

Building an AS-topology model that captures route diversity

Martin Möller
(martino@cs.tu-berlin.de)

Seminar „Internet Routing“,
Technische Universität Berlin

SS 2009 (Version vom 3. Juli 2009)

Betreuer: Wolfgang Mühlbauer

Zusammenfassung

In diesem Papier wird ein Modell des Internets auf Ebene der Autonomen Systeme vorgestellt. Gegenüber vorherigen Modellen ermöglicht es unterschiedliche Pfade für ein Prefix innerhalb eines Autonomen Systems und erreicht dadurch eine höhere Übereinstimmung mit dem realen System. Mit diesem Modell lassen sich dann vorher nicht beobachtete Pfade vorhersagen.

1 Einleitung

Diese Arbeit setzt sich mit dem Papier „Building an AS-topology model that captures route diversity“ auseinander [1]. Die Autoren beschreiben darin ein Modell des Internets auf Ebene der Autonomen Systeme (AS). Ziel ist es, ein Modell zu schaffen mit dem es möglich ist nicht beobachtete Pfade vorherzusagen. Die Pfade sind dabei von der Topologie und den verwendeten Policies abhängig. Da weder die Topologie noch die Policies im Allgemeinen bekannt sind, versucht man sie aus Mitschnitten des Border Gateway Protocols (BGP) abzuleiten. Bisherige Modelle auf Ebene der AS erreichen nur eine sehr geringe Genauigkeit. Diese Modelle modellieren die AS jedoch mit nur einem Router. Dass das nicht ausreicht wird in Kapitel 2.4 gezeigt und durch die Einführung von Quasi-Routern (Kapitel 3.2) umgangen.

Obwohl das Modell nur auf die Fähigkeit, vorher nicht beobachtete Pfade vorherzusagen, hin untersucht wird, hat es das Potential, Hilfestellung bei weiteren Fragestellungen zu geben. Es könnte Hilfe beim Inter-Domain-Traffic-Engineering geben und bei Entscheidungen über Peering-Beziehungen und der Wahl des Upstream-Providers helfen. Auch die Auswirkungen eines Ausfalls eines Inter-Domain-Links oder Auswirkungen von Multi-Homing könnten damit abgeschätzt werden. Diese und weitere Fragestellungen lassen sich bisher nur schwer beantworten, so dass den Verantwortlichen in der Regel nichts anderes übrig bleibt, als die Auswirkungen am eigentlichen System zu beobachten.

Das folgende Kapitel liefert einige Hintergrundinformationen, die zum Verständnis des Modells notwendig sind. Anschließend wird das eigentliche Modell näher beschreiben. Es folgen dann die Ergebnisse des Papiers und ein kurzes Fazit.

2 Hintergrund

In diesem Kapitel werden zunächst bisherige Arbeiten in diesem Bereich vorgestellt. Danach werden einige Begriffe und Technologien vorstellen, die zum Verständnis des Modells nötig sind. Als erstes wird kurz der topologische Aufbau des Internets beschrieben. Danach folgt eine kleine Einführung in das Border Gateway Protocol (BGP), das Inter-Domain-Routing-Protokoll des Internets. Um das Modell zu verifizieren wird die Simulationssoftware C-BGP [4] verwendet, die im darauf folgenden Abschnitt kurz beschrieben wird. Im letzten Unterkapitel werden dann die Daten, welche zum Aufbau und zur Überprüfung des Modells verwendet werden, erläutert.

2.1 Bisherige Modelle

Bisherige Modelle lassen sich grob in zwei Klassen einteilen. Zum einen gibt es Modelle die das Intra-Domain-Routing modellieren. Hierbei hat man allerdings in der Regel ein umfassendes Wissen, mit dem man ein exaktes Modell generieren kann. Zusätzlich spielen Policies, die man in diesem Fall kennt, nur auf den wenigen Links, die das AS mit anderen AS verbinden, eine Rolle. Ein weiterer Grund warum diese Modelle für unseren Zweck ungeeignet sind, ist deren hoher Detailgrad, welcher zu einem enormen Ressourcenbedarf führen würde, wollte man das gesamte Internet damit modellieren. Wie ein solches detailliertes Modell eines AS erstellt werden kann, zeigt Quoitin in [3].

Daneben gibt es Modelle die das Internet auf Ebene der AS modellieren, wie es Mao et al. in [6] vorgestellt hat. Hierbei wird jedoch jedes AS als atomare Struktur aus nur einem Router modelliert. Damit ergeben sich nur sehr grobe Beziehungen zwischen den AS. In Kapitel 2.4 wird gezeigt, dass es sehr wohl AS gibt, die Router enthalten, die sich bezüglich ihrer Routing Entscheidungen zu einem Prefix unterschiedlich verhalten und deshalb im Modell berücksichtigt werden müssen. Bevor das eigentliche System vorgestellt wird folgen jedoch noch einige zum Verständnis notwendige Hintergrundinformationen.

2.2 Topologie des Internets

Das Internet besteht aus einer Menge von Autonomen Systemen (AS), die miteinander verbunden sind. Die Anzahl der AS liegt heute bei über über 30.000 [5] (Stand 7.6.2009). Für jedes AS trägt dabei in der Regel ein Provider die administrative Verantwortung. Man unterscheidet dabei zwischen sogenannten Tier-1- und Tier-2-Providern (manchmal auch Tier 1,2,3). Tier-1-Provider bieten nur die Weiterleitung von Traffic an, was sie als Dienstleistung an Tier-2-Provider anbieten. Zwischen Tier-1-Providern gibt es in der Regel Peering-Verträge, die den kostenneutralen Datenaustausch ermöglichen. Damit lassen sich die Beziehungen zwischen AS in Peering- und in Customer-Provider-Beziehungen einteilen. AS lassen sich außerdem in single-homed (nur ein Upstream-Provider) und multi-homed (mehrere Upstream-Provider) einteilen.

Jedes AS beherbergt einen oder mehrere IP-Addressbereiche, die mit Hilfe von Prefixen adressiert werden. Um anderen AS die eigenen Prefixe und die Prefixe seiner Customer-Netze mitzuteilen werden Informationen mit Hilfe des Border Gateway Protokolls (BGP) ausgetauscht.

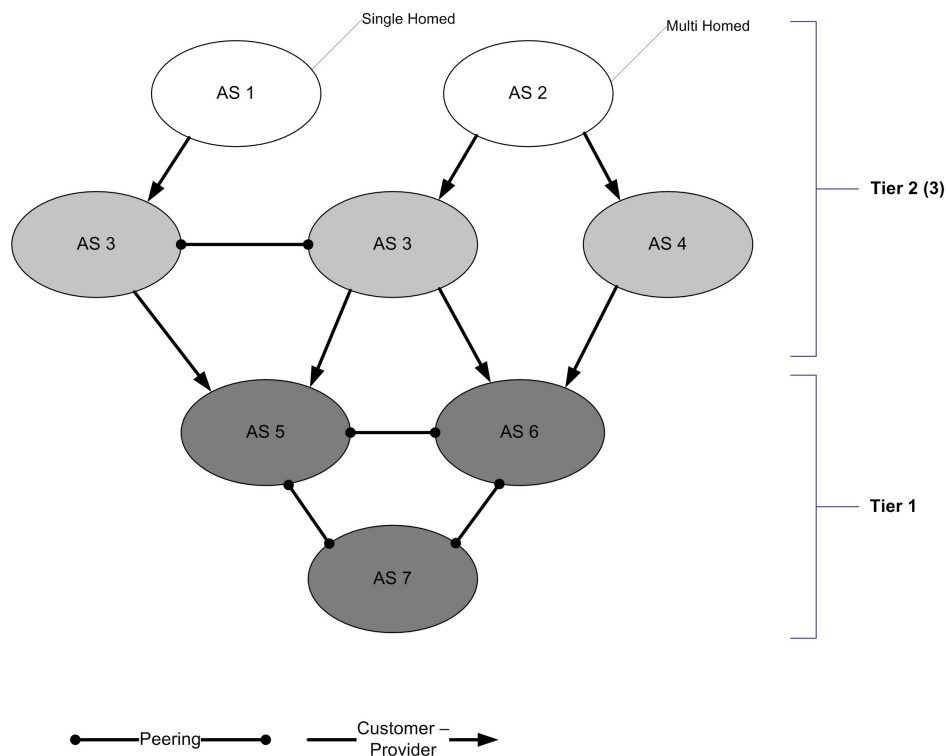


Abbildung 1: AS Topologie

2.3 BGP

Der Informationsaustausch zwischen den AS erfolgt über sogenannte Border-Router. Diese verwenden das Pfadvektorprotokoll BGP um Informationen über die beheimateten Prefixe und die über dieses AS erreichbaren Prefixe auszutauschen. Dazu bauen sie permanente eBGP-Sessions auf, innerhalb derer Nachrichten ausgetauscht werden, die den besten Pfad zu einem Prefix enthalten. Der beste Pfad wird dabei innerhalb des BGP-Entscheidungsprozesses ermittelt. Ohne weitere Einflussnahme wählt dieser den kürzesten Pfad. Da die Provider jedoch an einer Kostenoptimierung interessiert sind, beeinflussen sie diesen Prozess durch sogenannte Policies. Mit Policies kann die Annahme von Pfaden und die Veröffentlichung von Pfaden gesteuert werden. Im multi-homed AS 2 aus Abbildung 1 könnte so zum Beispiel verhindert werden, dass der Pfad zu AS 4 an AS 3 veröffentlicht wird. Des Weiteren können Attribute der empfangenen und der zu veröffentlichenden Pfade manipuliert werden. Ein typischer Anwendungsfall für das Manipulieren eines Attributes, wäre das Setzen des *Local-Pref-Attributes*. Der Provider kann damit Pfade beliebig priorisieren, da es das erste Kriterium im Entscheidungsprozess ist.

In der RIB (Routing Information Base) hält jeder Router dazu alle Pfade zu einem Prefix. Im Entscheidungsprozess wird dann der beste Pfad ermittelt. Die wichtigsten Entscheidungskriterien werden im folgenden Absatz erklärt (Quelle: [2]):

- Prefer highest Local-Pref
Hiermit kann ein Pfad beliebig priorisiert werden.
- Prefer shortest AS-Path
Es wird der kürzere Pfad ausgewählt.
- Prefer lowest MED (Multi-Exit-Discriminator)
Wird vom veröffentlichenden Router gesetzt um gleichlange Pfade gegeneinander zu priorisieren
(wird in der Regel nur verwendet wenn beide Routen vom selben Peer stammen)
- Prefer lowest router-ID
Die letzte Entscheidung, es wird der Pfad gewählt, der vom Router mit der niedrigeren ID stammt.

In Abbildung 2 ist der gesamte Prozess zum Ermitteln der besten Route aufgezeigt. Für jeden Nachbarn oder Peering-Partner können Filter für eingehende und ausgehende Nachrichten definiert werden. Mit ihnen können Attribute der eingehenden oder ausgehenden Pfade manipuliert werden. Außerdem kann damit die Veröffentlichung bzw. Verwendung von Pfaden komplett verhindert werden.

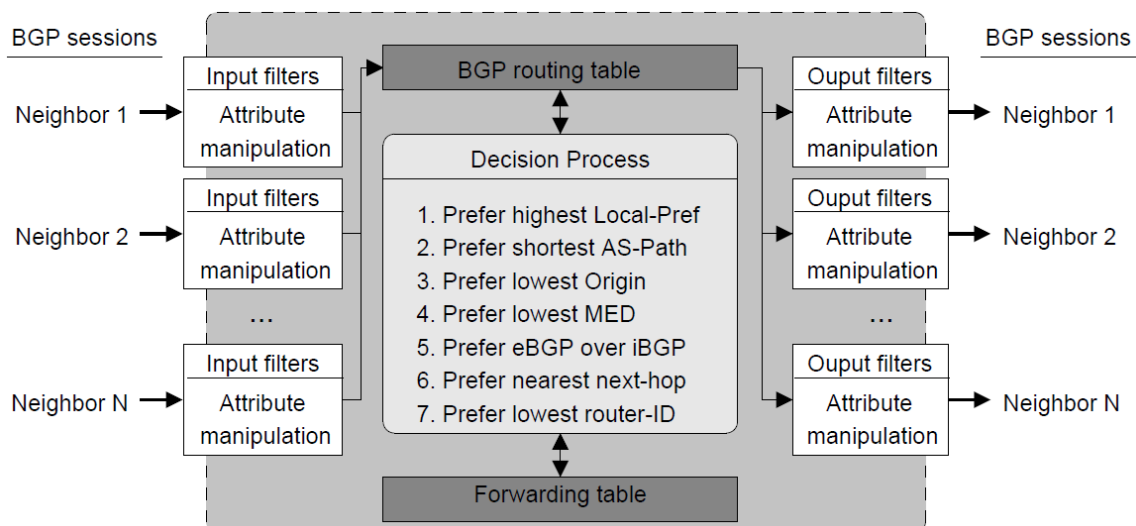


Abbildung 2: BGP Entscheidungsprozess (Quelle: [2])

2.4 Mehrere Router pro AS

Wie anfangs erwähnt verwenden bisherige Modelle auf AS Ebene nur einen Router pro AS. Dass es in der Realität jedoch durchaus vorkommen kann, dass innerhalb eines AS unterschiedliche Entscheidungen bezüglich des Pfades für ein Prefix getroffen werden, ist in Abbildung 3 mit einem Beispiel aus der Praxis beispielhaft aufgezeigt. Im AS 5511 gibt es sechs Router, die jeweils einen disjunkten Pfad für das Prefix 202.94.48.0/20 auswählen. Im Allgemeinen kann man bei etwa 30% der AS Paare mehr als ein Pfad zu einem bestimmten Prefix beobachten. Es ist also notwendig, dies zu berücksichtigen. Im Modell wird dazu das Konzept der Quasi-Router eingeführt.

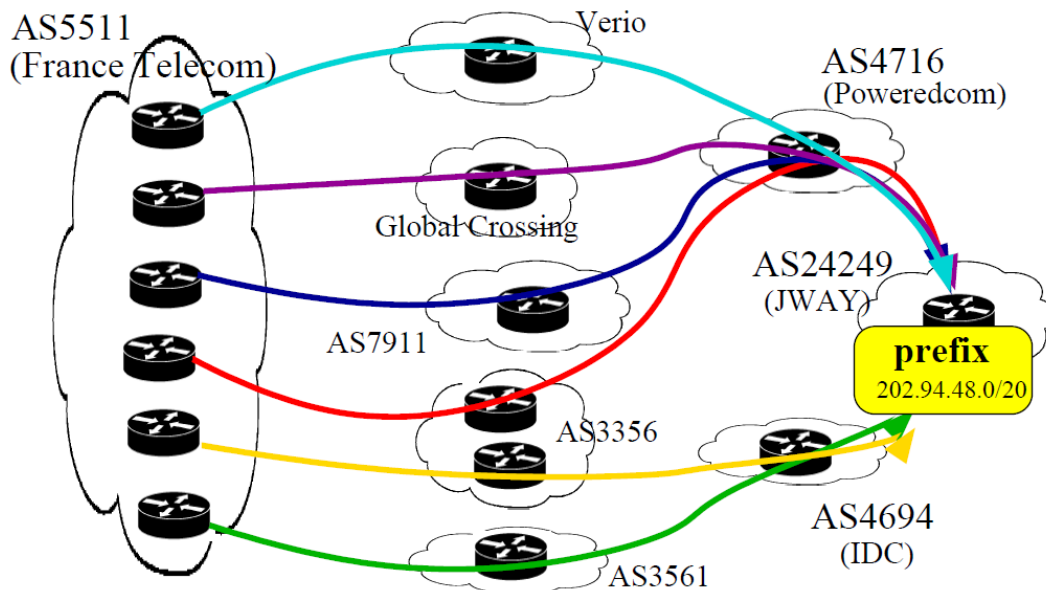


Abbildung 3: Mehrere Pfade in für ein Prefix (Quelle: [7])

2.5 C-BGP

C-BGP ist ein in C geschriebene Simulator für BGP [4], der unter der LGPL Lizenz veröffentlicht wird. Er läuft auf allen gängigen Betriebssystemen und gilt als ressourceneffizient. Unterstützt wird der gesamte BGP Entscheidungsprozess mit iBGP-Sessions und eBGP-Sessions. Dieser kann zusätzlich durch die heute gängigen Policies beeinflusst werden. Die Software wird über ein Kommandozeileninterface oder über dafür geschriebene Skripte gesteuert. Daneben gibt es auch Schnittstellen für Java und Python. Als Eingabe erhält er mindestens eine Definition der Topologie und die Konfigurationen der Router. Zusätzlich kann man beobachtete Routen direkt in die Router injizieren. Die Simulation selbst arbeitet ereignisorientiert (mit einer FIFO-Warteschlange). Wurde der Entscheidungsprozess für ein Prefix abgearbeitet, schickt der Router Nachrichten an seine Peeringpartner um sie über die neue Route zu informieren. Diese Nachrichten werden in der Warteschlange abgelegt und nacheinander abgearbeitet. Die Ergebnisse und der Entscheidungsprozess lassen sich dabei untersuchen.

2.6 Daten

Die Daten, die zum Erstellen des Modells verwendet werden, stammen aus Peering-Sessions mit BGP-Routern. Dazu wird eine Workstation mit einem Software-Router installiert, die mit dem Router eine BGP-Session aufbaut und so die veröffentlichten Routen mitschneiden kann. Die Sessions werden im folgenden als Beobachtungspunkte und das zugehörige AS als beobachtetes AS bezeichnet. Im Paper werden Daten aus mehr als 1300 Beobachtungspunkten verwendet. Sie stammen von RIPE NCC, Routeviews, GEANT und Abilene. Die Beobachtungspunkte gehören zu über 700 AS. Verwendet werden dabei alle Routen vom 13.11.2005 (7:30), die sich seit mindestens einer Stunde nicht geändert hatten.

Mit Hilfe der Daten wurde eine Liste mit 10 Tier-1-Providern erstellt. Weiterhin wurden 7.994 AS, die mit diesen benachbart sind, als Tier-2-Provider identifiziert. Die Menge der restlichen AS besteht aus 6.611 Single-Homed AS und 11.077 Multi-Homed AS. Da Single-Homed AS nur eine geringe Rolle für die Topologie spielen wurden diese aus der Datenbasis entfernt, wobei die Pfade erhalten bleiben. Zusätzlich wird pro AS nur ein Prefix beachtet, was die Anzahl der Pfade weiter reduziert.

Die Daten werden, im Verhältnis 2 zu 1, in Trainingsdaten und Evaluierungsdaten eingeteilt. Die Trainingsdaten werden zum Aufbau des Modells verwendet, die Evaluierungsdaten zur Überprüfung des Modells. Um eine möglichst gute Abdeckung des AS Graphen zu gewährleisten, werden die identifizierten Tier-1-Provider immer den Trainingsdaten zugeordnet.

3 Das Modell

Im folgenden Kapitel werden das Modell und die darin verwendeten Elemente näher vorgestellt. Als primäres Ziel soll es mit dem Modell möglich sein, AS-Pfade vorherzusagen, die mit den tatsächlich beobachteten übereinstimmen. Wie in Kapitel 1.3 dargelegt dürfen AS im Allgemeinen nicht als atomar (aus nur einem Router bestehend) betrachtet werden. Außerdem müssen die Auswirkungen der Policies berücksichtigt werden. Weiterhin soll das Modell mit C-BGP kompatibel sein, um so die Auswertung der Ergebnisse zu ermöglichen.

Für jedes berücksichtigte Prefix wird eine C-BGP Simulation durchgeführt und die resultierenden Pfade werden dann mit den beobachteten verglichen. Das Modell soll so inkrementell verbessert werden. Die Güte wird dabei nicht nur durch das Ergebnis der Routing-Entscheidung gemessen, sondern auch daran ob weitere Informationen zur Verfügung standen. Konkret werden die folgenden drei Metriken verwendet:

- RIB-In match: Die Route stand am Anfang des Entscheidungsprozesses zur Verfügung, d.h. sie ist in der Routing Information Base vorhanden.
- Potentieller RIB-OUT match: Die Route wurde als in Frage kommend ausgewählt, so dass nur noch die letzte Entscheidung (Nachbarn mit niedrigerer ID werden bevorzugt) getroffen werden muss. Es kann mehrere potentielle RIB-OUTs geben, von denen am Ende aber nur eine ausgewählt werden kann.
- RIB-Out match: Die Route wurde für das gewählte Prefix ausgewählt.

3.1 Topologie

Die dem Modell zugrundeliegende Topologie des Internets wird zu Beginn aus den beobachteten Pfaden erstellt. Existiert ein Pfad in dem zwei AS aufeinander folgen, wird eine Kante zwischen diesen AS eingefügt. Um eine möglichst gute Abdeckung der tatsächlichen Topologie zu erreichen werden dazu sowohl die Trainingsdaten als auch die Evaluierungsdaten verwendet. Die entstehende Topologie muss dabei keineswegs vollständig sein, da sie stark von Position und Menge der Beobachtungspunkte abhängig ist. Die für das Modell verwendeten Daten stammen aus Beobachtungspunkten die zu über 700 AS gehören. Mit Hilfe dieser Daten, die 4.730.222 unterschiedlichen AS-Pfaden enthalten, lassen sich 58.903 Kanten ableiten. In Abbildung 4 ist das Vorgehen skizziert. Es wird dort auch verdeutlicht, dass die Menge der beobachteten Kanten keineswegs alle tatsächlichen Kanten enthalten muss.

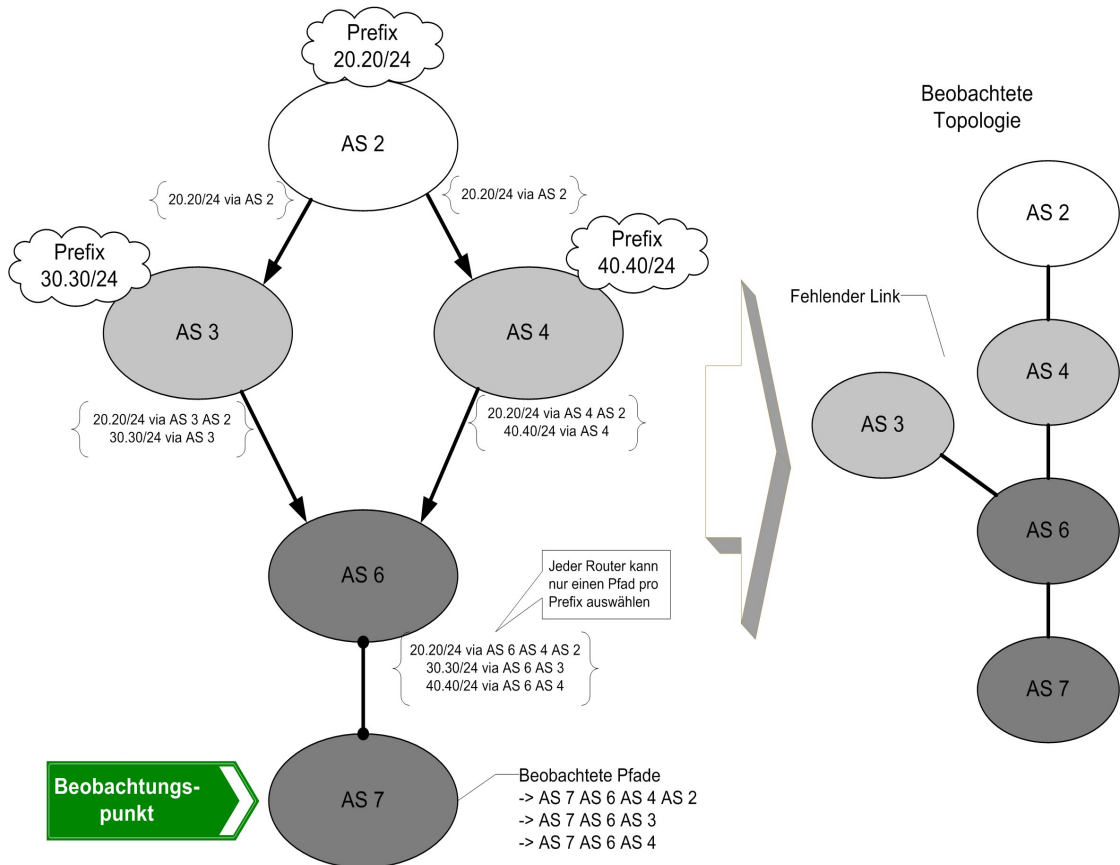


Abbildung 4: Topologie im Modell

3.2 Quasi-Router

Da ein einzelner Router pro AS nicht immer ausreicht wird das Konzept der Quasi-Router eingeführt. Ein Quasi-Router repräsentiert dabei einen oder mehrere Router, die sich bezüglich ihrer Routing Entscheidungen gleich verhalten. Am Anfang des Modellierungsprozesses besteht jedes AS aus nur einem Quasi-Router. Weitere Quasi-Router werden dann bei Bedarf hinzugefügt um unterschiedliche Routen zu einem Ziel zu ermöglichen. Dazu wird ein Kopie des bestehenden Routers erstellt. Er hat dadurch die selben Nachbarn und Policies. Obwohl C-BGP iBGP unterstützt, sind die Router untereinander nicht verbunden. Damit wird eine Eigendynamik verhindert, die die Steuerung der Auswahl der Routen stark erschweren würde. Mit Hilfe von Policies wird der neue Router dann so beeinflusst, dass er die gewünschte Route auswählt.

3.3 Initiales Modell

Als erstes wird ein initiales Modell generiert. Dazu wird die in Kapitel 3.1 vorgestellte Topologie verwendet. Jedes AS besteht dabei aus einem Quasi-Router. Diese Router werden den Kanten der Topologie folgend durch Links miteinander verbunden. Den Routern werden dann IP-Adressen zugewiesen, die sich aus der AS-Nummer und einer eindeutigen ID zusammensetzen. Die Wahl der IP-Adresse hat direkten Einfluss auf das Modell, da sie für die letzte Entscheidung im BGP

Entscheidungsprozess verwendet wird. In Abbildung 5 ist ein Ausschnitt eines solchen Modells nach einem Simulationsdurchlauf zu sehen. Die gepunkteten Pfeile zeigen die Pfade an, die die Simulation in diesem Fall berechnet hat. Die gestrichelten Pfeile zeigen die tatsächlich beobachteten Pfade. Die Simulation hat hier für $p2$ den direkten Weg gewählt, weil er der kürzeste ist. Da aber der tatsächlich beobachtete Pfad über $AS 5$ geht, muss das Modell mit Hilfe von Policies angepasst werden. Der beobachtete Pfad und der simulierte Pfad zu $p1$ sind gleich lang. In der Simulation wurde die Entscheidung zu Gunsten des Pfades $AS 1 AS 2 AS 3$ aufgrund der letzten Entscheidung getroffen. Auch hier muss das Modell mit Policies angepasst werden.

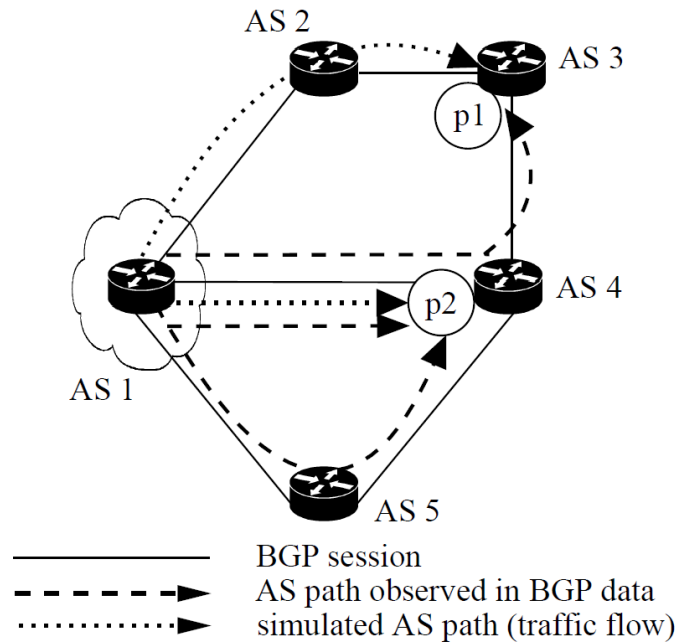


Abbildung 5: Initiales Modell (Quelle: [1])

3.4 Iterationen

Das initiale Modell wird jetzt über mehrere Iterationen hinweg verändert, bis der gewünschte Grad an Übereinstimmung zwischen dem Modell und den beobachteten Pfaden hergestellt ist. Dazu werden für jedes Prefix p in jedem AS a die beobachteten Pfade überprüft. Je nach gefundener Übereinstimmung werden die folgenden Änderungen vorgenommen:

- RIB-Out match: Der beobachtete Pfad stimmt mit dem im Modell überein.
Falls mehrere freie Quasi-Router in a vorhanden sind wird derjenige mit der niedrigsten IP-Adresse ausgewählt. Er wird dann als für dieses Prefix verantwortlich markiert.
- RIB-in ohne RIB-Out: Ein Quasi-Router kennt den Pfad, hat ihn aber nicht ausgewählt.
 - a) Es ist ein freier Quasi-Router verfügbar
Der Quasi-Router mit der niedrigsten Id wird für das Prefix ausgewählt und markiert. Durch Hinzufügen einer Policy wird die Auswahl dieser Route erzwungen.
 - b) Es kein freier Quasi-Router verfügbar.
Es wird ein neuer Quasi-Router erzeugt und als verantwortlich markiert. Danach werden Policies erzeugt, damit die entsprechende Route ausgewählt wird.
- Kein RIB-In match: Keiner der Quasi-Router kennt den Pfad.
Keine Aktion.

3.5 Policies

Je nach Situation werden zwei Arten von Policies verwendet. Es kann sein, dass es für ein Prefix zwei gleich lange Pfade gibt. Da die letzte Entscheidung aufgrund der Router-Id, die frei gewählt wurde, getroffen wird, kann es sein, dass die andere Route als die beobachtete ausgewählt wird. In diesem Fall wird durch das Setzen des MED der gewünschte Pfad priorisiert. Das MED Attribut wird im veröffentichenden Router gesetzt und ermöglicht so die Auswahl des gewünschten Pfades. Die Id des Routers zu verändern ist hier nicht praktikabel, da dadurch Routing-Entscheidungen anderer Quasi-Router beeinflusst werden könnten. Die zweite Art von Policies wird verwendet wenn der beobachtete Pfad nicht der kürzeste ist. Um zu verhindern, dass das Modell den kürzeren Pfad auswählt, wird im Router welcher diesen Pfad veröffentlicht, eine Filterregel erstellt, die die Veröffentlichung verhindert. In Abbildung 6 ist ein Beispiel zu sehen, in dem beide Arten Policies verwendet werden.

- Es werden die Pfade zu den Prefixen $p1$ und $p2$ in $AS 1$ betrachtet. Der beobachtete und der simulierte Pfad stimmen in beiden Fällen nicht überein.
- Im Fall von $p1$ sind der beobachtete und der simulierte Pfad gleich lang. In diesem Fall soll der Pfad über $AS 4$ bevorzugt werden. Dazu wird im Router in $AS 4$ das MED Attribut auf einen niedrigen Wert gesetzt. Der Quasi-Router wählt daraufhin den Pfad über $AS 4$ aus.
- Im Fall von $p2$ wurden zwei Pfade beobachtet. Das bedeutet, dass ein weiterer Quasi-Router erzeugt werden muss. Damit der Quasi-Router den Pfad 1 - 5 - 4 auswählt, wird durch eine Filterregel im Router in $AS 4$ verhindert, dass dieser den Pfad an den neuen Router weitergibt.

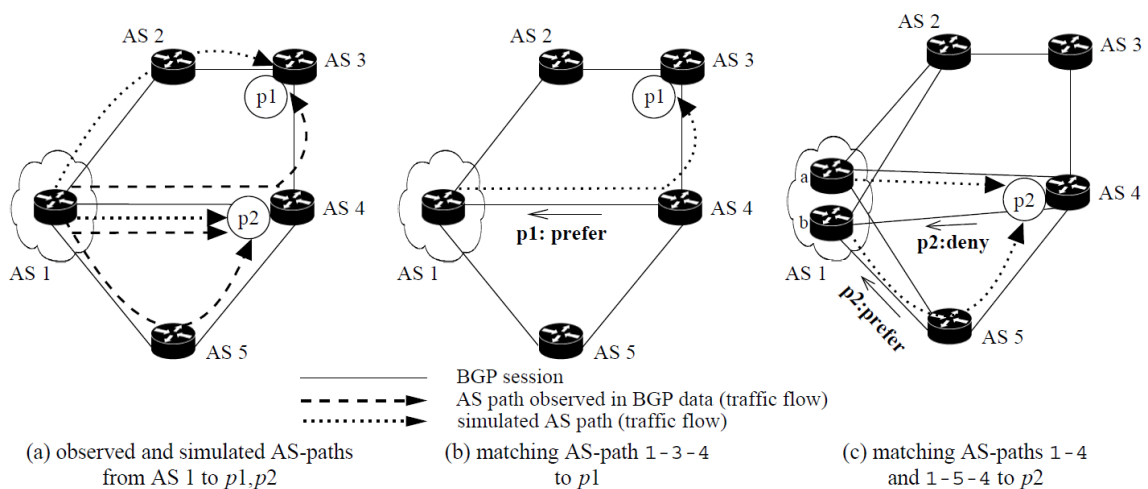


Abbildung 6: Policies im Detail (Quelle: [1])

3.6 Vorhersage von Pfaden

Das Ziel des Papers ist zu überprüfen, ob mit dem vorgestellten Modell vorher nicht beobachtete Pfade vorhergesagt werden können. Dabei sollen die bisher angewandten Policies mit berücksichtigt werden. Das Problem besteht darin, dass die verwendeten Policies nur für ein bestimmtes Prefix definiert wurden. In der Realität werden Policies jedoch eher pro Peer definiert. Deswegen wird bei neuen Pfaden geprüft, ob eventuell vorhandene Policies mit berücksichtigt werden können. Um das zu erreichen wird folgende Heuristik verwendet. Im aktuellen Beobachtungspunkt wird geprüft, ob ein Pfad zu einem anderen Prefix existiert, der aus den Trainingsdaten stammt und folgende Bedingungen erfüllt.

- Beide Pfade enden in diesem Beobachtungspunkt.
- Mindestens die ersten beiden Knoten des Pfades müssen gleich sein.
- Es existiert kein längerer Pfad der diese Bedingungen erfüllt.

Wenn ein solcher Pfad existiert, werden dessen Policies übernommen sofern sie zu einem Router gehören, der in beiden Pfaden auftaucht.

In Abbildung 7 wird diese Heuristik beispielhaft angewandt. Es geht darum, festzustellen ob für das Prefix p vorhandene Policies übernommen werden sollen. Es existieren bereits Pfade zu den beiden Prefixen q1 und q2. Da beide Pfade die ersten beiden Bedingungen erfüllen, wird der längere Pfad zu q2 ausgewählt und alle Policies dieses Pfades bis AS 4 werden für den Pfad zu p übernommen.

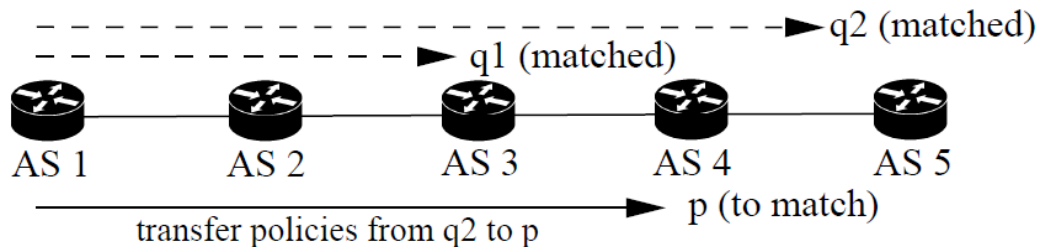


Abbildung 7: Wiederverwendung von Policies (Quelle: [1])

4 Ergebnisse

Um die Genauigkeit des Modells zu bestimmen werden die bereits vorgestellten Metriken herangezogen. In Abbildung 8 ist die prozentuale Übereinstimmung nach x Iterationen abgebildet. Da der längste AS Pfad 10 Knoten enthält, ist nach 11 Iterationen ein 100% Übereinstimmung bei den Trainingsdaten zu beobachten. In der zweiten Abbildung ist dann die Übereinstimmung für Pfade aus den Evaluierungsdaten abgebildet. Nach 11 Iterationen wird hier eine Übereinstimmung von 63% für RIB-Outs, 80% für potentielle RIB-Outs und 93% für RIB-Ins erreicht. Der große Unterschied zwischen RIB-Outs und potentiellen RIB-Outs liegt hauptsächlich in der letzten Entscheidung im BGP Entscheidungsprozess begründet.

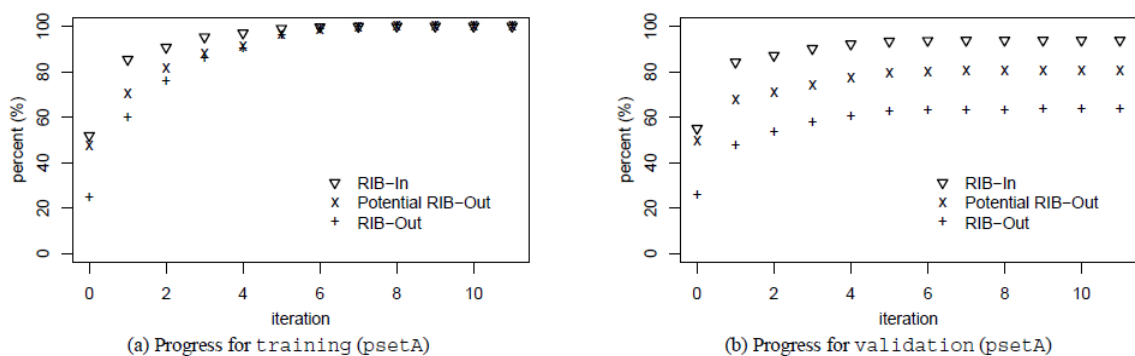


Abbildung 8: Übereinstimmung nach x Iterationen (Quelle: [1])

Um den Fortschritt gegenüber bisherigen Modellen aufzuzeigen werden die Ergebnisse mit denen von Mao et al. [6] verglichen. Hier schneidet das neue Modell für alle drei Metriken wesentlich besser ab. So liegt die Übereinstimmung bei RIB-Outs bei Mao et al. lediglich bei 35%, gegenüber den 63% des neuen Modells.

Als ausschlaggebende Verbesserung geben die Autoren die Verwendung der Quasi-Router an, obwohl lediglich bei einem kleinen Teil der AS mehr als ein Quasi-Router eingefügt wurde. Weniger erstaunlich ist, dass unter diesen wenigen AS die Tier 1 Provider wiederzufinden sind. Sie haben durchschnittlich 17,1 Quasi-Router gegenüber 1,03 bei allen anderen AS.

5 Fazit

Im Papier wird ein Modell vorgeschlagen, das mehrere Router pro AS ermöglicht. Außerdem werden Policies durch eine Heuristik angenähert. Das entstehende Modell zeigt deutliche Fortschritte gegenüber bisherigen Modellen. Bis es zur Unterstützung realer Traffic-Engineering-Problemstellungen herangezogen werden kann, müssen noch einige Nachteile und Einschränkungen beseitigt werden. Am einfachsten dürfte es sein die Beschränkung auf ein Prefix pro AS aufzuheben. Mehrere Prefixe pro AS lassen sich direkt im vorgestellten Modell implementieren und führen lediglich zu einem höheren Ressourcenbedarf. Das scheint jedoch notwendig da mehrere Prefixe pro AS die Regel sind und somit beim Traffic-Engineering berücksichtigt werden müssen. Ob man den großen Unterschied von 63% Übereinstimmung der RIB-out matches gegenüber den 80% für potentielle RIB-out-matches beheben kann bleibt fraglich. Das liegt darin begründet, dass die letzte Entscheidung im BGP Entscheidungsprozess nach unterschiedlichen Kriterien getroffen wird, die sich nur schwer vorhersagen lassen.

In einem nachfolgenden Papier beschäftigen sich Mühlbauer et al. [8] mit der Frage, inwieweit identifizierte AS-Beziehungen ausreichen um Policies und Pfadentscheidungen vorherzusagen. Sie kommen zu dem Schluss das dies nicht ausreicht und schlagen statt dessen ein detaillierteres Modell vor. Das Problem das ein nicht unwesentlicher Teil der Pfadentscheidungen auf Hot-Potatoe-Routing und der letzten Entscheidung im BGP-Entscheidungsprozess beruhen, bleibt jedoch auch hier bestehen. Der Bedarf nach solchen Modellen ist gegeben und es sind weitere Arbeiten in diesem Bereich zu erwarten. Denkbar ist auch die Beschränkung der bisherigen Modelle auf einen Router pro AS aufzuheben um so eine ähnliche Genauigkeit zu erzielen.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Wolfgang Mühlbauer, Anja Feldmann, Olaf Maennel, Matthew Roughan, Steve Uhlig, „[Building an AS-topology model that captures route diversity](#)“, ACM SIGCOMM, 2006
- [2] Bruno Quoitin, „[BGP-based Interdomain Traffic Engineering](#)“, 2006
- [3] B. Quoitin and S. Uhlig, “[Modeling the routing of an Autonomous System with C-BGP](#)” IEEE Network Magazine, 2005.
- [4] C-BGP, Website, <http://cbgp.info.ucl.ac.be/>
- [5] potaroo, Website, <http://www.potaroo.net/tools/asn32/>
- [6] Z.M. Mao, L. Qiu, J. Wang, and Y. Zhang, “[On AS-level path inference](#),” in Proc. ACM SIGMETRICS, 2005.
- [7] Wolfgang Mühlbauer, „[Building an AS-Topology Model that Captures Route Diversity](#)“, ACM SIGCOMM 2006
- [8] Wolfgang Mühlbauer, Steve Uhlig, Bingjie Fu, Mickael Meulle, Olaf Maennel, „[In Search for an Appropriate Granularity to Model Routing Policies](#)“, ACM SIGCOMM, 2007

7 Abkürzungsverzeichnis

AS	Autonomous System	iBGP	internal BGP
BGP	Border Gateway Protocol	MED	Multi-Exit-Discriminator
eBGP	external BGP	RIB	Routing Information Base