbeit soll daher betrachtet werden, wie eine alternative Lastverteilung für die Live-Übertragung multimedialer Daten implementiert werden kann. Hierbei soll der Fokus vor allem auf selbstorganisierende Strukturen in Form von häufig als „*Peer-to-Peer*“ bezeichneten Overlay-Netzen gelegt werden. In den vergangenen Jahren wurde in diesem Kontext für den internetbasierten Transport multimedialer Inhalte an bis zu sehr große Benutzergruppen der *Application Layer Multicast (ALM)* [83], der zur Datenübertragung Overlay-Netze konstruiert, vorgeschlagen. Der systematische Vorteil dieses Ansatzes ist, dass die Endsysteme der Empfänger den Datenstrom für andere Interessenten replizieren und damit die Ressourcen zur Verteilung eines Datenstroms mit der Nachfrage nach demselben zunehmen.

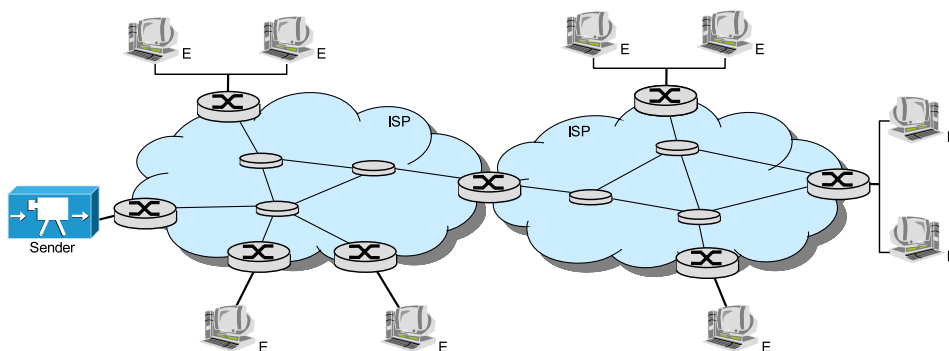


Abbildung 1.1: Verteilungssystem: Sender, Empfänger (E) und Übertragungsnetze (ISP)

Die vorliegende Arbeit fokussiert darüber hinaus auf die Live-Übertragung, also die gleichzeitige Produktion und Bereitstellung von *Programmen*, die aus einem oder mehreren Datenströmen, etwa von aktuellen Nachrichtensendungen oder Sportereignissen,

bestehen. Für ein Szenario, in dem viele Nutzer solche Angebote komplementär oder als Alternative zu herkömmlichen Fernsehangeboten über internetbasierte Dienste nutzen, soll daher eine umfassende Infrastruktur bereit gestellt werden, in der

- Programme aus unterschiedlichen Datenströmen von beliebigen Anbietern publiziert werden können
- Interessenten die einzelnen Datenströme finden, auswählen und zwischen den unterschiedlichen Datenströmen wechseln können

Diese Infrastruktur wird folglich nicht nur die kurzfristige reine Übertragung der Datenpakete, sondern darüber hinaus den Anbietern und Nutzern als dauerhaft verfügbarer Dienst die Publikation, Suche und Auswahl von Inhalten ermöglichen.

In diesem Szenario können drei unterschiedliche Rollen beteiligter Teilnehmer (vgl. Abbildung 1.1) identifiziert werden:

- Sender, auch *Dienstanbieter*, *Datenstromquellen* oder *Content-Provider*, stellen einen Datenstrom als Teil eines Programms zur Verfügung
- Empfänger abonnieren, empfangen und konsumieren einen oder unterschiedliche der angebotenen Datenströme
- Netzbetreiber, auch *Internet Service Provider (ISP)*, stellen in ihren Backbones die Netzwerkinfrastruktur zur Verteilung der Datenstrompakete zur Verfügung

Netzwerk- und Dienstesicht

Die drei Rollen der Sender, Empfänger und Netzbetreiber finden sich in der Systembetrachtung auf Netzwerk- und Dienstesicht (vgl. Abbildung 1.2) wieder.

Auf der Ebene des Netzwerks betrachtet, stellt sich das System als eine Vielzahl von End- und Zwischensystemen dar, die über Netzwerkverbindungen miteinander Daten austauschen. In der Netzwerksicht können diese Systeme den einzelnen organisatorischen Einheiten zugeordnet werden. So sind die Endsysteme der Sender und Empfänger über Zugangsverbindungen (auch *Access-Links*) mit ihrem Netzbetreiber verbunden. Jeder ISP unterhält eine eigene Infrastruktur aus verbundenen Zwischensystemen, die häufig zu autonomen Systemen (Autonomes System, AS) zusammengefasst sind. Zwischen den Autonomen Systemen der einzelnen Netzbetreiber existieren wiederum Verbindungen („*Peering-Points*“), über welche Daten für Endsysteme übermittelt werden, die mit den Netzen anderer Netzbetreiber verbunden sind.

In der Netzwerksicht werden im Weiteren die einzelnen Geräte auf Netzwerkebene als *End- und Zwischensysteme* und die Verbindungen der Zwischensysteme im Infrastrukturnetz als *Netzwerkverbindungen*, oder *Hops* bezeichnet.

Die Netzwerksicht ist für Sender und Empfänger jedoch transparent. Für sie stellt sich die Verteilungsinfrastruktur aus der Dienstesicht als ein Overlay auf Anwendungsebene verbundener Endsysteme dar, deren Verbindungen unterschiedliche Attribute haben, wie die verfügbare Übertragungsrate, die Ende-zu-Ende-Latenz und die Fehlerrate, die aus den Eigenschaften der Verbindungen auf Netzwerkebene resultieren.

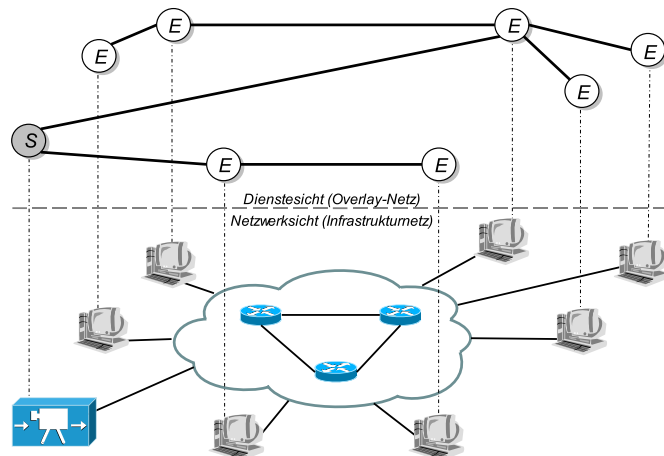


Abbildung 1.2: Dienstesicht: Sender (S) und Empfänger (E) einer Verteilungsinfrastruktur (Overlay-Netz) und Netzwerksicht: Sender, Empfänger und Zwischensysteme (Infrastrukturnetz).

Die Endsysteme der Sender und Empfänger werden in der Dienstesicht auf das Overlay im Weiteren als *Knoten* und die Ende-zu-Ende-Verbindungen zwischen diesen Endsystemen als *Kanten* oder *Links* bezeichnet.

Übertragungstechniken

Zur Bereitstellung von Diensten zur Übertragung großer Datenmengen existieren die drei unterschiedlichen Übertragungstechniken des *Client-Server-Unicast*, des *Netzwerk-Multicast* sowie der dezentral verteilten, häufig mit *Peer-to-Peer* bezeichneten Systeme.

Client-Server-Unicast Im Client-Server-Unicast werden zwischen dem Diensteanbieter und allen Empfängern Ende-zu-Ende-Verbindungen aufgebaut, über welche die vollständigen Daten übertragen werden. Zur Verteilung an mehrere Empfänger werden die Daten lokal am Sender dupliziert und ab dessen Zugangsverbindung zum Internet redundant übertragen. Bei der Übertragung großer Datenmengen an wachsende Empfängerzahlen werden dadurch die Ressourcen des Senders durch den notwendigen Bearbeitungs- und Übertragungsaufwand zum Flaschenhals. Diese Eigenschaft führt dazu, dass dieser Ansatz für große Gruppen nicht einsetzbar ist.

Für diese Übertragungstechnik sind unterschiedliche Vorschläge zur Verbesserung gemacht worden. Hierzu gehören der Einsatz von Lastverteilungsmechanismen auf mehrere Server und Zugangsverbindungen in *Server-Farmen* ebenso wie die breite Verteilung spiegelnder Ressourcen in die Netze der Netzbetreiber durch *Proxy-Caches* und *CDN*.

All diese Vorschläge lassen sich stark vereinfacht auf die Idee Server-Replikation reduzieren und müssen bei einer großen Nachfrage nach Angeboten an ihre Grenzen stoßen.

Netzwerk-Multicast Bei der durchs Netzwerk unterstützten Gruppenkommunikation, dem Netzwerk- oder IP-Multicast [29], treten alle Teilnehmer einer durch die Zwischensysteme verwalteten Gruppe bei und erhalten daraufhin die an diese Gruppe gesendeten Daten. Alle Sender schicken ihre Daten daraufhin einzeln über ihre Zugangsverbindung in das Netzwerk. Die Zwischensysteme duplizieren die empfangenen Pakete für alle Empfänger und verwalten die unterschiedlichen Gruppen. Mit dieser Übertragungstechnik bedarf es keiner redundanten Datenübertragung auf den Verbindungen der zur Multicast-Domäne gehörigen Zwischensysteme. Im besten Fall, wenn der Sender und alle Empfänger mit Zwischensystemen der gleichen Multicast-Domäne verbunden sind, tritt folglich gar keine redundante Paketübertragung auf.

Zum Netzwerk-Multicast existieren jedoch diverse offene Fragen, und er leidet unter einigen systematischen Problemen [31]. Hierzu gehört der an den Zwischensystemen auftretende Verwaltungsaufwand für die einzelnen Gruppen und die Gruppenzugehörigkeit der Empfänger, der für große Multicast-Domänen nicht mit steigender Gruppenzahl skalieren kann. Ein weiteres Problem des Netzwerk-Multicasts ist der Mangel an praktikablen Vorschlägen zur Authentisierung und Autorisierung der Nutzergruppen, der in einer starken Sabotage-Anfälligkeit resultiert: ein böswilliger Sender kann unerkannt beliebig viele Pakete durch den Netzwerk-Multicast verteilen lassen, ohne selbst zur Gruppe zu gehören oder sich identifizieren zu müssen. Außerdem existieren keine befriedigenden Geschäftsmodelle für den Netzwerk-Multicast und die Frage nach der Abrechenbarkeit des Datenaufkommens ist ungelöst. Aufgrund dieser Tatsachen ist der Netzwerk-Multicast mit Ausnahme kleiner Inseln im Internet derzeit nicht verfügbar.

Peer-to-Peer-Ansätze Peer-to-Peer-Ansätze bilden kooperativ ein selbstorganisierendes Overlay-Netz aus Verbindungen, die, unterschiedlichen Strategien folgend, zwischen den einzelnen Teilnehmern aufgebaut werden. Alle Teilnehmer stellen zudem einen Teil ihrer lokalen Ressourcen zur Verfügung und treten parallel zum Empfang der verteilten Daten selbst als Dienstbringer auf, indem sie die erhaltenen Daten auch anderen Teilnehmern weiterleiten. In diesem Ansatz werden die Pakete durch die Teilnehmer dupliziert und anderen Empfängern weitergeleitet. Verwaltung und Organisation finden beim Peer-to-Peer in der Regel aufgrund der vergleichsweise geringeren Zuverlässigkeit der Dienstbringer dezentral durch alle Teilnehmer statt.

Bei der Übertragung im Netz entstehende Verzögerungen (*Delays*), Verzögerungsschwankungen (*Jitter*) und Paketverluste durch Übertragungsfehler treten in einem Peer-to-Peer-basierten Ansatz verstärkt auf, da die Daten nicht direkt zwischen Quelle und Empfänger, sondern gegebenenfalls über den Umweg der Weiterleitung durch andere Teilnehmer ausgeliefert werden. Daraus resultierend steigt die Wahrscheinlichkeit für eine Paketvertauschung, und , die auf eine konkrete Ordnungssemantik angewiesen sind, müssen die notwendige Ordnung durch zusätzliche Mechanismen wiederherstellen. Bei der Live-Übertragung eines multimedialen Datenstroms ist die Reihenfolge der diesem Strom zugehörigen Pakete relevant. Jeder Datenstrom wird hier jedoch lediglich von einer Quelle generiert. Da nicht mehrere Sender existieren, ist das Anbringen von Zeitstempeln durch die Quelle, welches bei der Übertragung multimedialer Ströme über Datennetze regelmäßig durchgeführt wird, auch hier ausreichend.

Aufgrund der Dienstleistung durch alle Teilnehmer und mangels eines zentralen Managements bedarf es beim Peer-to-Peer zweier grundlegender Dienste. Einmal müssen die angebotenen Inhalte und potentielle Dienstleister für die ausgewählten Inhalte gefunden werden können, wofür ein *Lokalisierungsdienst* benötigt wird. Zum anderen müssen zwischen den Quellen der Inhalte und den Empfängern zur Weiterleitung nach festen Regeln Verbindungen zwischen den Teilnehmern aufgebaut werden. Zu diesem Zweck ist ein Dienst zur *Konstruktion der Verteilungsinfrastrukturen* notwendig.

In der vorliegenden Arbeit sollen Prozeduren für ein Overlay-Live-Streaming-System, also zur Konstruktion einer Peer-to-Peer-basierten Verteilungsinfrastruktur für die Live-Übertragung multimedialer Inhalte entwickelt und bewertet werden.

Allgemeine Anforderungen

Bei dem Entwurf eines Overlay-Streaming-Systems können primär Qualität und Effizienz als konkurrierende Ziele identifiziert werden. Für die Empfänger ist es wünschenswert, den Dienst mit größtmöglicher Qualität nutzen zu können. Sie erwarten, den angebotenen Datenstrom fehlerfrei, also ohne Paketverluste, mit einem möglichst niedrigen Delay zu empfangen. Gleichzeitig ist es für alle Dienstleister, sowohl im Overlay bei Versand und Weiterleitung des Datenstroms, als auf Netzwerkebene bei der Übertragung der Pakete wünschenswert, dass diese hohe gewünschte Qualität effizient, also durch einen möglichst geringen Einsatz von Ressourcen, erreicht werden kann.

An ein Overlay-Streaming-System ergeben sich damit durch die drei Rollen der Sender, Empfänger und Netzbetreiber folgende Anforderungen:

Sender Aus der Rolle des Senders ergeben sich primär zwei Anforderungen. Einmal muss das System zu einer über die Anzahl der Empfänger skalierenden Datenverteilung führen und dem Sender ermöglichen, auch große Benutzergruppen mit umfangreichen Datenströmen zu versorgen. Daraus resultierend muss das System die lokalen Ressourcen der Datenstromquelle schonend einsetzen. Außerdem darf der am Sender anfallende Aufwand maximal linear mit der Anzahl Empfänger steigen. Um auch Endsysteme mit geringen Ressourcen, wie mobile Endgeräte, als Datenstromquelle einsetzen zu können, ist es wünschenswert, dass der Ressourcenbedarf an der Quelle unabhängig von der Anzahl Empfänger konstant gering bleibt.

Zum anderen ist für Sender die Verfügbarkeit des Angebots wichtig: Alle Empfänger sollen trotz der eingesetzten Lastverteilungsmechanismen den angebotenen Datenstrom jederzeit und vollständig empfangen können. Diese Anforderung schließt eine gleichmäßig zuverlässige Auslieferung der Pakete über die Verteilungsinfrastruktur ebenso ein wie die Stabilität gegenüber böswilligen Einflussnahmen wie Angriffen auf Teilnehmer oder die potentiell schädigende Einspeisung ungültiger Daten. Eine Gewährleistung dieser Verfügbarkeit des Dienstes, sowohl gegenüber zufälligen Störungen als auch bei vorsätzlicher Sabotage, ist eine zentrale Anforderung für einen kommerziellen Einsatz solcher Systeme.

Empfänger Für die Empfänger steht zunächst die Leistungsfähigkeit des Dienstes im Vordergrund. Hierzu gehört einmal die Qualität des Angebots, also der vollständige Empfang aller Pakete des Datenstroms. Als Metrik für die Qualität des Datenstroms lässt sich

die *Paketverlustrate* bei einem Empfänger oder die aggregierte Paketverlustrate im gesamten System heranziehen. Im Kontext der Übertragung in Overlays müssen dafür Mechanismen existieren, die das System robust gegen unvorhersehbare Zwischenfälle machen. So müssen Fehler im Overlay, die durch das Ausscheiden anderer Empfänger entstehen, schnell detektiert und repariert werden. Für einen solchen Peer-to-Peer-basierten Dienst ist zu erwarten, dass häufig transiente Phasen auftreten, während derer das Overlay repariert oder restrukturiert wird. Daher muss die Topologie so konstruiert werden, dass die Auswirkungen der Fehler örtlich und im Ausmaß begrenzt auftreten und das Overlay als ganzes stabil ist. Darüber hinaus zeichnet sich ein leistungsfähiger Dienst durch eine geringe Verzögerung zwischen dem Zeitpunkt der Produktion und der Präsentation ebenso wie zwischen der Auswahl und der Präsentation eines Datenstroms, also der Möglichkeit, schnell zwischen unterschiedlichen Datenströmen umschalten zu können, aus. Eine Metrik zur Bewertung der Topologie in Bezug auf das aus dem kooperativen Ansatz resultierende zusätzliche Delay ist der *Path-Stretch*. Er gibt das gemittelte Verhältnis zwischen dem Gesamtweg von der Quelle bis zu den Empfängern auf dem Overlay-Pfad und dem direkten Weg zwischen der Quelle und den einzelnen Empfängern an. Als Maßzahl des Weges wird hierzu entweder die Anzahl traversierter Netzwerkverbindungen oder die Übertragungsverzögerung herangezogen.

Eine nachgelagerte Anforderung der Empfänger ist außerdem der sparsame Umgang des Systems mit lokalen Ressourcen. Dabei ist für die Empfänger wichtig, dass das System trotz des kooperativen Ansatzes sparsam mit der verfügbaren Bandbreite umgeht und die Last der Datenstromverteilung fair zwischen den Teilnehmern aufteilt.

Netzbetreiber Die Anforderung aus Sicht der Netzbetreiber ist eine möglichst hohe Netzwerkeffizienz, also eine niedrige Redundanz bei der Übertragung von Paketen des Datenstroms. Dies betrifft die Übertragung über die Netzwerkverbindungen innerhalb, wichtiger jedoch den Netzwerkverkehr über die Grenzen des eigenen Autonomes Systems hinweg, da für die Weiterleitung in andere und den Bezug von Daten aus anderen Autonomes Systemen gegebenenfalls zusätzlich Kosten entstehen.

Zur Bewertung der Netzwerkeffizienz eines Overlay-Netzes wird gemeinhin der *Link-Stress*[89] gemessen. Er gibt das Mittel oder das Maximum der identischen, über eine Netzwerkverbindung redundant übertragenen Kopien eines Paketes des Datenstroms an. Außerdem ist der Path-Stretch, neben seiner Eigenschaft als gute Metrik zur Bewertung der verursachten Delays, ein gutes Indiz für die Netzwerkeffizienz eines Overlay-Netzes.

Problemstellung

In der vorliegenden Arbeit soll ein System zur Live-Übertragung multimedialer Inhalte auf Basis des Overlay-Streamings bereit gestellt werden. Aus diesem Grund muss eine zuverlässige Lokalisierungsprozedur mit kurzen Antwortzeiten bereit gestellt werden. Außerdem soll eine Prozedur entwickelt werden, die stabile und netzwerkeffiziente Topologien für Live-Streaming konstruiert.

Ziele der Arbeit

Der Beitrag der vorgelegten Arbeit lässt sich in fünf einzelne Ziele zusammenfassen:

- Es wird ein analytisches Modell für die Bewertung der Stabilität und Effizienz von Overlay-Streaming-Topologien eingeführt
- Durch die Analyse von Streaming-Topologien werden unterschiedliche Eigenschaften effizienter und stabiler Topologien identifiziert
- Daraus resultierend wird eine Klasse von Topologien vorgestellt, die beweisbar optimal stabil gegen Angriffe ist
- Es wird ein effizienter Lokalisierungsmechanismus mit geringen Antwortzeiten zur Konstruktion von Overlay-Topologien entwickelt
- Schließlich wird eine verteilte Prozedur zum Aufbau stabiler und effizienter Streaming-Topologien auf der Basis lokalen Wissens entwickelt und bewertet

Nachweis

Zur Bewertung der vorgeschlagenen Prozeduren werden die Ergebnisse unterschiedlich evaluiert. Zunächst wird zu diesem Zweck ein analytisches Modell und mit seiner Hilfe werden neue Metriken, das Hop-Penalty zur Bewertung der Effizienz und die Widerstandsfähigkeit zur Bewertung der Stabilität einer Topologie aufgestellt. Daraufhin wird die vorgeschlagene Lokalisierungsprozedur implementiert und mit Simulationen in Bezug auf ihren Sucherfolg und die Effizienz mit bestehenden Lösungen verglichen. Stellvertretend für die existierenden Ansätze wird zu diesem Zweck mit Pastry [84] ein derzeit als zuverlässig und performant geltender Ansatz gewählt. Die verteilte Prozedur zur Konstruktion der Streaming-Overlays wird ebenfalls implementiert und die in Simulationsreihen konstruierten Topologien werden sowohl algorithmisch als auch simulativ auf ihre Effizienz und Stabilität untersucht.

Die vorgelegte Dissertation gliedert sich in acht Kapitel. In Kapitel 2 werden Grundlagen zu multimedialen Daten und ihrer Übertragung mit Peer-to-Peer-basierten Ansätzen erläutert. In einem kurzen Abschnitt werden dabei die Eigenschaften der multimedialen Daten als Nutzlast vorgestellt und in Beziehung zur Thematik gebracht. Darüber hinaus wird auf die dezentralen Eigenschaften Peer-to-Peer-basierter Systeme eingegangen und daran die Problematik der zuverlässigen Konstruktion von Streaming-Overlays erläutert. Schließlich folgt ein Überblick über die Teilfunktionen, die für ein Overlay-Streaming-System bereitgestellt werden müssen.

Das Kapitel 3 geht detaillierter auf bestehende Lösungsvorschläge zur Konstruktion von Overlay-Streaming-Systemen sowie ihre einzelnen Vor- und Nachteile ein. Dabei werden die grundsätzlichen Ideen und Strategien klassifiziert und die existierenden Ansätze geordnet. Außerdem wird auf die wünschenswerten und ungünstigen Eigenschaften eingegangen, durch die sich die Strategien der einzelnen Klassen auszeichnen.

In Kapitel 4 wird ein analytisches Modell zur Beschreibung von Overlay-Systemen entwickelt. Dieses umfasst sowohl Overlays zur Lokalisierung als auch Overlay-Streaming-Systeme. Aus dem Modell ergeben sich direkt Nutzen-, Schadens- und Angreifermodelle, die eine Bewertung der Stabilität konstruierter Streaming-Topologien ermöglichen. Anhand des entwickelten Modells werden daraufhin die bekannten Metriken zur Bewertung beschrieben und zwei neue Metriken, die „Widerstandsfähigkeit“ und das „Hop-Penalty“, hergeleitet und definiert. Das Kapitel schließt mit einer formalen Beschreibung der Problemstellung der vorliegenden Dissertation ab.

Mithilfe des analytischen Modells werden in Kapitel 5 zunächst die Eigenschaften der Komponenten einer Prozedur für die Lokalisierung von Ressourcen in einem dezentralen verteilten System analysiert und aus diesen Eigenschaften Anforderungen für die eigene Prozedur abgeleitet. Im Anschluss daran werden die Eigenschaften optimal effizienter und optimal stabiler Overlay-Streaming-Topologien hergeleitet und auch für die eigene verteilte Prozedur zur Konstruktion der Streaming-Overlays Anforderungen gestellt.

In Kapitel 6 werden die Prozeduren zur Lokalisierung von Datenströmen und zur Konstruktion von stabilen und effizienten Overlay-Topologien entworfen und beschrieben. Es enthält dazu sowohl vereinfachte Organisations- und Fehlermodelle als auch eine detaillierte Beschreibung des Entwurfs der notwendigen Prozeduren. Dabei werden zudem die entwickelten Algorithmen für sowohl das Routing als auch die Nachbarwahl der Lokalisierung und die kostenbasierte Optimierung der Streaming-Topologien entworfen und dokumentiert. Im Anschluss folgt eine vereinfachte Spezifikation des Lokalisierungs- und Streaming-Dienstes mitsamt der Beschreibung ihrer verteilten Signalisierungsprozeduren.

Zur Evaluation der vorgeschlagenen Prozeduren werden unterschiedliche Experimente und Analysen durchgeführt, die in Kapitel 7 beschrieben sind. Die Experimente umfassen zunächst Versuchsreihen zur Bewertung der Güte der Lokalisierungsprozedur durch Simulationen auf Paketebene mithilfe des Simulationswerkzeugs OMNeT++¹. Anschließend wird in unterschiedlichen Versuchsreihen überprüft, ob die Signalisierungsprozedur zur Konstruktion der Streaming-Overlays effiziente und stabile Topologien konstruiert. Da zur Konstruktion effizienter Topologien ein synthetisches Koordinatensystem Anwendung findet, wird zunächst die Abhängigkeit zwischen der Güte der Koordinatenschätzung und der Effizienz der Topologien untersucht. Daraufhin wird in mehreren Experimenten der Einfluss der unterschiedlichen vorgeschlagenen Kostenarten sowohl einzeln als auch in Kombination als Gesamtkostenfunktion untersucht. Hierbei werden die konstruierten Topologien zunächst offline algorithmisch nach den anfangs eingeführten Metriken Hop-Penalty und der Widerstandsfähigkeit bewertet und die so ermittelten Ergebnisse mithilfe einer Simulation validiert. Schließlich wird in einer letzten Simulationsreihe untersucht, in wieweit die vorgeschlagene Prozedur die Möglichkeit bietet, eine Justierung zwischen den Zielen der Stabilität und der Effizienz vorzunehmen.

Abschließend fasst das Kapitel 8 die durchgeführte Studie kritisch zusammen und gibt einen Ausblick auf neue, während der Durchführung identifizierte Probleme und Forschungsfragen.

¹<http://www.omnetpp.org>