



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Mapping of group names to addresses in hybrid multicast

Sebastian Wölke

Ausarbeitung AW1

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	H\forallMcast	2
2.1	Routing und Translation	6
3	Adressen- und Namensmapping in H\forallMcast	7
3.1	ID-Locator Mapping	7
3.2	Mapping-Funktionen	8
3.3	Hashfunktionen	9
3.4	Das SSM Problem	10
4	Zusammenfassung und Ausblick	12

1 Einleitung

Anwendungen und Dienste wie Videokonferenzen, Internet Radio, IPTV und soziale Netze basieren auf Gruppenkommunikationen. Es werden dieselben Daten zu mehreren Empfängern gesendet. Eine effiziente und skalierbare Gruppenkommunikation ist Multicast, welches darauf ausgelegt ist, redundanten Datenverkehr zu vermeiden. Da allerdings die meisten Internet Service Provider (ISP) Multicast nicht aktiviert haben, existieren häufig nur lokale Multicast-Inseln mit den unterschiedlichsten Multicast-Technologien. Dies erschwert den Einsatz von Multicast, weshalb es kaum genutzt wird und so für ISPs auch keine Anreiz gibt Multicast zu aktivieren. Eine Lösung für diesen Teufelskreis bietet das Projekt HVMcast (Hybrid Adaptive Mobile Multicast) an. HVMcast ist eine Multi-Service Architektur, welche Gateways zur Verfügung stellt, die Multicast-Inseln technologieübergreifend miteinander verbinden. Außerdem arbeitet es mit einem abstrakten Namensschema, welches eine eindeutige globale Identifizierung von Multicast Gruppen ermöglicht. Dies erlaubt zum Beispiel, mobilen Endgeräten transparente Handover zwischen heterogenen Multicast-Netzwerken. Das abstrakte Namensschema erfordert allerdings eine Abbildung von dem Namen der Gruppe zu einer Adresse der Multicast-Technologie, wie es auch zum Beispiel bei der virtuellen Speicherverwaltung bei Betriebssystemen notwendig ist.

Ziel der Ausarbeitung ist es, das notwendige Mapping zwischen den Namen der Multicast-Gruppen und Adressen der jeweiligen Multicast-Technologie im Rahmen des HVMcast Projektes vorzustellen. Es wird gezeigt, an welchen Stellen im HVMcast-Netzwerk das Mapping benötigt wird. Außerdem werden mögliche Mapping-Verfahren vorgestellt und miteinander verglichen.

Gliederung der Ausarbeitung

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt: Im zweiten Kapitel wird das Projekt HVMcast vorgestellt. Es werden in diesem Zusammenhang die Grundlagen und der Aufbau des HVMcast-Prototypen beschrieben. Anschließend wird in Kapitel 3 der Kern dieser Ausarbeitung mit aktuellen Ideen und vorhanden Problemen dargestellt. Abschließend wird die Ausarbeitung kurz zusammengefasst und ein Ausblick für das weitere Vorgehen aufgezeigt.

2 HVMcast

Multicast gibt es für den verschiedensten Technologien und in verschiedenen Varianten. Allerdings lassen sich Gruppendaten im Internet häufig nur auf Anwendungsebene verteilen, da lokale Multicast-Inseln mit den unterschiedlichsten Multicast-Technologien, wie zum Beispiel IPv4 Multicast, IPv6 Multicast und verschiedene Multicast-Technologien auf dem Overlay, existieren. Diese Technologien lassen sich wiederum zwischen verschiedene Varianten unterscheiden, wie zum Beispiel Any Source Multicast (ASM) und Source Specific Multicast (SSM). HVMcast [MCSW10] hat das Ziel, Multicast Inseln miteinander zu verbinden und die Technologien und Varianten zu integrieren.

Um den Zugriff auf den technologieübergreifenden Service zu ermöglichen, implementiert HVMcast eine *Common Multicast API* [WSV12]. Diese API ist variantenübergreifend und erlaubt einen transparenten Zugriff im Under- und Overlay. Mithilfe einer Vermittlungsschicht der Middleware [MCSW12], wird selbstständig die effizienteste Multicast-Technologie im Netzwerk gewählt und verwendet. Die Middleware zieht so die Komplexität aus den Anwendungen und vereinfacht das Entwickeln neuer.

Eine Prototyp-Implementierung zeigt, wie die Middleware aufgebaut sein kann (siehe Abbildung 2.1). Auf der obersten Ebene befindet sich die Gruppenanwendung, welche die Multicast-API verwendet und dadurch auf die HVMcast *API-Library* zugreift. Diese Zugriffe werden über Interprozess-Kommunikation an die Middleware weitergereicht. Die Middleware enthält zum einen eine *Service Discovery*, die nach Multicast-Technologien im Netzwerk sucht, und zum anderen eine *Service Selection*, welche die effizienteste Technologie im Netzwerk auswählt. Die Zugriffe auf die einzelnen Technologien selbst wurden in austauschbare Module ausgelagert, um das Erweitern der Middleware um neue Technologien zu vereinfachen.

Multicast-Gruppen entkoppeln die Bindungen zwischen Sender und Empfänger und repräsentieren jeweils eine Menge von Gruppenteilnehmern. Um Multicast-Gruppen, trotz unterschiedlichster Technologien global identifizieren zu können, ist eine Abstraktion von Identifizierung

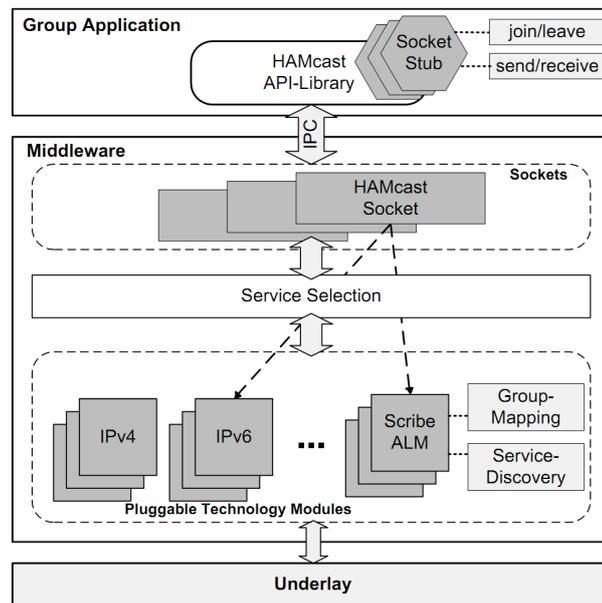


Abbildung 2.1: HVMcast Middleware

und Lokalisierung erforderlich. Aufgrund dieses *Identifier-Locator-Splits* wird bei HVMcast zwischen einem technologieunabhängigen Gruppennamen (ID) und einer technologieabhängigen Gruppenadressen (Locator) differenziert.

Der Gruppenname wird durch eine Teilmenge des Uniform Resource Identifiers (URI [BLFM05]) repräsentiert und ist wie folgt aufgebaut:

```
scheme “://“ group “@“ instantiation “:“ port “/“ sec-credentials
```

Der *scheme* bezeichnet den Namensraum, zum Beispiel ip, sip oder scribe. Enthält die URI keine syntaktischen Informationen, kann opaque als scheme verwendet werden. *Group* identifiziert die Multicast-Gruppe und kann abhängig vom scheme technologiespezifische Informationen enthalten. Die weiteren Parameter sind optional. *Instantiation* bezeichnet die Entität, welche die Instanz der Gruppe generiert. Zum Beispiel lässt sich mit der “instantiaton“ eine SSM Quelle darstellen. Der *port* spezifiziert die Anwendung der Instanz einer Gruppe und mit der Hilfe von *sec-credentials* können Sicherheitsmerkmale realisiert werden, wie zum Beispiel das Autorisieren von Zugriffen auf Multicast-Gruppen.

Gültige URIs können zum Beispiel wie folgt aussehen:

```
1. ip://239.99.99.99@141.22.27.212
```

2. ip://[ff15::123:456:7]
3. opaque://News@BBC.com:1234
4. opaque://News@*:1234
5. opaque://*@CNN.com

Beispiel 1 und 2 haben das scheme ip, weshalb deren *group* und *instantiation* als IPv4 bzw. als IPv6 Adresse interpretiert werden können. Beispiel 3, 4 und 5 enthalten keine technologiespezifischen Informationen. Wobei Beispiel 3 eine Teilmenge von Beispiel 4 ist und beim abonnieren der Gruppe aus Beispiel 5 ein *selektiver Broadcast* ausgeführt wird.

Ein Beispiel für einen Zusammenschluss von Multicast-Inseln mit unterschiedlichen Multicast-Technologien wird in Abbildung 2.2 vorgestellt. Es zeigt ein HVMcast Szenario aus der logischen Sicht mit drei Multicast-Inseln, Netzwerk (a), (b) und (c). Netzwerk (a) spricht zwei Multicast-Technologien IPv4, IPv6. Außerdem ist Netzwerk (a) mit Netzwerk (b) über ein Overlay Multicast verbunden und Netzwerk (b) hat eine Netzwerkverbindung zum Netzwerk (c), in dem allerdings nur IPv6 gesprochen wird. Zusätzlich befinden sich im Netzwerk (c) mehrere Server die Multicast-Daten an die Gruppe *opaque://News.com* (vereinfacht geschrieben News.com) senden. Hierzu gehört der Server von CNN und der Server von BBC die von Person X im Netzwerk (a) abonniert wurden.

Für eine einheitliche Darstellung und eine systematische Aufbereitung der Problemstellung werden die Multicast-Inseln mit den einzelnen Technologien in Multicast-Domänen aufgeteilt. Zur einer Multicast-Domäne gehört eine Multicast-Technologie, sowie Rechner und Router die diese Technologie verwenden. Verbunden werden diese Domänen über Interdomain Multicast Gateways (IMGs), welche zwischen den Technologien übersetzen. Die domänenspezifische Sicht kann dann wie in Abbildung 2.3 aussehen. Netzwerk (a) wurde in eine IPv4 und in eine IPv6 Domäne aufgeteilt und sind beide mithilfe der IMGs über das Overlay mit Netzwerk (b), einer IPv4 Domäne, verbunden. Da das Notebook von Person X sowohl IPv4 als auch IPv6 Multicast unterstützt befindet es sich in beiden Domänen.

Abonniert Person X News.com, entscheidet die Service Selection aus welcher Multicast-Domäne, vom Netzwerk (a), dies geschieht. Daraufhin werden die Gruppendaten von Netzwerk (c) über Netzwerk (b), über das Overlay, in die IPv4 Domäne des Netzwerks (a) weitergeleitet. Dabei muss der Gruppenname News.com in jeder Domäne auf eine technologieabhängige Gruppenadresse abgebildet werden. Der Ablauf einer Abbildung wird im Kapitel 3 beschrieben.

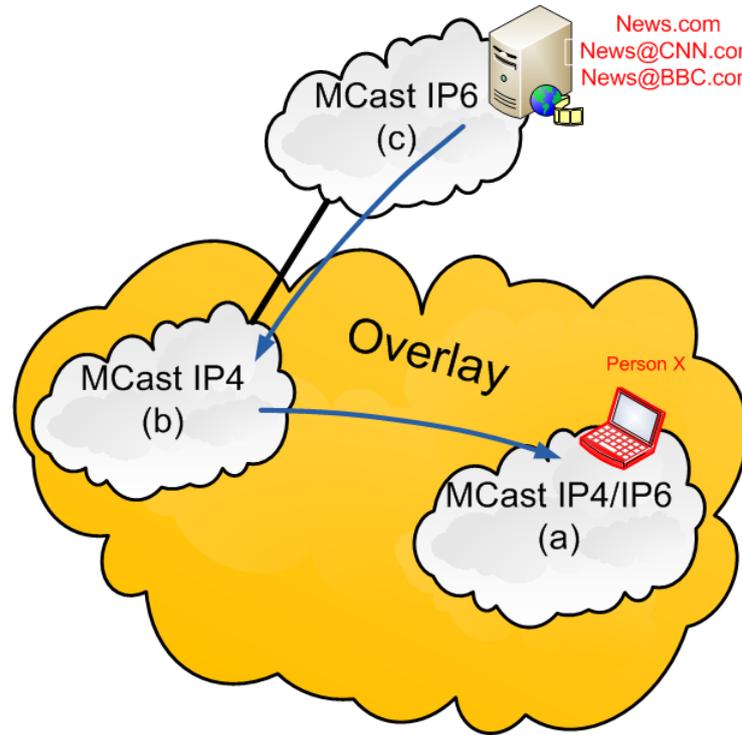


Abbildung 2.2: Logische Sicht von Multicast-Inseln

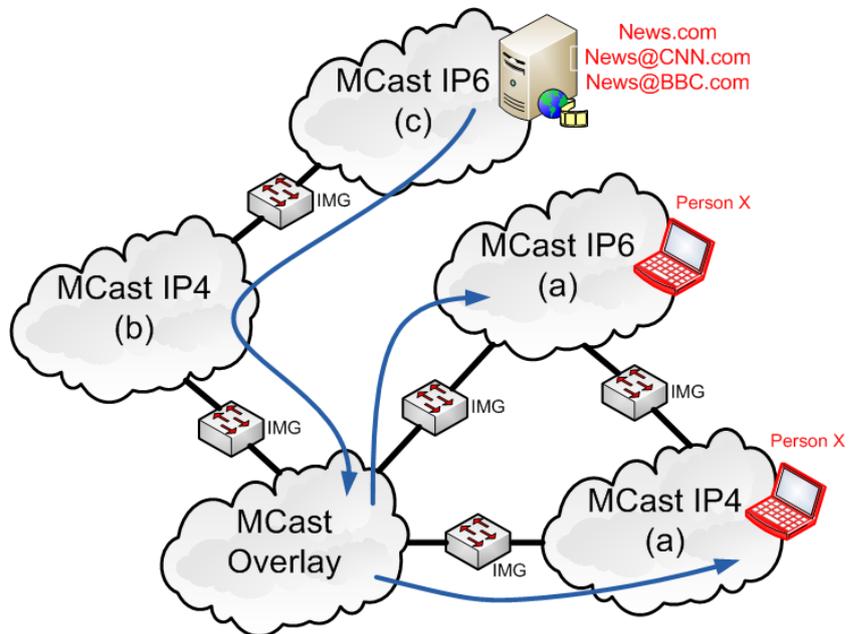


Abbildung 2.3: Multicast-Domänen

2.1 Routing und Translation

IMGs übersetzen zwischen Multicast Technologien und routen Gruppendaten. Beim routen entstehen weitere Probleme, wie zum Beispiel das Erkennen von Schleifen und das Finden des kürzesten Pfades. Diese lassen sich zum Beispiel durch eine *Hierarchisierung in Tiers* lösen [WS07]. Bei der Hierarchisierung werden die Domänen in einer Baumstruktur angeordnet. Diese Struktur verhindert Schleifen und vereinfacht das Routing. Da es sich hierbei eher um klassische Routing Probleme handelt wird in dieser Ausarbeitung hierauf nicht weiter eingegangen.

Das Übersetzen zwischen Multicast Technologien IPv4 und IPv6 muss allerdings nicht zwangsweise durch einen IMG erfolgen. So beschreibt zum Beispiel das RFC-6219 ein zustandslosen Adressmapping-Mechanismus zwischen IPv4 und IPv6 [LBC⁺11]. Dabei werden ein Teil der IPv4 Adressen von ISPs in IPv6 Adressen eingebettet. Diese speziellen Adressen können zustandslos ineinander übersetzt werden. So können Clients, welche diese speziellen Adressen besitzen auch das jeweils andere Netzwerk nutzen. Dieses Verfahren lässt sich auch auf Multicast-Adressen adaptieren.

Neben der paketorientierten Übersetzung wird im Draft [JGFL12] eine Multicast-Proxy Lösung vorgestellt. Der Proxy verbindet IPv4 mit IPv6 Netzwerken. Es basiert auf einem *content cache concept*. Dabei fungiert der Multicast-Proxy im IPvX Netzwerk als Multicast Client, empfängt dort die Multicast Daten und routet sie in das IPvY Netzwerk weiter.

Der Draft [VLB11] ist als Multicast-Erweiterung für das RFC 6144 gedacht und stellt eine breite Spanne möglicher Lösungen für eine Übersetzung zwischen IPv4 und IPv6 Multicast vor.

3 Adressen- und Namensmapping in HVMcast

Dieses Kapitel befasst sich mit der Kernproblematik dieser Ausarbeitung. Es beschreibt, wie ein Mapping zwischen ID und Locator im Prinzip abläuft, an welcher Stelle meine zukünftige Arbeit ansetzen wird und welche Probleme in diesem Zuge gelöst werden müssen.

3.1 ID-Locator Mapping

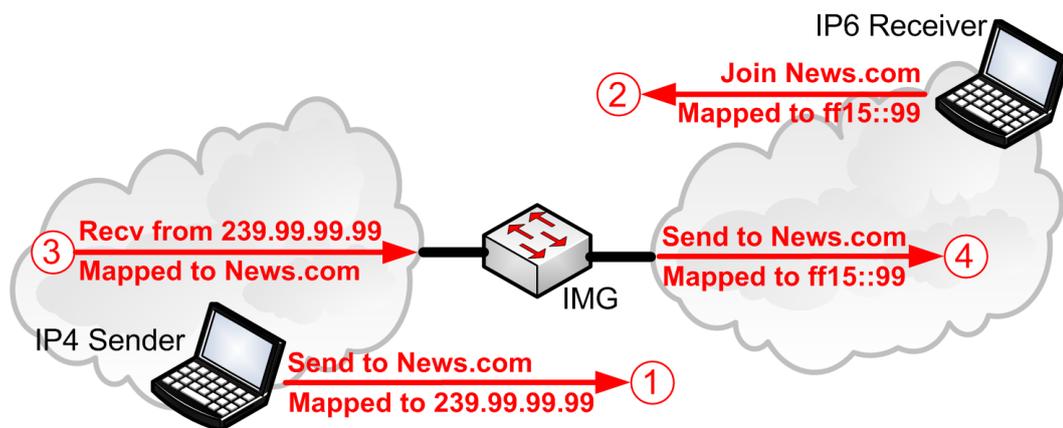


Abbildung 3.1: ID-Locator Mapping

Die semantische Trennung von Gruppenname und Gruppenadresse (ID-Locator Split) ermöglicht eine technologieübergreifende Gruppenkommunikation. So können Multicast-Gruppen domänenübergreifend (global) identifiziert werden. Allerdings wird in jeder Domäne eine Abbildung zwischen Gruppenname und Gruppenadresse benötigt. Das Mapping folgt einem Konzept des *späten Bindens*, wodurch erst zur Laufzeit entschieden wird, welche Multicast-Technologie verwendet wird. Außerdem verfolgt HVMcast das namensorientierte Publish/Subscribe Prinzip, so werden Gruppendaten vom Sender beim veröffentlichen registriert (*source register*) und von

Empfängern abonniert (*join*). Abbildung 3.1 zeigt eine IPv4 Domäne die über einen IMG mit einer IPv6 Domäne verbunden ist. Außerdem wird beschrieben an welchen Stellen ein Mapping notwendig ist:

1. Der Sender in der IPv4 Domäne, sendet Daten an die Gruppe News.com (*Pfeil 1*). Die URI News.com muss an dieser Stelle auf eine IPv4 Adresse abgebildet werden, zum Beispiel 239.99.99.99.
2. Der Empfänger in der IPv6 Domäne abonniert die Gruppe News.com (*Pfeil 2*), aus technologiespezifischer Sicht allerdings eine IPv6 Adresse, zum Beispiel ff15::99. Wodurch eine Abbildung von Gruppenname auf Gruppenadresse benötigt wird.
3. Der IMG empfängt die Gruppendaten mit der IPv4 Adresse 239.99.99.99 vom Sender (*Pfeil 3*) und um die Gruppe eindeutig identifizieren zu können, bildet er die Gruppenadresse auf den Gruppennamen News.com ab (Reverse Mapping).
4. Der IMG leitet die empfangenen Gruppendaten weiter (*Pfeil 4*) und benötigt so eine Abbildung vom Gruppennamen auf die IPv6 Gruppenadresse.
5. Der Empfänger empfängt die Gruppendaten auf Adressebene und bildet sie auf einen Gruppennamen ab. Dieser Fall ist trivial, da der Empfänger die Gruppe vorher abonniert hat und so die Abbildung lokal bekannt ist.

3.2 Mapping-Funktionen

Nachdem in Kapitel 3.1 die Stellen im HVMcast-Netzwerk aufgezeigt wurden an denen ein Abbildung zwischen ID und Locator notwendig ist, werden nun Ideen vorgestellt wie eine Abbildung stattfinden kann.

Mapping-Funktionen sind domänenspezifisch und dürfen aus Skalierungsgründen über keine globalen Zustände verfügen. Sie sind im besten Fall zustandslos, müssen aber reversibel sein. Allerdings ist ein deterministisches, **zustandsloses Mapping** im Allgemeinen nicht möglich, da durch die Kardinalitäten der Adress- und Namensräume die Abbildungen surjektiv sind. So ist eine Abbildung von einer beliebig großen URI auf einen begrenzten Adressraum nicht eindeutig reversibel.

Ein **zustandsbehaftetes Mapping** löst das Problem der Reversibilität. Zum Beispiel können in einer gemeinsamen Tabelle die domänenspezifischen Abbildungen gespeichert werden. Die

Tabelle könnte zentral bei einem IMG liegen oder beispielsweise als DHT (distributed hash table) auf alle HVMcast-Teilnehmer einer Domäne verteilt sein. Dann kann ein Sender seine Gruppe in der Tabelle über einen zusätzlichen Eintrag registrieren und anschließend die eingetragene Abbildung für seine Gruppendaten verwenden. Empfängt der IMG die Gruppendaten, liest er die zugehörigen Abbildungsinformationen aus der Tabelle aus.

Um eine gemeinsame Tabelle und den damit verbundenen Kommunikationsoverhead zu vermeiden, könnte ein **lokal zustandsbehaftetes Mapping** genutzt werden, welches ausschließlich lokale Zustände benötigt. Dies ist mit Funktionen möglich, die auf Basis eines Gruppennamens, deterministisch eine Gruppenadresse erstellen können, zum Beispiel durch Hashfunktionen. Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, sind solche Funktionen nicht reversibel, weshalb zum einen die Abbildungsinformationen lokal gespeichert werden müssen und zum anderen beim *source register* und *join* implizit dem IMG mitgeteilt werden muss.

Ein Sonderfall ist das **kanonische Mapping**. Enthält eine URI technologiespezifische Informationen, können diese für die Abbildung in die betreffende Technologie verwendet werden. Zum Beispiel kann die URI `ip://239.99.99.99` in einer IPv4 Domäne auf die Gruppenadresse `239.99.99.99` abgebildet werden. Umgedreht können *native* Multicast-Clients, Clients ohne Kenntnisse von HVMcast und dem ID-Locator Split, Gruppendaten verschicken, welche automatisch auf eine technologiespezifische URI abgebildet werden können (reverse mapping). Dies gilt für jede Multicast-Technologie, die an das HVMcast-Netzwerk angebunden ist.

3.3 Hashfunktionen

Hashfunktionen können zum Abbilden von Gruppennamen auf Gruppenadressen genutzt werden. Der umgedrehte Fall das Abbilden von Gruppenadressen auf Gruppennamen ist hingegen nicht eindeutig möglich, da durch die Kardinalität der Adress- und Namensräume die Abbildung surjektiv ist. Durch die Surjektivität der Abbildung entstehen allerdings auch Kollisionen. So könnten zum Beispiel die URIs `News.com` und `Movies.com` auf dieselbe Gruppenadresse abgebildet werden. Dies führt dazu, dass sowohl Empfänger die kollidierte Multicast-Streams auf Anwendungsebenen trennen müssen, als auch dass IMGs die Gruppendaten an beide Gruppennamen weiterleiten und so eine ungewollte Redundanz entsteht. Um auszurechnen wie hoch die Kollisionswahrscheinlichkeit bei jeder Multicast-Technologie ist, wird die Formel für das Geburtstagsparadoxon verwendet. Bei dem Geburtstagsparadoxon wird nach der Anzahl der

Menschen gefragt, die benötigt werden, um eine Wahrscheinlichkeit von über 50% zu erhalten, dass zwei Menschen am selben Tag Geburtstag haben. Da die Wahrscheinlichkeit fast quadratisch zur Anzahl der Personen steigt und dies sehr häufig stark unterschätzt wird, wird es Paradoxon genannt. So gibt $p = 1 - \frac{m \cdot (m-1) \cdot (m-2) \dots (m-(n-1))}{m^n}$ an, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, bei n Gruppennamen und bei der Größe des Adressraums m , dass eine Kollision auftritt. Dies gilt für kollisionsresistente Hashfunktionen. Die Tabelle 3.1 zeigt, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass bei IPv4 und IPv6 Kollisionen auftreten. Wobei in IPv4 2^{28} (224.0.0.0 bis 239.255.255.255) und in IPv6 2^{112} (ff00::/8 mit zusätzlichen 4 Flag Bits und 4 Scope Bits) unterschiedliche Multicast-Gruppen existieren. Es ist in der Tabelle zu erkennen, dass der IPv4 Multicast-Adressraum zu klein ist um bei einem Mapping von URI zur Gruppenadresse eine Hashfunktion verwenden zu können. Bei IPv6 hingegen ist dies ohne weiteres möglich.

Gruppen [#]	p für IPv4	p für IPv6
10	0,0000001676	$8,666 \cdot 10^{-31}$
100	0,0000184400	$9,533 \cdot 10^{-29}$
1.000	0,0018590546	$9,620 \cdot 10^{-27}$
10.000	0,1699324542	$9,628 \cdot 10^{-25}$
100.000	0,9999999918	$9,629 \cdot 10^{-23}$

Tabelle 3.1: Kollisionswahrscheinlichkeit mittels Geburtstagsparadoxon

3.4 Das SSM Problem

Die URI *Group@Instantiation* definiert einen Multicast-Channel der zusammenhängend interpretiert wird. So lässt sich die URI nicht direkt auf eine SSM (Source Specific Multicast) Variante abbilden. Denn eine Abbildung auf Gruppen- und Quelladresse kann nicht unabhängig voneinander durchgeführt werden. Zum Beispiel dürfen die URIs $G@I1$ und $G@I2$, trotz desselben Gruppennamens, nicht auf dieselbe Gruppenadresse mit unterschiedlichen Quelladressen abgebildet werden. Denn es muss keine Beziehung zwischen G der einen URI und G der anderen URI geben, da die Bedeutung der jeweiligen Gruppe durch seine Instanz bestimmt wird.

Weiterhin stellen IMGs für die weitergeleiteten Gruppendaten Sender da, wodurch alle weitergeleiteten Gruppendaten als Quelladresse die Interface-Adressen der IMGs haben. Dies fixiert die Quelladresse S des (S, G) Tupels von einem SSM-Channel, wodurch nur noch die Gruppe G frei

wählbar ist. Aus diesem Grund können die URIs der weitergeleiteten Gruppendaten nur anhand der Gruppenadresse unterschieden werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit HVMcast lassen sich Multicast-Domänen mit den unterschiedlichsten Multicast-Technologien miteinander verbinden. Für diesen Service wird eine generische Multicast-API zur Verfügung gestellt, welche über einer Middleware einen transparenten Zugriff auf die zur Verfügung stehenden Multicast-Technologien ermöglicht. Die Middleware greift hierbei über dynamisch zuschaltbare Module auf die tatsächlichen Multicast-Technologien zu. Ein ID-Locator Split ermöglicht eine technologieübergreifende Gruppenkommunikation, was aber dazu führt, dass in jeder Multicast-Domäne ein Mapping zwischen ID und Locator benötigt wird. Hierfür wurden verschiedene Ideen für Mapping-Verfahren vorgestellt und in diesem Zusammenhang das SSM Problem erläutert.

Im nächsten Schritt werden die vorgestellten Mapping-Verfahren unter Berücksichtigung des SSM Problem untersucht, nach Bedarf optimiert und jeweils repräsentativ an die Multicast Technologien IPv4 und an IPv6 angepasst. Dabei ist darauf zu achten, dass globale Zustände vermieden werden und die einzelnen Verfahren deterministisch arbeiten. Diese Lösungsansätze werden anschließend miteinander verglichen und dann theoretisch nach den Kriterien Skalierbarkeit, Speicherbedarf, Rechen- und Netzwerklast bewertet. Abhängig von dem Resultat der Bewertung werden dann ein oder mehrere Lösungsansätze für das IP-Modul (unterstützt sowohl IPv4 als auch IPv6 Multicast) der HVMcast-Middleware implementiert. Nun können die Verfahren praktisch getestet und die Einsatztauglichkeit mit Messungen fundiert werden. Daraufhin werden die Mapping-Verfahren für komplexe Routingszenarien angepasst um die Intentionen von HVMcast, das Verbinden von Multicast Inseln und das Integrieren der zugehörigen Technologien und Varianten, umzusetzen.

Literaturverzeichnis

- [BLFM05] Tim Berners-Lee, Roy T. Fielding, and Larry Masinter. Uniform Resource Identifier (URI): Generic Syntax. RFC 3986, IETF, January 2005.
- [JGFL12] Sheng Jiang, Dajuan Gu, Yu Fu, and Bing Liu. Multicast Proxy in IPv6/IPv4 Transition. Internet-Draft – work in progress 01, IETF, April 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.
- [MCSW10] Sebastian Meiling, Dominik Charousset, Thomas C. Schmidt, and Matthias Wählisch. System-assisted Service Evolution for a Future Internet – The HAMcast Approach to Pervasive Multicast. In *Proc. of IEEE GLOBECOM 2010, Workshop MCS 2010*, pages 913–917, Piscataway, NJ, USA, Dec. 2010. IEEE Press.
- [MCSW12] Sebastian Meiling, Dominik Charousset, Thomas C. Schmidt, and Matthias Wählisch. 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.
- [VLB11] Stig Venaas, Xing Li, and Congxiao Bao. Framework for IPv4/IPv6 Multicast Translation. Internet-Draft – work in progress 03, IETF, June 2011.
- [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.
- [WSV12] Matthias Wählisch, Thomas C. Schmidt, and Stig Venaas. A Common API for Transparent Hybrid Multicast. IRTF Internet Draft – work in progress 06, IRTF, August 2012.