



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Dynamische domänenübergreifende Gruppenkommunikation in hybriden Multicast-Netzwerken

Sebastian Wölke

Ausarbeitung Projekt I

*Fakultät Technik und Informatik
Studiendepartment Informatik*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Computer Science*

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Hybride Multicast-Netzwerke	3
2.1	Namen und Adressen	4
2.2	Klassifizierung der Teilkomponenten	5
3	Intra-Domain Multicast Management	7
3.1	Datenkommunikation	7
3.1.1	Konzept	7
3.1.2	Umsetzung	9
3.2	Gruppenverwaltung	12
3.2.1	Konzept	12
3.2.2	Umsetzung	14
4	Inter-Domain Routing	16
4.1	Rendezvous Konzept	16
4.2	Routing Konzept	18
4.3	Besonderheiten bei SSM	21
5	ASM- und selektive Broadcast-URIs	22
6	Zusammenfassung und Ausblick	24

1 Einleitung

Anwendungen und Dienste wie Videokonferenzen, Internet Radio, IPTV und soziale Netze basieren auf Gruppenkommunikation. Es werden dieselben Daten zu mehreren Empfängern gesendet. Gruppenkommunikation ist darauf ausgelegt, redundanten Datenverkehr zu vermeiden, wobei die Umsetzung auf den unteren Netzwerkschichten am effizientesten ist. Eine effiziente und skalierbare Gruppenkommunikation ist IP-Multicast [DC90], welches von den meisten IP-fähigen Hosts und lokalen Netzwerken unterstützt wird. Allerdings stellen Internet-Service Provider aus unterschiedlichen Gründen keine global verfügbare Multicast-Infrastruktur für den Endanwender zur Verfügung. Zum Beispiel profitieren Internet-Anbieter nicht von ISP-übergreifenden Multicast-Diensten, da es das eigene Datenvolumen und damit die Einkünfte senkt und Zusatzkosten durch eine komplexe Gruppenverwaltung entstehen. Zudem wird die Verbreitung durch die Vielfalt der Multicast-Protokolle und durch ein fehlendes Authentifizierungssystem gebremst [DLL⁺00]. Dies hatte bis heute zur Folge, dass sich Multicast in isolierten Inseln und mit heterogenen Technologien verbreitet.

HVMcast [HAM14] baut auf dem Gedanken des Hybrid Shared Trees auf [WS07] und hat das Ziel, Multicast-Inseln miteinander zu verbinden und deren Technologien und Varianten zu integrieren. Um den Zugriff auf diesen technologieübergreifenden Service zu ermöglichen, verwendet HVMcast eine Common Multicast API [WSV13]. Diese API erlaubt einen transparenten Zugriff auf die Multicast-Technologien sowohl im Under- als auch im Overlay. Weiterhin verwendet HVMcast eine Middleware [SWCM13] als Vermittlungsschicht, welche unter den verfügbaren Multicast-Technologien selbstständig die effizienteste im Netzwerk wählt.

Die Multicast-Domänen eines Hybrid Shared Trees werden technologieübergreifend mithilfe von Interdomain Multicast Gateways (IMG) verbunden und übersetzen zwischen den verschiedenen Technologien. Im Gegensatz zu den bekannten Translations-Konzepten zwischen IPv4 und IPv6 (wie zum Beispiel [LBC⁺11], [VLB11], [JGFL12] oder [VASF10]), übersetzt der IMG technologiespezifische Adressen indirekt unter Verwendung eines abstrakten Namensschemas (URI). Die URIs ermöglichen eine eindeutige und globale Identifizierung von Multicast Gruppen,

was technologiespezifische Adressen nicht können. Bei der Konzeptionierung und Umsetzung dieses Abbildungsverfahrens muss darauf geachtet werden, dass es reversible und kollisionsfrei ist und für eine hohe Skalierbarkeit keine globalen Zustände benötigt.

Diese Ausarbeitung beschreibt, wie eine dynamische und technologietransparente Gruppenkommunikation über Gruppennamen am Beispiel von HVMcast umgesetzt werden kann. Dabei werden die einzelnen Teilprobleme aufgezeigt, mögliche Lösungsansätze diskutiert und die Umsetzung beschrieben.

Gliederung der Ausarbeitung

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt: Im zweiten Kapitel werden hybride Multicast-Netzwerke vorgestellt und klassifiziert. In Kapitel drei wird die Teilaufgabe *Intra-Domain Kommunikation* diskutiert, Umsetzungsmöglichkeiten vorgestellt und die tatsächliche Umsetzung beschrieben. Anschließend wird in Kapitel vier das *Intra-Domain Group-Register* genauer untersucht und eine Lösung für eine Umkehrabbildung ausgearbeitet. Darauf aufbauend werden im Kapitel fünf Ansätze für ein domänenübergreifendes Routing erörtert. Abschließend wird die Ausarbeitung zusammengefasst und in einem Ausblick das weitere Vorgehen aufgezeigt.

2 Hybride Multicast-Netzwerke

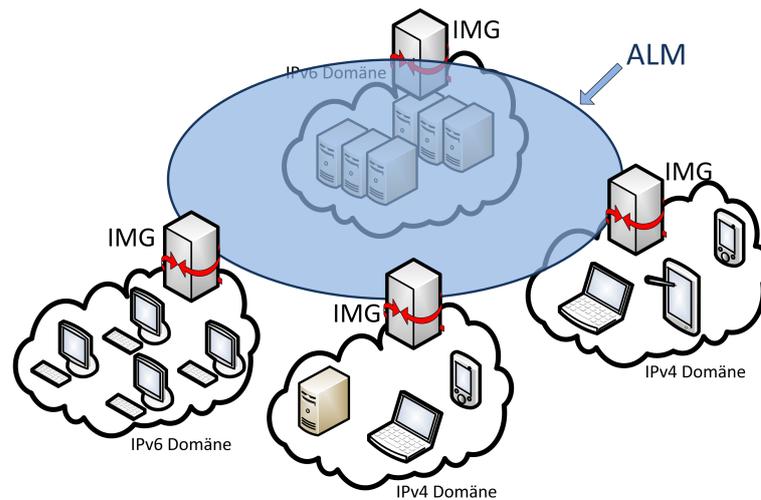


Abbildung 2.1: Beispiel eines hybriden Multicast-Netzwerkes in mehreren Ebenen

Hybride Multicast-Netzwerke verbinden Netzwerke unterschiedlicher Multicast-Technologien und ermöglichen eine technologieübergreifende Kommunikation. Es existieren verschiedene Konzepte und Implementierungen, wie zum Beispiel das Host Multicast Tree Protocol [ZJZ02], Universal Multicast [ZWJ⁺06], Scalable Hybrid Multicast [LWYG07], Island Multicast [JCC09], HVMcast [MCSW12]. Darauf aufbauend wird in dem RFC *Common Multicast API for Transparent Hybrid Multicast* ein technologieunabhängiger Ansatz vorgestellt [WSV13]. Multicast-Domänen werden über *Interdomain Multicast Gateways* (IMG) verbunden und routen die Gruppendaten transparent im Under- und Overlay. Abbildung 2.1 zeigt zum Beispiel ein Hybrides Multicast-Netzwerk, welches die einzelnen Multicast-Inseln durch IMGs in ein gemeinsames *Application Layer Multicast* Netzwerk (ALM) einbindet. Zur globalen Identifikation der Gruppen wird ein einheitliches und abstraktes Namensschema in Form von URIs verwendet, welche in den jeweiligen Namensräumen auf technologiespezifische Adressen abgebildet werden. Außerdem wird eine generisch API zur Verfügung gestellt, um Anwendungen und

Multicast-Technologien zu entkoppeln.

IMGs routen die Gruppendaten nach statischen oder dynamischen Regeln auf Basis der Gruppenzustände des Verteilbaums. Jeder IMG verwaltet die Gruppenzustände seiner Domänen, welche sich aus den Gruppensignalisierungen *Join* und *Source-Register* der Hosts ergeben. Diese Gruppenzustände werden zwischen den IMGs kommuniziert, um Sender und Empfänger domänenübergreifend zu koppeln. Eine solche indirekte Verknüpfung (Rendezvous Prozess) wird für das vom Multicast verwendeten Publish/Subscribe Paradigma benötigt, welches Sender und Empfänger räumlich entkoppelt, um eine Multipoint Verbindung zu ermöglichen.

2.1 Namen und Adressen

Zur technologieunabhängigen Identifikation von Gruppen wird eine Teilmenge des Uniform Resource Identifiers (URI [BLFM05]) eingesetzt. Die Multicast-URIs ist wie folgt aufgebaut:

```
ham-scheme:namespace:group@instantiation:port/sec-credentials
```

Als *ham-scheme* wird die Abkürzung *ham* verwendet, welche für *hybrid adaptiv multicast* steht und bezeichnet den Namensraum-Präfix der Multicast-URI. Der *namespace* bezeichnet den Namensraum, zum Beispiel *ip*, *sip* oder *scribe*. Enthält die URI keine syntaktischen Informationen, kann *opaque* als Schema verwendet werden. *Group* identifiziert die Multicast-Gruppe und kann abhängig vom Schema technologiespezifische Informationen enthalten. Die weiteren Parameter sind optional. *Instantiation* bezeichnet die Entität, welche die Instanz der Gruppe generiert. Zum Beispiel lässt sich mit der Instanzierung eine SSM Quelle darstellen. Der *port* spezifiziert den Transport-Endpunkt und mit der Hilfe von *sec-credentials* können Sicherheitsmerkmale realisiert werden, wie zum Beispiel das Autorisieren von Zugriffen auf die Multicast-Gruppe.

Die Verwendung von URIs abstrahiert die Identifikation von der verwendeten Multicast-Technologie der Gruppen und erlaubt eine Unterscheidung zwischen Gruppenname und Gruppenadresse. Der Gruppenname entspricht der URI und die Gruppenadresse ist eine technologiespezifische Adresse mit einem Gruppennamen als Urbild, weshalb die Gruppenadresse nur im Kontext der Domäne gültig ist. Die Abbildung zwischen Gruppenname und Gruppenadresse folgt dabei dem Konzept des *späten Bindens*, wonach erst zur Laufzeit der Gruppenname auf eine Adresse einer lokal eingesetzten Technologie abgebildet wird.

Die Abbildung zwischen Gruppennamen und Gruppenadresse wird an mehreren Stellen in einem hybriden Multicast-Netzwerk benötigt. Zum Beispiel werden in einem einfachen Szenario eine IPv4- und IPv6-Domäne über einen IMG miteinander verbunden. In der IPv4-Domäne befindet sich ein Sender, der Daten an die Gruppe *ham:opaque:News.com:5500* sendet und von einem Host in der IPv6-Domäne abonniert wird. Zunächst übersetzt der Sender den Gruppenname in eine IPv4-Adresse, über welche die Gruppendaten verschickt werden. Der IMG empfängt anschließend die Gruppendaten und muss die IPv4-Adresse wieder zurück auf den global identifizierbaren Gruppenname abbilden. Daraufhin routet der IMG die Gruppendaten in die IPv6-Domäne weiter, in der die Gruppe wieder eine technologiespezifische Adresse abgebildet werden muss.

Eine besondere Art der Abbildung stellt die kanonische Abbildung da. Sie bettet technologiespezifische Adressen, zum Beispiel die IPv4-Adresse 239.99.99.99 mit dem Port 5000, in eine URI ein (*ham:ip:239.99.99.99:5000*). Das Verfahren ist zustandslos, invertierbar und erlaubt eine Kompatibilität zu Hosts, die keine *Common Multicast API* verwenden. Native Hosts können auf diese Weise Daten an eine Gruppenadresse senden, welche von IMGs in eine URI eingebettet werden, wodurch sie global identifizierbar wird und bei Bedarf geroutet werden kann.

Für eine technologieübergreifende Kommunikation im hybriden Multicast-Netzwerk müssen folgende Konzepte ausgearbeitet und umgesetzt werden: Es wird ein Konzept benötigt, das beliebige URIs auf Gruppenadressen abbildet und gleichzeitig auch Umkehrabbildungen für IMGs zur Verfügung stellt, aber trotzdem native Hosts nicht ausschließt. Weiterhin wird ein Konzept benötigt, mit dessen Hilfe IMGs die Gruppenzustände seiner Domänen lernen und verwalten können. Die Gruppenzustände müssen anschließend unter Beachtung der Skalierbarkeit zwischen den IMGs kommuniziert werden. Darauf aufbauend wird ein domänenübergreifendes Routingprotokoll benötigt, welches die Gruppendaten zwischen Sender und Empfänger beliebiger Domänen verteilt.

2.2 Klassifizierung der Teilkomponenten

Ein hybrides Multicast-Netzwerk lässt sich in zwei Hauptkomponenten unterteilen, der *Intra-Domain* Komponente, welche alle Aufgaben umfasst, die innerhalb einer Domäne anfallen, und der *Inter-Domain* Komponente, welche die Interaktion zwischen den Domänen übernimmt.

Intra-Domain

Die Intra-Domain Ebene definiert das Verhalten von Multicast-Hosts und IMGs einer Multicast-Technologie, welche an einen Namensraum gebunden ist. Sie lässt sich in folgende Aufgabebereiche unterteilen:

- **Datenkommunikation:** Es wird für alle Domänen-Teilnehmer ein einheitliches Abbildungskonzept von Gruppenname zu Gruppenadresse für die jeweils verwendete Multicast-Technologie zur Verfügung gestellt. Zusätzlich können native Hosts über einen Kompatibilitätsmodus mit der Domäne interagieren.
- **Gruppenverwaltung:** IMGs verwalten die Gruppenmitgliedschaften ihrer Domänen. Dafür werden Gruppensignalisierungen der lokalen Hosts ausgewertet. Je nach verwendeter Multicast-Technologie können die dafür erforderlichen Join- und Source-Register-Nachrichten bereits vorhanden sein oder müssen über ein Zusatzprotokoll nachgebildet werden. Darüber hinaus werden den IMGs die Umkehrabbildungen von Gruppenadresse zu Gruppennamen bereitgestellt.

Inter-Domain

Die Inter-Domain Ebene definiert den Vorgang des Datenaustausches zwischen Sender und Empfänger beliebiger Domänen und ermöglicht eine domänenübergreifende Kommunikation. Die Domänen werden über IMGs verbunden und sind für das Routen der Gruppendaten verantwortlich. Damit ein Routen von Gruppendaten zwischen den Domänen ermöglicht werden kann, müssen zunächst die Sender und Empfänger auf Netzwerkebene mit Hilfe eines Rendezvous-Prozesses gekoppelt werden. Das Koppeln geschieht dabei durch das zueinander zuordnen von Join- und Source-Register Nachrichten, welche zwischen den IMGs kommuniziert werden. Untersucht und vorgestellt wird ein Rendezvous-Prozess der den Austausch der Gruppensignalisierungen koordiniert und ein Protokoll, welches das Routen der Gruppendaten übernimmt.

3 Intra-Domain Multicast Management

3.1 Datenkommunikation

Mithilfe der Intra-Domain Datenkommunikation wird für alle Domänen-Teilnehmer eine einheitliche Abbildung von Gruppennamen auf Gruppenadressen zur Verfügung gestellt. Diese Abbildung benötigen Hosts und IMGs zum Versenden von Gruppendaten. Bei dem Empfang der Gruppendaten wird hingegen die Umkehrabbildung benötigt, welche für Hosts trivial ist, da die Gruppe vorher auf Basis des Gruppennamens abonniert wurde und der Name dadurch bereits bekannt ist. Allerdings müssen IMGs die Umkehrabbildung explizit erlernen oder aus den Gruppennamen ableiten. Weiterhin wird die Abbildung auch beim Abonnieren und Registrieren der Gruppen benötigt.

3.1.1 Konzept

In diesem Abschnitt werden mögliche Abbildungskonzepte untersucht und kategorisiert. Es lassen sich zustandsbehaftete von zustandslosen Ansätzen unterscheiden. Weiterhin unterscheiden sich die Ansätze darin, ob sie Umkehrabbildungen für IMGs zur Verfügung stellen oder ob ein ergänzendes Verfahren benötigt wird. Die Effizienz und der Implementierungsaufwand ist dabei abhängig von der verwendeten Multicast-Technologie der Domäne.

- **Zustandsbehaftet**

- **Zentrale Lösung:** Es könnte in einer Domäne ein zentraler Abbildungsdienst zur Verfügung gestellt werden ähnlich wie DHCP zur Interface Konfiguration. Dieser Dienst beantwortet Fragen zu Abbildungen von Hosts und IMGs und sorgt dafür, dass dieselben Abbildungen innerhalb einer Domäne verwendet würden. Diese Lösung ist auf jede Multicast-Technologie anwendbar und stellt auch Umkehrabbildungen, welche von IMGs benötigt werden, zur Verfügung. Allerdings skaliert sie im besten Fall linear und erhöht die Latenz zum Beispiel beim Abonnieren von Gruppendaten, da zunächst die technologiespezifische Adresse erfragt werden muss.

- **Verteilte Multicast Lösung:** Es könnte unter allen Domänen-Teilnehmern ein dezentrales Abstimmungsverfahren eingeleitet werden, falls eine Abbildung benötigt würde. Die Abstimmung kann dabei auf Basis der verwendeten Multicast-Technologie in einer vorher definierten und wohlbekanntem Gruppe geschehen. Hosts können dort vorhandene Abbildungen mitteilen, Vorschläge einbringen oder potenzielle Kollisionen melden. Das Verfahren hat zum einen den Nachteil, dass mit einer größeren Latenz bei der Bestimmung einer Abbildung gerechnet werden muss zum anderen, dass es aufgrund des zusätzlichen Kommunikationsaufwands nur für kleine Netze geeignet ist. Allerdings hat es gegenüber der zentralen Lösung den Vorteil, dass nicht explizit ein Dienst gestartet und bekannt gegeben werden muss, von welchem das Kommunizieren abhängt, die Multicast-Technologie selbst nutzt und durch die Dezentralisierung eine höhere Ausfallsicherheit besitzt.
- **Zustandslos**
 - **Hashfunktion:** Das Abbilden kann implizit gelöst werden, indem zum Beispiel mit einer vorher verabredeten Hashfunktion ein Gruppenname auf eine Gruppenadresse abgebildet wird. Dies hat den Vorteil, dass die zugehörige Gruppenadresse des Gruppennamens sehr schnell selbst ermittelt werden kann. Allerdings ist das Verfahren zum Beispiel nicht in einer IPv4-Domäne anwendbar, da aufgrund der niedrigen Kardinalität des IPv4-Multicast Namensraum die Kollisionswahrscheinlichkeit der Hashfunktion sehr hoch ist. Eine Kollision zweier Gruppennamen auf Technologieebene kann zu einem ungewollten Versenden von Gruppendaten führen, welche die Netzwerkinfrastruktur und Hosts belasten. Außerdem stellt dieses Verfahren keine Umkehrabbildung für IMGs zur Verfügung, weshalb ein zusätzliches Verfahren benötigt wird, um eine Zuordnung der Gruppendaten auf Gruppennamen zu ermöglichen.
 - **Kanonische Abbildung:** Mithilfe der kanonischen Abbildung, welche technologiespezifische Adressen in URIs einbettet, können native Multicast-Hosts in ein hybrides Multicast-Netzwerk eingebunden und parallel zu anderen Abbildungsverfahren genutzt werden. Anhand dieser eingebetteten URIs können die Gruppe domänenübergreifend identifiziert und geroutet werden. Werden die URIs in eine andere IPv4-Domäne geroutet, können dort die technologiespezifischen Inhalte genutzt werden, um eine Abbildungen zu erstellen. Dabei muss beachtet werden, dass die Abbildungen nicht mit Abbildungen anderer Verfahren kollidieren. Werden die zugehörigen Gruppendaten außerhalb einer IP-Domäne geroutet, zum Beispiel

in ein Overlay, werden die URIs wie jede andere behandelt und auf eine overlay-spezifische Adresse abgebildet. Allerdings ist die kanonische Abbildung nur eine Ergänzung zu anderen Abbildungsverfahren, da nicht jede beliebige Multicast-URI unterstützt wird.

Neben den allgemeinen Abbildungsverfahren für Standard URIs wurde auch ein Konzept für ASM- und selektiver Broadcast-URIs in Kapitel 5 ausgearbeitet.

3.1.2 Umsetzung

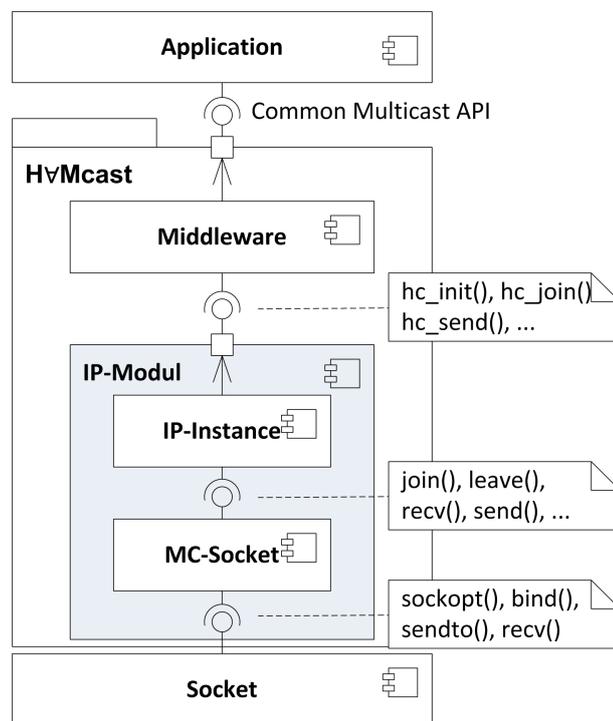


Abbildung 3.1: Komponentendiagramm von HVMcast

Umgesetzt wurde das *Hashfunktions-Konzept* mit einer zusätzlichen Unterstützung von kanonischen URIs für IPv4- und IPv6-Multicast. Dafür wurde das IP-Module der Multiservice Architektur HVMcast überarbeitet und erweitert.

Wie in Abbildung 3.1 zu sehen kapselt in HVMcast das IP-Module alle technologiespezifischen Aufgaben für IP-Multicast, wie zum Beispiel das Abonnieren von Gruppen oder Versenden von Gruppendaten. Das IP-Modul instanziiert für jedes zu verwendende Netzwerk-Interface eine

Klasse *IP-Instance*, welche die Aufgaben und Ereignisse unabhängig voneinander verarbeiten. Die Klasse *IP-Instance* initialisiert und startet eine asynchrone Empfangsschleife, welche Ereignisse aus der *HVMcast-Middleware*, wie das Abonnieren oder das Verlassen von Gruppen, entgegennimmt. Bei der Subskription einer Gruppe wird ein Multicast-Socket erstellt, welches an einen Port gebunden wird und die Gruppe abonniert. Anschließend werden von diesem Socket empfangene Gruppendaten über eine Callback-Funktion an die Middleware weitergereicht. Wenn die Gruppe durch eine Anwendung verlassen wird, wird der Gruppenzustand aufgeräumt und das Socket geschlossen ¹. Das Senden an Gruppen geschieht asynchron auf einem weiteren Socket und wird wieder durch eine Anwendung ausgelöst. Bisher wurden von der Klasse *IP-Instance* nur kanonische URIs mit einem IP-Schema als Gruppe akzeptiert ². Das *IP-Module* wurde jetzt durch das Hashfunktions-Konzept erweitert und unterstützt nun jede beliebige gültige Multicast-URIs.

Es wurde eine Methode *tech_map()* implementiert, die beide Abbildungskonzepte umsetzt. Sie wird beim Senden, Abonnieren und Verlassen einer Gruppe benötigt und bildet die von der Middleware übergebenen URIs auf IPv6 Multicast-Adressen ab. Beim Abonnieren werden zusätzlich die berechneten Abbildungen gespeichert und stehen dann beim Empfangen von Daten für die Umkehrabbildung zur Verfügung. *tech_map()* akzeptiert jede gültige URI. Handelt es sich um eine technologiespezifische URI mit einem IP-Schema und einer IPv6-Adresse als Gruppe, wird die kanonische Abbildung verwendet. Kann die kanonische Abbildung nicht verwendet werden, wird die URI mit dem SHA1 [EJ01] Algorithmus gehasht und in die Form einer IPv6 Multicast-Adresse gebracht. Die kanonische Abbildung kann zurzeit nicht verwendet werden, wenn die URI ein technologiespezifische Instanziierung enthält, denn IMGs können die Gruppendaten nur unter ihrer eigenen Source-Adresse weiterleiten. Die vom *IP-Module* verwendeten Multicast-Sockets lassen keine Veränderung der Absenderadresse zu.

Gehasht wird von der URI der Teilstring *ham:<scheme>:<group>* und falls eine Instanziierung vorhanden ist der String *ham:<scheme>:<group>@<instantiation>*, wie in Abbildung 3.2 zu sehen. Das Schema muss mitgehasht werden da die Gruppe laut *Common Multicast API* [WSV13] nur in Zusammenhang mit dem Schema einzigartig ist. Der Port und die *sec-credentials* dürfen

¹Der Gruppenzustand ist aufgrund der Fehlertoleranz ein Softstate, welcher aber im IMG verwaltet werden muss, da nur der IMG selbst entscheiden kann, ob Gruppen noch benötigt werden. Die Middleware und das *IP-Modul* sind durch die *Common Multicast-API* von der Routinglogik und den Protokollen der Gruppenverwaltung entkoppelt und können somit diese Entscheidung nicht übernehmen. Beendet sich der IMG unerwartet muss auch die Middleware neu gestartet werden, um die Gruppenzustände aufzuräumen.

²Im Kontext eines IP-Schemas können anstatt IP-Adressen auch DNS-Namen verwendet werden, welche durch die Methode *getaddrinfo()* aufgelöst werden.

nicht mitgehasht werden, da sie nicht zur Identifikation der Gruppe geeignet sind. Die Umformung des Hashwertes erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird der Hashwert nach 128Bits abgeschnitten und anschließend die ersten 16Bits durch *0xFF15* [PSK06] ersetzt. *0xFF* gibt an, dass es eine Multicast-Adresse ist und *0x15* bedeutet, dass es sich um eine flüchtige Adresse aus dem *site-local scope* handelt.

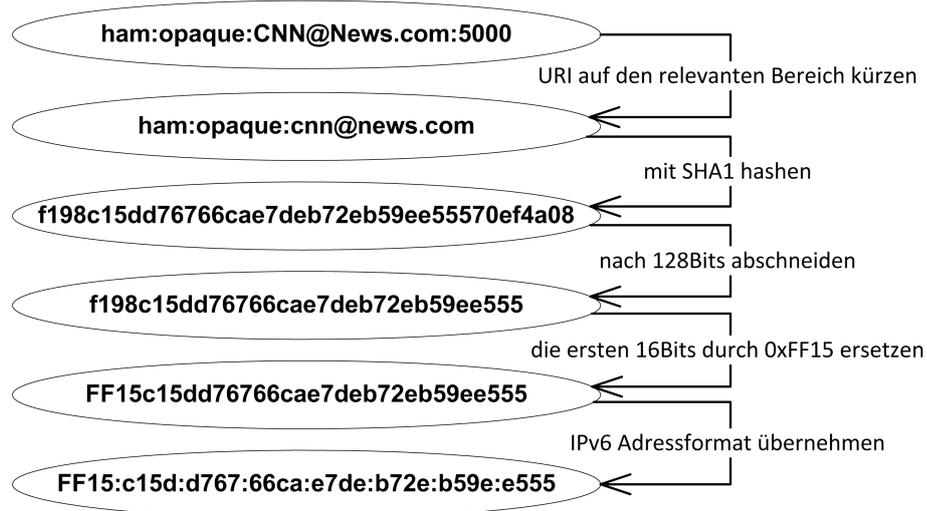


Abbildung 3.2: Schrittweise Umformung einer URI zu einer IPv6-Adresse

3.2 Gruppenverwaltung

Die IMGs verwalten die Gruppenmitgliedschaften ihrer Domänen. Dies wird als Vorbereitung für das Inter-Domain Routing genutzt, wo auf Basis der Gruppenzustände Routingentscheidungen von IMGs getroffen werden. Es muss für jede Domäne bekannt sein, welche Gruppen abonniert wurden und für welche Gruppen Sender existieren. Diese Gruppenzustände werden in einer Gruppenmanagement-Datenbank als Softstate erfasst und verwaltet. Als Softstate werden Zustände bezeichnet, die mit einer Verfallszeit versehen werden, um den Zustand zum Beispiel im Fall eines Fehlers nach einer vorgegebenen Zeit abzubauen. Weiterhin benötigen IMGs die Umkehrabbildungen, um empfangene Gruppendaten einer globalen Gruppe zuordnen zu können.

3.2.1 Konzept

Für die Gruppenverwaltung des IMGs müssen die Gruppenzustände erfasst werden. Dies ist zum Beispiel möglich, indem der IMG auf die Gruppenverwaltungen der einzelnen Multicast-Technologien zugreift, wodurch technologiespezifische Join- und Source-Register-Nachrichten mitgehört werden können. Ob Gruppenverwaltungsnachrichten und neue Quellen an einer zentralen Stelle mitgehört werden können, ist abhängig von der verwendeten Multicast-Technologie der Domäne.

- **Ohne Routing:**

- Ein flaches Netz besitzt einen Multicast-Querier [CDK⁺02] mit einer Gruppenverwaltung. Hat ein IMG Zugriff auf die Gruppenverwaltung oder stellt er selber diesen Querier, sind ihm alle Gruppenzustände bekannt.

- **Routing auf statischen Bäumen:**

- Bei einem Multicast-Verteilbaum bestehend aus Multicast-Proxies [FHHS06], wie auch in einem BIDIR-PIM Netzwerk [HKSV07] werden alle Gruppenmitgliedschaftsinformationen und Gruppendaten der Subnetzwerke zur Wurzel aggregiert und sind dort wie in einem flachen Netz verfügbar.

- **Dynamisches Routing:**

- **PIM-SM:** Ein PIM-SM Netzwerk [SLM06] wird von einem Rendezvous Point (RP) initiiert und verwaltet, wobei die PIM-Router einer PIM-Domäne alle Signalisierungen der Gruppenteilnehmer dorthin senden. Dadurch sind dem RP sowohl

die Sender- als auch Empfängerinformationen bekannt und können vom IMG verwendet werden.

- **PIM-SSM:** PIM-SSM [HC06] ist eine PIM-SM Spezialisierung für Source-Specific Multicast, welche allerdings keinen RP benötigt. Abonniert ein Host eine Multicast-Gruppe in der Form (S,G), kann der PIM-Router desselben lokalen Netzes, ohne dem RP eine Register-Nachricht zu schicken, sofort entlang des kürzeren Weges eine Join-Nachricht absetzen. Dies führt dazu, dass die Gruppenmitgliedschaften an keiner zentralen Stelle erfasst werden. Um PIM-SSM mit HVMcast zu verbinden, müssen Gruppenmitgliedschafts-Informationen dezentral gesammelt werden. Dies könnten IMG-Sonden [Wäh08] übernehmen, die in jedem lokalem Netz die Gruppenmitgliedschaften mithört und sie an den zuständigen IMG weiterleitet.
- **DVMRP:** DVMRP-Netzwerke [WPD88] werden für eine neue Gruppe oder eine neue Quelle mit Gruppendaten geflutet, wodurch das Entdecken der Quellen kein Problem darstellt. Nicht möglich ist hingegen das Entdecken von Abonnenten, da dies dezentral durch ein Flutens ein des Netzwerkes geschieht. So müsste dies wieder mit Sonden in den lokalen Netzwerken geschehen. Allerdings ist DVMRP inzwischen ungebräuchlich und wird nur aufgrund der Vollständigkeit erwähnt.
- **Overlay Multicast:** Overlays wie Scribe [RKCD01] oder BIDIR-SAM [WSW11] abstrahieren die Netzwerktopologie mit Distributed Hash Tables (DHT) und verfolgen das Konzept von gleichgestellten Teilnehmern. Ein solches dezentrales System bietet keine Möglichkeit, Gruppenzustände an einer zentralen Stelle zu erfassen. ALM-Netzwerke müssen für diesen Sonderfall, den Bedarf einer zentralen Sammelstelle von Gruppenzuständen, explizit angepasst werden. Zum Beispiel werden in dem Overlay Scribe gruppenspezifische Verteilbäume aufgebaut, bei dem ein Host die Funktion als RP übernimmt. Diese RPs könnten IMGs über eine separate Multicast-Gruppe mit Updates über ihren Gruppenzustand informieren.

Neben dem Erfassen der Gruppenzustände in einer Domäne, benötigen IMGs auch Umkehrabbildungen, um die technologiespezifischen Gruppenzustände global zuordnen zu können. Wird, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, eine Hashfunktion zur Abbildung des Gruppennamens auf eine Gruppenadresse verwendet, muss ein zusätzliches Verfahren für die Umkehrabbildung bereitgestellt werden. Ein solches Verfahren könnte wie folgt aussehen: Immer wenn Hosts Gruppen abonnieren oder Gruppendaten verschicken, senden sie den zugehörigen Gruppennamen an eine vorher definierte Gruppe. Diese wohlbekannt Gruppe wird von allen IMGs abonniert und sie können aus den empfangenen Gruppennamen eine Lookup-Tabelle für die

Umkehrabbildung aufbauen. Wird ein solches Verfahren parallel zu dem kanonischen Abbildungskonzept verwendet, muss zusätzlich unterschieden werden, welches Verfahren auf die Gruppenadressen angewendet werden soll. Zum Beispiel könnte das kanonische Abbildungsverfahren als Rückfall-Mechanismus genutzt werden, falls keine andere Umkehrabbildung zur Verfügung steht. Alternativ könnten die Gruppenadressen für die kanonische Abbildung statisch vorkonfiguriert werden.

3.2.2 Umsetzung

Umgesetzt wurden zwei Konzepte. Die erste Umsetzung implementiert ein kleines Protokoll zwischen Hosts und IMGs, mit dessen Hilfe alle IMGs der Domäne periodisch mit Abbildungs-Informationen versorgt werden. Die zweite Umsetzung unterstützt kanonische URIs in flachen Netzwerken und implementiert einen Multicast-Querier im IP-Modul, um Zugriff auf die Gruppenverwaltung und die gesendeten Gruppendaten des Netzwerks zu erhalten.

IMG-Updating Protokoll

Das Protokoll aktualisiert alle IMGs der Domäne kontinuierlich mit den aktuellen Gruppenzuständen des Netzwerkes, stellt gleichzeitig eine Umkehrabbildung zur Verfügung und ist mit jeder Multicast-Technologie umsetzbar. Hosts versenden Join- und Source-Register-Nachrichten mit den von ihnen verwendeten Gruppennamen an eine wohlbekannt Gruppe. Diese Konfigurationsgruppe wird von den IMGs der Domäne abonniert. Empfängt ein IMG eine Join- oder Source-Register-Nachricht, bildet er den zugehörigen Gruppennamen mit dem in der Domäne verwendeten Verfahren auf eine Gruppenadresse ab und speichert das Tupel in einer Lookup-Tabelle. Auf diese Weise können IMGs empfangene Gruppendaten durch einen Blick in die Lookup-Tabelle global zuordnen.

Robustheit und Toleranz gegenüber Fehlern erlangt das Protokoll durch Maßnahmen ähnlich dem *Multicast Listener Discovery* (MLD) Protokoll [DFH99], welches die gleiche Problemstellung zu lösen hat. Die Einträge der Lookup-Tabelle werden als Softstate behandelt. Dadurch werden sie nach einer vorgegebenen Verfallszeit gelöscht. Dies verhindert ein kontinuierliches Füllen der Tabelle. Das führt allerdings dazu, dass die Tabelleneinträge regelmäßig aktualisiert werden müssen, indem Hosts die Join- und Source-Register-Nachrichten erneut versenden³. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass eine vollständige und fehlerfreie Übermittlung

³Auf die Komplementär-Nachrichten Leave- und Source-Deregister wird in diesem Protokoll verzichtet, da es die Komplexität deutlich erhöhen würde. Denn es würden dadurch, wie beim MLD Protokoll, Rückfragen von IMGs

von Gruppensignalisierungen nicht garantiert werden kann. Um die Verlustwahrscheinlichkeit der Join- oder der Source-Register-Nachricht zu verringern, werden Nachrichten für eine Redundanz dupliziert und zeitversetzt verschickt. Diese Form der Redundanz wird nur bei der initialen Signalisierung benötigt, weiterführende periodische Aktualisierungen werden zeitlich so verteilt, dass die Lebenszeit der Einträge in der Lookup-Tabelle um ein vielfaches größer sind als der Aktualisierungszyklus. Gehen dann einzelne Join- oder Source-Register-Nachrichten verloren, wird die Nachricht im nächsten Zyklus wiederholt, ohne dass der IMG den Eintrag löscht. Die genauen Zeiten, Anzahl Duplikate und Aktualisierungszyklen pro Lebenszeit eines Eintrags können an das MLD angelehnt werden, welches die gleiche Problemstellung zu lösen hat. Zum Beispiel wird eine Zeit von 125 Sekunden für ein Aktualisierungszyklus (*Query Interval*) vorgeschlagen und 2 Nachrichtenduplikate (*Robustness Variable*), welche im Abstand von einer Sekunde (*Unsolicited Report Interval*) versendet werden.

Kanonische URIs

Wenn native Hosts an einem hybriden Multicast-Netzwerk partizipieren wollen, haben sie zwei Möglichkeiten. Entweder die Abbildungen zwischen Gruppennamen und Gruppenadresse werden statisch im IMG vorkonfiguriert, auf diese Weise kann jede beliebige URI verwendet werden oder sie verwenden die Multicast-Technologie auf herkömmliche Weise und sind dann allerdings auf kanonische URIs beschränkt. Um letzteres zu ermöglichen, wurde im IP-Module ein Multicast-Querier implementiert, der einen Zugriff auf den Gruppenzustand der Domäne ermöglicht. Wird zum Beispiel die Gruppe *239.99.99.99* von einem Host abonniert, erfährt das IP-Modul dies und gleicht die Adresse mit der Gruppenverwaltung des IMG-Updating Protokolls ab. Ist die Adresse nicht vorhanden, handelt es sich um einen nativen Host und bildet die Adresse für eine domänenübergreifende Verwendung auf eine kanonische Adresse ab. Aufgrund der Verwendung eines Multicast-Queriers ist dies nur in einem flachen IP-Netzwerk möglich.

notwendig, welche prüfen müssten ob zum Beispiel weitere Hosts an den jeweiligen Gruppendaten interessiert sind, da keine Informationen über einzelne Hosts aus Gründen der Skalierbarkeit gespeichert werden können.

4 Inter-Domain Routing

Das Inter-Domain Routing übernimmt zwei Aufgaben. Es arrangiert einen Rendezvous-Prozess zwischen Sendern und Empfängern über Domängrenzen hinweg und es übernimmt das technologie- und domänenübergreifende Routen der Gruppendaten. Der Rendezvous-Prozess wird aufgrund des Publish/Subscribe Paradigmas benötigt, auf welchem Multicast beruht. Es entkoppelt Sender und Empfänger räumlich und ermöglicht eine Zusammenführung auf Netzwerkebene durch Join- und Source-Register Nachrichten. Das Routen der Gruppendaten übernehmen die IMGs, welche die Domänen verbinden und zwischen den Technologien übersetzen. Die Routingentscheidungen werden dabei auf Basis der Gruppenmanagement-Datenbank getroffen, welche die Join- und Source-Register Nachrichten einer Domäne verwaltet (Kapitel 3.2).

Um Multicast-Inseln miteinander zu verbinden, können diese über IMGs an ein gemeinsames *Application Layer Multicast* Netzwerk (ALM) angebunden werden. ALMs haben den Vorteil, dass sie unabhängig von den unterliegenden Netzwerkschichten arbeiten und auch funktionieren, wenn zum Beispiel IP-Multicast im Netzwerk nicht unterstützt wird. Dadurch eignen sie sich besonders für die Integration von Multicast-Inseln, die über ein multicast-agnostisches Internet miteinander verbunden sind. Das ALM Netzwerk wird parallel zum Routen der Gruppendaten auch als virtueller RP genutzt, welches in folgenden Abschnitt vorgestellt wird.

4.1 Rendezvous Konzept

Das IMG-Updating Protokoll (Kapitel 3.2.2) war darauf ausgelegt, die Join- und Source-Register-Nachrichten an eine wohlbekanntere Konfigurationsgruppe zu senden, welche von den IMGs abonniert wurden. Besteht das Overlay aber hauptsächlich aus IMGs, gleicht das Konzept einem Broadcast und führt in größeren Netzwerken zu Skalierungsproblemen. Mit Hilfe von zusätzlichen Informationen, die Multicast Overlays zur Verfügung stellen, können Join- und Source-Register-Nachrichten deutlich gezielter verteilt werden, was an Hand der folgenden Multicast Overlays Scribe [RKCD01] und BIDIR-SAM [WSW09] gezeigt wird.

Scribe implementiert ein Multicast Overlay und nutzt Pastry [RD01] zum Aufspannen des Overlay Netzwerkes. Pastry stellt eine Distributed Hash Table (DHT) unter Berücksichtigung direkter Nachbarschaftsbeziehungen bezüglich verschiedener Distanz-Metriken (Proximity Neighbor Selection - PNS), wie Hop-Count oder RTT zur Verfügung. Auf dieser Struktur erstellt Scribe gruppenspezifische Shared Trees. Der erste Host, der einer Gruppe beitrifft, muss sie zunächst erstellen. Beim Erstellen der Gruppe wird der Host in der DHT gesucht, welcher für die GruppenID zuständig ist und wird dann zum RP der Gruppe. Alle zukünftigen Join- und Leave-Nachrichten sowie die Gruppendaten werden zu diesem RP gesendet und von dort aus verteilt. Auf diese Weise verhindert Scribe eine unnötiges Fluten von Gruppensignalisierungen. BIDIR-SAM geht hingegen einen anderen Weg. Es baut zwar auf einer DHT auf, verwendet aber anstatt eines RP an der Spitze es Verteilbaums eine Prefix basierte Struktur. Dafür muss BIDIR-SAM die Gruppensignalisierungen in die Teilbäume fluten baut aber im Gegenzug einen effizienten *source-specific shortest path* Baum auf.

Darauf aufbauend kann für Overlays eine generische Optimierung des Rendezvous-Prozesses umgesetzt werden. Da ALMs ein geschlossenes System darstellen, welches neben der Netzwerktopologie auch die Hosts kontrolliert, ist es leicht möglich, die Funktionalität der Hosts zu erweitern. Zum Beispiel durch eine Funktion, mit der geprüft werden kann, ob eine Gruppe bereits existiert. Durch dieses Wissen, welches zum Beispiel in einem IP-Multicast Netzwerk nicht ohne weiteres erlangt werden kann, ist es möglich, den Rendezvous-Prozess von einem Broadcast auf ausschließlich relevante IMGs zu reduzieren. Als Optimierung werden im Overlay die Join- und Source-Register Nachrichten an eine gruppenspezifische anstatt globale Konfigurationsgruppe versendet. Dies schränkt die involvierten IMGs ein und hat folgende Auswirkungen: Haben IMGs lokale Sender oder Empfänger, abonnieren sie die zugehörige Konfigurationsgruppe, über die Join- und Source-Register-Nachrichten verteilt werden. Versendet ein IMG eine Join-Nachricht, abonniert er zusätzlich die Transportgruppe der Gruppendaten. Falls die Gruppe nicht existiert, wird sie erstellt. Versendet ein IMG zum erstenmal eine Source-Register Nachricht und die zugehörige Transportgruppe existiert bereits, kann davon ausgegangen werden, dass es Abonnenten gibt ohne explizit auf eine Join-Nachricht zu horchen. Auf diese Weise erhalten alle IMGs ohne Wartezeiten die für sie relevanten Gruppenzustände um den Preis einer zusätzlichen Verwaltungsgruppe pro Gruppe.

4.2 Routing Konzept

Das folgende Beispiel demonstriert einen Ablauf des Routings von Gruppendaten zwischen Sender und Empfänger. Abbildung 4.1 zeigt drei Multicast-Domänen, die jeweils über einen IMG an das Overlay angeschlossen sind. Domäne A enthält einen oder mehrere Sender, die Daten an die Gruppe G senden und in Domäne B und C befinden sich Empfänger die Gruppe G abonnieren. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, registrieren die Sender mit Source-Register-Nachrichten (SR) ihre Gruppendaten und die Empfänger versenden Join-Nachrichten (J), um die Gruppe zu abonnieren (Abbildung 4.2). Diese Nachrichten werden von IMGs zum Upstream aggregiert (*Aktion 1*) und Join-Nachrichten werden zusätzlich auf der Basis der jeweiligen Multicast-Technologie abonniert. Anschließend werden sowohl die Join- als auch die Source-Register-Nachrichten, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, über die zugehörige Konfigurationsgruppe an die IMGs gesendet (Abbildung 4.3). Dies hat zur Folge, dass der IMG, welcher Domäne A und das Overlay miteinander verbindet, sowohl eine Join- als auch eine Source-Register Nachricht am Up- und Downstream empfangen hat. Unter dieser Bedingung leitet der IMG die Join-Nachricht in die Domäne A weiter und abonniert dort in der jeweiligen Technologie die Gruppe (*Aktion 2*). Empfängt der IMG anschließend Gruppendaten der Gruppe G, routet er sie ins ALM (*Aktion 3*), wie in Abbildung 4.4 zu sehen. Diese Gruppendaten werden vom ALM zu den IMGs der Domäne B und C geleitet, da sie die Gruppe abonniert hatten. Daraufhin werden die Gruppendaten in die Domänen B und C geroutet (*Aktion 4*), da die Gruppe dort angefordert wurde.

Dieses Routing-Konzept bietet einige Vorteile, denn es ist zunächst sehr einfach gehalten und beinhaltet nur die drei folgenden statische Routingregeln:

1. Empfangene Join- und Source-Register-Nachrichten werden zum Upstream aggregiert.
2. Am Upstream empfangene Join-Nachrichten werden zum Downstream aggregiert, wenn am Downstream eine zugehörige Source-Register Nachricht empfangen wurde.
3. IMGs, die am Up- und Downstream jeweils Join- und Source-Register-Nachrichten empfangen haben, routen Gruppendaten jeweils in die entsprechende Richtung weiter.

Das Protokoll selbst ist zustandslos, benötigt aber den Zugriff auf die Datenbank, welche durch das Protokoll *IMG-Updating* verwaltet wird (Kapitel 3.1). Weiterhin werden die Gruppendaten nur bei unmittelbarem Bedarf von IMGs abonniert und geroutet und erlaubt dies sowohl in zweistufigen Netzwerkhierarchien als auch in mehrstufige Hierarchien. Allerdings unterstützt das Protokoll zurzeit weder Load-Balancing noch nicht hierarchische Verbinden

zwischen den Domänen, zum Beispiel ein gleichberechtigtes Peering zwischen den Domänen ¹.

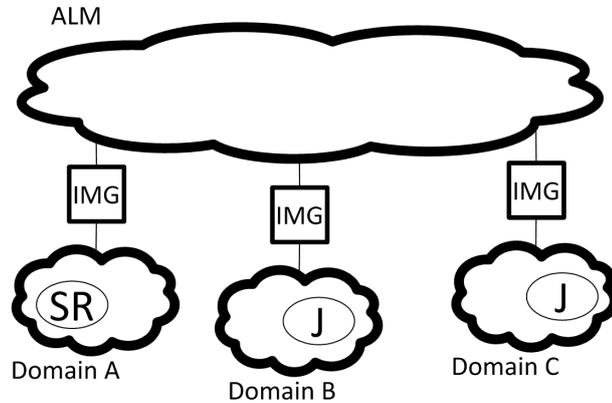


Abbildung 4.1: Die Multicast-Inseln sind verbunden über ein ALM mit einem Sender in Domäne A (Source-Register-Nachrichten - **SR**) und jeweils ein Empfänger in Domäne B und C (Join-Nachricht - **J**).

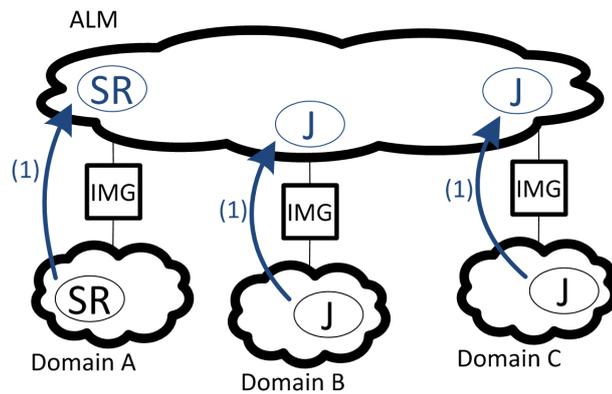


Abbildung 4.2: Sowohl die Join- als auch die Source-Register Nachricht werden zum Upstream aggregiert.

¹Ein Peering zwischen zwei Domänen ist zwar einfach umsetzbar [SWW14], allerdings dürfen die Gruppendaten aus nicht hierarchisch-verbunden Domänen nicht geroutet werden, da sonst Schleifen im Routing auftreten. Eine solche Unterscheidung der Gruppendaten ist mit diesem Konzept jedoch nicht möglich.

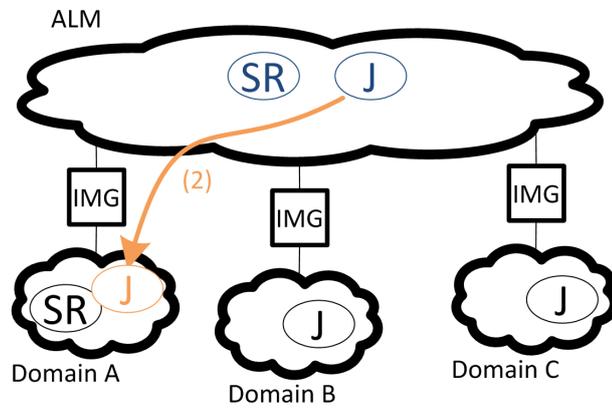


Abbildung 4.3: Die Join-Nachricht wird zu den Downstreams geleitet, welche Source-Register-Nachrichten der gleichen Gruppe empfangen haben.

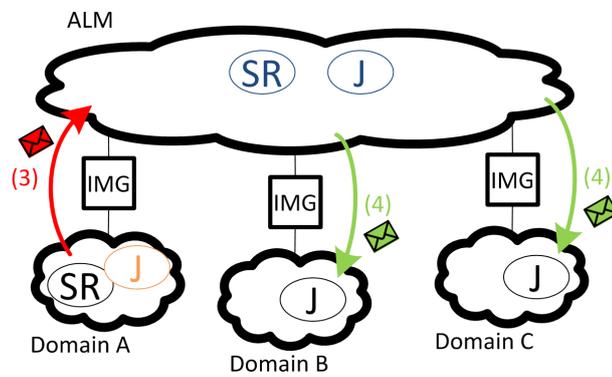


Abbildung 4.4: Wurden Join- und Source-Register-Nachrichten gegenüberliegend am IMG empfangen werden die Gruppendaten entsprechend in Richtung der versendeten Join-Nachricht geroutet.

4.3 Besonderheiten bei SSM

Source-Spezifische Multicast (SSM) ermöglicht das Zustellen von Gruppendaten ausgewählter Sender und stellt damit eine Spezialisierung von Any-Source Multicast (ASM) da. Es vereinfacht das Routen der Gruppendaten und kann durch die gezielte Auswahl der Quellen die Netzwerk-Infrastruktur entlasten. Auf der anderen Seite erschwert es die Unterstützung von mobilen Sendern, da eine feste Source-Adresse vorausgesetzt wird [SW05], [SWF10]. Bei SSM kann der Multicast-Channel (S,G) in der Form *ham:ip:G@S* kanonisch auf eine Multicast-URI abgebildet werden. Allerdings unterscheiden sich die IP-Multicast Sourcen und die Instanzen der URIs semantisch. Die IP-Multicast Source ist technologieabhängig und bezeichnet einen Host der die Quelle darstellt. Die Instanz der Multicast-URI ist hingegen technologieunabhängig, domänenübergreifend gültig, und bezeichnet eine Entität die die Gruppe generiert. Diese Entität kann zum Beispiel ein Host aber auch eine Gruppe sein. Sollen Gruppendaten einer kanonischen und Source-spezifischen Multicast-URI domänenübergreifend geroutet werden, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein. (1) Die Adresse der Quelle muss global eindeutig sein, (2) IMGs routen die Gruppendaten in die jeweilige IP-Domäne unter Verwendung der originalen Source-Adresse anstatt ihrer eigenen und (3) IMGs müssen an den Domänengrenzen (Edge) auf dem *Default-Path* positioniert sein. Dies ermöglicht Hosts domänentransparent Gruppen mit ausgewählten Quellen zu abonnieren². Abonniert ein Host die Gruppe einer Quelle, welche sich innerhalb derselben Domäne befindet, wird ein Verteilbaum zur Quelle hin aufgebaut. Befindet sich hingegen die Quelle in einer fremden Domäne, baut sich der Verteilbaum entlang des *Default-Paths* bis zum IMG hin auf. Der IMG sendet anschließend die Gruppendaten mit der originalen Source-Adresse entlang des Verteilbaums zu den Abonnenten.

²AMT [Bum14] hat zwar eine ähnliche Problemstellung, überlässt aber wie in Kapitel 4.1.5.1 beschrieben die Lösung der Implementierung.

5 ASM- und selektive Broadcast-URIs

ASM- und selektive Broadcast-URIs sind zwei Varianten von Multicast-URIs die gesondert betrachtet werden müssen. Eine ASM-URI bezeichnet eine Multicast-URI die jede Instanz einer Gruppe impliziert. Zum Beispiel impliziert die Gruppe *ham:opaque:News* oder die gleichbedeutende URI *ham:opaque:News@** sowohl die Gruppe *ham:opaque:News@CNN.com* als auch die Gruppe *ham:opaque:News@BBC.com*. Eine selektive Broadcast-URI beschränkt sich hingegen auf eine Instanz, schließt aber jede Gruppe dieser Instanz ein. Zum Beispiel beinhaltet die Gruppe *ham:opaque:*@CNN.com* die Gruppe *ham:opaque:News@CNN.com* und die Gruppe *ham:opaque:Weather@CNN.com*. Diese beiden Varianten müssen gesondert behandelt werden, da sie sich nicht mit den bisher beschriebenen Abbildungsverfahren effizient umsetzen lassen (Kapitel 3.1.2). Wird zum Beispiel innerhalb einer Domäne von einem Host die Gruppe *ham:opaque:News@CNN.com* und von einem anderen Host die Gruppe *ham:opaque:*@CNN.com* abonniert, würden diese durch die Hashfunktion auf unterschiedliche Gruppenadressen abgebildet werden und zu einer Redundanz beim Übertragen der Gruppendaten führen. Gelöst werden kann dieses Problem indem ASM- und selektive Broadcast-URIs nicht als einzelne sondern als eine Menge von URIs betrachtet werden, dessen Elemente einzeln abonniert werden. Das Versenden von Gruppendaten an eine ASM- oder selektive Broadcast-URI geschieht über eine separate Gruppe. Das folgende Beispiel beschreibt die Vorgehensweise im Detail:

Die ASM-URI *ham:opaque:News@** wird wie folgt verwendet:

- **general:** Es wird explizit die Gruppe *ham:opaque:News@** von allen Hosts abonniert, welche eine URI mit der Gruppe News verwenden.
- **abonnieren:** Es werden alle Instanzen der Gruppe News einzeln abonniert.
- **senden:** Die Gruppendaten werden an explizit die Gruppe *ham:opaque:News@** gesendet.

Die selektive Broadcast-URI *ham:opaque:*@CNN* wird wie folgt verwendet:

- **general:** Es wird explizit die Gruppe *ham:opaque:*@CNN* von allen Hosts abonniert, welche eine URI mit der Instance CNN verwenden.

- **abonnieren:** Es werden alle Gruppen der Instance CNN einzeln abonniert.
- **senden:** Es wird explizit an die Gruppe *ham:opaque:*@CNN* gesendet.

Bei diesem Verfahren müssen für das Abonnieren einer ASM- oder einer selektiven Broadcast-URI alle global verwendeten URIs mit der entsprechenden Gruppe oder Instanz einzeln abonniert werden. Diese URIs können von Hosts bei den IMGs ihrer Domänen erfragt werden, da diese den Gruppenzustand der Domäne kennen und eine Anbindung an das domänenübergreifende ALM Netzwerk haben. Weiterhin hat das Verfahren den Nachteil, dass ein Host für eine URI bis zu zwei weitere URIs (explizite ASM- und selektiven Broadcast URI) abonnieren muss, um die Funktionalität nutzen zu können.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Ausarbeitung wurden Probleme und mögliche Lösungsansätze für eine dynamische und technologieübergreifende Gruppenkommunikation auf Basis von Gruppennamen vorgestellt und anschließend die tatsächliche Umsetzung beschrieben. Im ersten Schritt wurden die Teilprobleme identifiziert und in die Aufgabenbereiche *Intra-Domain Datenkommunikation*, *Intra-Domain Gruppenverwaltung* und *Inter-Domain Routing* eingeordnet. Anschließend wurden die einzelnen Aufgaben untersucht.

Mithilfe der Intra-Domain Datenkommunikation werden allen Teilnehmern einer Domäne eine einheitliche Abbildung zwischen Gruppennamen und Gruppenadresse zur Verfügung gestellt. Die Abbildungen können zum Beispiel bei einem zentralen Dienst erfragt oder dezentral zwischen den Teilnehmer durch ein Abstimmungsverfahren ermittelt werden. Umgesetzt wurden zwei Verfahren die sich ergänzen. Zum einen ein implizites Verfahren auf Basis einer Hashfunktion und eine kanonische Abbildung mit dessen Hilfe native Hosts in das HvMcast-Netzwerk eingebunden werden können.

Bei der Gruppenverwaltung werden sowohl Sender als auch Empfänger über Join- und Source-Register-Nachrichten den IMGs der einzelnen Domänen bekannt gemacht. Auf dieser Informationsbasis werden anschließend Routingentscheidungen getroffen. Umgesetzt wurde ein Protokoll, welches IMGs periodisch über den aktuellen Gruppenzustand informiert.

Das Inter-Domain Routing arrangiert einen domänenübergreifenden Rendezvous-Prozess zwischen Sender und Empfänger. Dafür wurden die Gruppenzustände der einzelnen Domänen über gruppenspezifische Konfigurationsgruppen zwischen den IMGs kommuniziert. Darauf aufbauend wurde ein Routing Konzept ausgearbeitet, welches auf hierarchische Netzwerk-Topologien ausgelegt ist.

Im nächsten Schritt soll das Routing-Protokoll in den IMG integriert werden, welcher anschließend in einem komplexen Szenario getestet wird. Um die Funktionalität zu prüfen,

werden aber auch technologieunabhängige Debugging-Werkzeuge benötigt, wie zum Beispiel eine spezielle Form des Multicast-Pings auf Basis von Gruppennamen und ein Trace-Route-Verfahren, welche in diesem Zusammenhang mit untersucht werden können.

Literaturverzeichnis

- [BLFM05] Tim Berners-Lee, Roy T. Fielding, and Larry Masinter. Uniform Resource Identifier (URI): Generic Syntax. RFC 3986, IETF, January 2005.
- [Bum14] Gregory Bumgardner. Automatic Multicast Tunneling. Internet-Draft – work in progress 17, IETF, April 2014.
- [CDK⁺02] B. Cain, S. Deering, I. Kouvelas, B. Fenner, and A. Thyagarajan. Internet Group Management Protocol, Version 3. RFC 3376, IETF, October 2002.
- [DC90] Stephen E. Deering and David R. Cheriton. Multicast Routing in Datagram Internetworks and Extended LANs. *ACM Trans. Comput. Syst.*, 8(2):85–110, 1990.
- [DFH99] Stephen E. Deering, William C. Fenner, and Brian Haberman. Multicast Listener Discovery (MLD) for IPv6. RFC 2710, IETF, October 1999.
- [DLL⁺00] Christophe Diot, Brian Neil Levine, Bryan Lyles, Hassan Kassem, and Doug Balsensiefen. Deployment Issues for the IP Multicast Service and Architecture. *IEEE Network Magazine*, 14(1):78–88, 2000.
- [EJ01] D. Eastlake and P. Jones. US Secure Hash Algorithm 1 (SHA1). RFC 3174, IETF, September 2001.
- [FHHS06] B. Fenner, H. He, B. Haberman, and H. Sandick. Internet Group Management Protocol (IGMP) / Multicast Listener Discovery (MLD)-Based Multicast Forwarding ('IGMP/MLD Proxying'). RFC 4605, IETF, August 2006.
- [HAM14] HVMcast project, <http://www.realmv6.org/hamcast.html>, July 2014.
- [HC06] H. Holbrook and B. Cain. Source-Specific Multicast for IP. RFC 4607, IETF, August 2006.
- [HKSV07] M. Handley, I. Kouvelas, T. Speakman, and L. Vicisano. Bidirectional Protocol Independent Multicast (BIDIR-PIM). RFC 5015, IETF, October 2007.

- [JCC09] Xing Jin, Kan-Leung Cheng, and S.-H. Gary Chan. Island multicast: combining IP multicast with overlay data distribution. *IEEE Transactions on Multimedia*, 11(5):1024–1036, 2009.
- [JGFL12] Sheng Jiang, Dujuan Gu, Yu Fu, and Bing Liu. Multicast Proxy in IPv6/IPv4 Transition. Internet-Draft – work in progress 02, IETF, October 2012.
- [LBC⁺11] X. Li, C. Bao, M. Chen, H. Zhang, and J. Wu. The China Education and Research Network (CERNET) IVI Translation Design and Deployment for the IPv4/IPv6 Coexistence and Transition. RFC 6219, IETF, May 2011.
- [LWYG07] Shaofei Lu, Jianxin Wang, Guanzhong Yang, and Chao Guo. SHM: Scalable and Backbone Topology-Aware Hybrid Multicast. In *16th Intern. Conf. on Computer Communications and Networks (ICCCN'07)*, pages 699–703, August 2007.
- [MCSW12] Sebastian Meiling, Dominik Charousset, Thomas C. Schmidt, and Matthias Wählich. HAMcast – Evaluierung einer systemzentrierten Middleware-Komponente für einen universellen Multicast-Dienst im Future Internet. *Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation (PIK)*, 35(2):83–89, Mai 2012.
- [PSK06] J-S. Park, M-K. Shin, and H-J. Kim. A Method for Generating Link-Scoped IPv6 Multicast Addresses. RFC 4489, IETF, April 2006.
- [RD01] Antony Rowstron and Peter Druschel. Pastry: Scalable, distributed object location and routing for large-scale peer-to-peer systems. In *IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms (Middleware)*, volume 2218 of LNCS, pages 329–350, Berlin Heidelberg, November 2001. Springer-Verlag.
- [RKCD01] Antony Rowstron, Anne-Marie Kermarrec, Miguel Castro, and Peter Druschel. Scribe: The Design of a Large-Scale and Event Notification Infrastructure. In Jon Crowcroft and Markus Hofmann, editors, *Networked Group Communication. Third International COST264 Workshop, NGC 2001. Proceedings*, volume 2233 of LNCS, pages 30–43, Berlin Heidelberg, 2001. Springer-Verlag.
- [SLM06] P. Savola, R. Lehtonen, and D. Meyer. Protocol Independent Multicast - Sparse Mode (PIM-SM) Multicast Routing Security Issues and Enhancements. RFC 4609, IETF, October 2006.

- [SW05] Thomas C. Schmidt and Matthias Wählisch. Extending SSM to MIPv6 – Problems, Solutions and Improvements. *Computational Methods in Science and Technology*, 11(2):147–152, November 2005.
- [SWCM13] Thomas C. Schmidt, Matthias Wählisch, Dominik Charousset, and Sebastian Meiling. On Name-based Group Communication: Challenges, Concepts, and Transparent Deployment. *Computer Communications*, 36(15–16):1657–1664, Sep–Oct 2013.
- [SWF10] Thomas C. Schmidt, Matthias Wählisch, and Godred Fairhurst. Multicast Mobility in Mobile IP Version 6 (MIPv6): Problem Statement and Brief Survey. RFC 5757, IRTF, February 2010.
- [SWW14] Thomas C. Schmidt, Sebastian Wölke, and Matthias Wählisch. Peer my Proxy - A Performance Study of Peering Extensions for Multicast in Proxy Mobile IP Domains. In *Proc. of 7th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC 2014)*, Piscataway, NJ, USA, May 2014. IEEE Press.
- [VASF10] Stig Venaas, Hitoshi Asaeda, Shinsuke SUZUKI, and Tomohiro Fujisaki. An IPv4 - IPv6 multicast translator. Internet-Draft – work in progress 02, IETF, December 2010.
- [VLB11] Stig Venaas, Xing Li, and Congxiao Bao. Framework for IPv4/IPv6 Multicast Translation. Internet-Draft – work in progress 03, IETF, June 2011.
- [Wäh08] Matthias Wählisch. Scalable Adaptive Group Communication on Bi-directional Shared Prefix Trees. Technical Report TR-B-08-14, Freie Universität Berlin, Department of Mathematics and Computer Science, Berlin, September 2008.
- [WPD88] D. Waitzman, C. Partridge, and S. Deering. Distance Vector Multicast Routing Protocol. RFC 1075, IETF, November 1988.
- [WS07] Matthias Wählisch and Thomas C. Schmidt. Between Underlay and Overlay: On Deployable, Efficient, Mobility-agnostic Group Communication Services. *Internet Research*, 17(5):519–534, November 2007.
- [WSV13] M. Waehlich, T. Schmidt, and S. Venaas. A Common API for Transparent Hybrid Multicast. RFC 7046, IETF, December 2013.

- [WSW09] Matthias Wählisch, Thomas C. Schmidt, and Georg Wittenburg. BIDIR-SAM: Large-Scale Content Distribution in Structured Overlay Networks. In Mohamed Younis and Chun Tung Chou, editors, *Proc. of the 34th IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN)*, pages 372–375, Piscataway, NJ, USA, October 2009. IEEE Press.
- [WSW11] Matthias Wählisch, Thomas C. Schmidt, and Georg Wittenburg. On Predictable Large-Scale Data Delivery in Prefix-based Virtualized Content Networks. *Computer Networks*, 55(18):4086–4100, Dec. 2011.
- [ZJZ02] Beichuan Zhang, S. Jamin, and Lixia Zhang. Host multicast: a framework for delivering multicast to end users. In *INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 3, pages 1366–1375, June 2002.
- [ZWJ⁺06] Beichuan Zhang, Wenjie Wang, Sugih Jamin, Daniel Massey, and Lixia Zhang. Universal IP multicast delivery. *Computer Networks*, 50(6):781–806, 2006.