

Internet Routing-Instabilitäten  
Patrick Ndongo  
(hibulix@cs.tu-berlin.de)

Seminar "Internet Routing"  
Technische Universität Berlin  
WS 2007/2008 (Version vom 17. Januar 2008)

### **Zusammenfassung**

Dieses Paper beschäftigt sich mit Verfahren zur Lokalisierung der Instabilitäten des Internet-Routings. Hier wird eine Methode erarbeitet, die Informationen über verschiedene Präfixe, die von unterschiedlichen Beobachtungspunkten gesammelt wurden, kombiniert. Angefangen wird mit Verfahren, das in der Praxis einigen Einschränkungen unterliegt. Hierdurch sind die Ausgangspunkte von Instabilitäten relativ gut zu lokalisieren.

## **1 Einleitung**

Durch Instabilitäten im Routing, die z.B. aus Hardware- oder Softwarefehlern resultieren können, werden die Übertragungswege in ihrer Leistungsfähigkeit beeinträchtigt oder gänzlich unbrauchbar gemacht. Zur Analyse solcher Instabilitäten sowie zur Reduzierung ihrer Auswirkungen ist als erster Schritt eine möglichst exakte Bestimmung der verursachenden Stelle (des verursachenden autonomen Systems, AS) in der Netzwerktopologie notwendig.

Obwohl ein Ereignis – z.B. der Ausfall einer Leitung – dazu führt, dass die Information über die Wege zu den betroffenen Zielen aktualisiert werden, also diese Ziele über – wenn vorhanden – alternative Wege erreicht werden können, fehlt bei diesen Aktualisierungen die konkrete Information über die genaue, vom Ausfall betroffene Stelle. Diese Stelle muss mittels Korrelation der verschiedenen, durch den Ausfall ausgelösten, Veränderungen im Routing rekonstruiert werden.

In den letzten Jahren wurden unterschiedliche Ansätze vorgestellt, die in größtenteils an kleineren Schwächen leiden, die in bestimmten Konstellationen zu Tage treten. Anhand zweier verwandter Verfahren soll hier die Lösung mittels eines einfachen Ansatz zur Lokalisierung von Routing-Störungen bis hin zu einer praxistauglichen Bestimmung des Ausgangspunktes von BGP-Störungen (Border Gateway Protocol) vorgestellt werden.

Zuerst wird ein idealisiertes Verfahren erläutert, das beim Vergleich von AS-Pfaden instabiler Präfixe vor und nach einem Ereignis ansetzt. Diese AS-Pfade werden hierbei von Beobachtungspunkten ermittelt. Zusätzliche Informationen werden durch die Betrachtung mehrerer Präfixe auf einmal gewonnen. Das idealisierte Verfahren zeigt jedoch auch Einschränkungen bezüglich der Zuordenbarkeit von BGP-Updates, dem Auftreten gleichzeitiger Instabilitäten, der Dauer von Instabilitäten, der Erkennbarkeit von stabilen und besten AS-Pfaden usw. Anhand dieser Einschränkungen und weiterer Nachteile werden Szenarien demonstriert, in denen das Verfahren keine korrekten Ergebnisse liefern kann.

Anhand der Abbildung 1 des Papers lässt sich gründlich demonstrieren, welche Updates es gibt. Das anpassende BGP-Routing wird jetzt von dem AS2 zu AS4 im Fall von ausgefallenen Link. Dabei ist es zu merken, wo man genau die Instabilitäten entdecken könnte.

Anschließend wird ein geeignetes Verfahren beschrieben, das Schwächen aufhebt bzw. deren Auswirkung reduziert. Das Verfahren befasst sich zuerst mit einer Methode zur Erkennung zusammengehörige BGP-Update-Bursts. Hiermit werden die untersuchten Ereignisse von stabilen AS-Pfaden ermittelt. Danach wird es von einer Bildung der Kandidatenmengen des AS-Pfaden erläutert.

Abschließend wird die Umsetzung des angepassten Verfahrens in der Praxis geschildert. Dabei erfolgt zuerst die Erzeugung der Kandidatenmengen, die Zuordnung der auslösenden Ereignisse und schließlich die Anwendung einer Greedy-Heuristik, um die am häufigsten betroffenen Kandidaten-Tupel aus den Kandidatenmengen zu ermitteln. Dies wird mit Code-Beispielen veranschaulicht.

## 1.1 Internet Routing: Grundlage

Mit dem Begriff Internet versteht man meistens ein Netzwerk von Netzwerken. Anders ausgedrückt beschreibt das Wort Internet ein riesiges Netzwerk, das kleine Netzwerke beinhaltet, wobei die kleineren Netzwerke die so genannten autonomen Systemen (AS) darstellen. Und es bestehen Beziehungen zwischen autonomen Systemen:

### **Peerings:**

Hierbei tauschen die beteiligten autonomen Systeme den Verkehr für das jeweils andere AS sowie dessen Kunden direkt und kostenneutral aus.

### **Upstreams:**

Dabei bezahlt ein AS ein anderes AS, den Upstream, um den "Rest" des Internets darüber zu erreichen.

Beobachtungspunkte werden in einigen ASen aufgestellt und nehmen dort passiv an der BGP-Kommunikation teil. Das heißt, sie protokollieren alle BGP-Updates aus ihrer jeweiligen Perspektive für eine spätere Auswertung mit. Die Informationen über die erreichbaren Präfixe werden zwischen den beteiligten autonomen Systemen mittels BGP ausgetauscht. Diese Informationen werden von AS zu AS propagiert und ermöglichen den Anbietern im Idealfall den Aufbau einer vollständigen Tabelle an Präfixen, den Weg zu diesen Präfixen und möglicherweise weiteren Attributen.

Und man erhält Instabilitäten durch Veränderung, die sich in der Tabelle ergeben. Dabei sind diese Instabilitäten auf einer AS-AS-Kante oder innerhalb eines AS möglich.

## 2 Lokalisierung von Instabilitäten

Hier wird das Idealbild einer Methode zur Lokalisierung von Routing-Instabilitäten behandelt. Jede dieser Instabilitäten führt zu einer Reihe von BGP-Updates, die von den Routern direkt neben der Instabilitätsursache durch das Internet propagiert werden. An den Beobachtungspunkten werden diese BGP-Updates für die spätere Auswertung und damit Lokalisierung der Instabilität aufgezeichnet. Die Instabilitäten selbst können hierbei entweder auf der Verbindung zwischen zwei ASen oder innerhalb eines AS stattfinden. Im ersten Fall befindet sich die Störung auf einer AS-AS-Kante, im zweiten Fall befindet sie sich in einem AS.

Die Grundidee der Lokalisierung liegt darin, dass eine Instabilität, die zu einer Änderung des besten AS-Pfades für ein Präfix durch BGP-Updates führt, von einem Ereignis verursacht wird, das entweder auf dem alten oder auf dem neuen AS-Pfad stattgefunden hat. Es ist anzunehmen, dass das Ereignis auf dem besseren AS-Pfad zwischen Präfix und Beobachtungspunkt stattgefunden hat, denn in diesem Fall kann das Ereignis eine Änderung vom alten auf den neuen besten AS-Pfad verursachen. Je nachdem, ob der AS-Pfad vor oder nach dem Ereignis besser war, ist auch erkennbar, ob es sich bei dem Ereignis um z.B. den Anfang oder das Ende einer Störung handelt. Nur durch den Anfang einer Störung wird auf einen schlechteren AS-Pfad gewechselt. Steht nach dem Ende der Störung der alte, bessere AS-Pfad wieder zur Verfügung, wird wieder auf ihn zurückgewechselt. Da nun von außerhalb möglicherweise nicht erkennbar ist, welcher der beiden AS-Pfade der bessere ist, ist es zweckmäßig, die Vereinigungsmenge beider AS-Pfade als Kandidatenmenge für die Störungsursache anzusehen.

Durch eine Ausweitung der Perspektive auf mehrere Präfixe lässt sich die mögliche Quelle der Instabilität noch weiter eingrenzen. Existiert man eine einzige Instabilität innerhalb einer bestimmten Zeitspanne, so ist klar, dass alle AS-Pfad-Änderungen für verschiedenste Präfixe ihre Ursache in dieser Instabilität haben müssen. Jede dieser AS-Pfad-Änderungen ist nun an verschiedenen Beobachtungspunkten wahrnehmbar; daraus folgt wiederum, dass die mögliche Quelle der Instabilität innerhalb der Schnittmenge der verschiedenen ermittelten AS-Pfade der jeweiligen Präfixe und Beobachtungspunkte liegen muss. Durch das Fehlen von AS-Pfad-Änderungen für andere Präfixe und/oder andere Beobachtungspunkte erhält man eine zusätzliche Information: über den beobachteten Zeitraum muss der AS-Pfad zwischen einem Präfix und dem Beobachtungspunkt stabil gewesen sein. Die Kanten dieser stabilen AS-Pfade können damit als mögliche Quelle der Instabilität ausgeschlossen werden. Ein genaues Beispiel ist der Pseudocode:

```
foreach instability event of prefix  $p$   
  foreach observation point  $o$   
    if route change with path change: from  $rp$  to  $rn$   
       $rb = \text{best path}(rp, rn)$   
      candidate set  $co = \text{candidates}(rb)$   
    if route change without path change:  $rp == rn$   
       $rb = \text{best path}(rn)$   
      candidate set  $co = \text{candidates}(rb)$   
    if route  $rs$  is stable (no BGP update)
```

$\text{candidate set } so = \text{candidates}(rs)$   
 $\text{instability candidates} = \setminus co \square [so]$

Dieses idealisierte Verfahren fordern einige Einschränkungen an:

- Allen BGP-Updates muss die auslösende Instabilität zugeordnet werden.
- Jedes Präfix ist jederzeit von höchstens einer Instabilität betroffen.
- Die Zeitspanne für den BGP-Konvergenzprozess [LAWV 01] ist endlich und festgelegt.
- Es ist klar erkennbar, welche AS-Pfade stabil sind.
- Es ist ebenfalls klar erkennbar, welcher AS-Pfad von zweien der bessere ist.
- Es treten keine induzierten Instabilitäten [FM 04] auf.

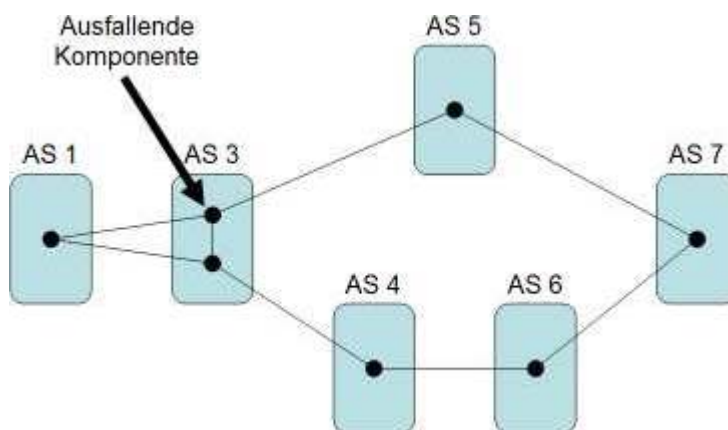


Abbildung 1: Gemeinsame Abschnitte

## 2.1 Sonderfälle

Der oben erwähnte Idealfall ist im realen Betrieb bei BGP Routing nicht gegeben. In folgenden Beispielen wird an Einzelfällen gezeigt, warum diese Annahmen für die Lokalisierung von Instabilitäten zweckmäßig sind. Dennoch ist es möglich, das Verfahren hierauf anzupassen.

### 2.1.1 Anschluss von Störungsquellen

Von einem Beobachtungspunkt aus für ein bestimmtes Präfix sieht man zuerst einen AS-Pfad 1-3-5-7 und nach einem Ereignis den AS-Pfad 1-3-4-6-7, so könnte man daraus schließen, dass die gemeinsamen Abschnitte des alten und neuen AS-Pfades, also 1-3 und 7, nicht als Ursache der Störung in Frage kommen [CGH 03].

Die Instabilität wurde durch den Ausfall des markierten Routers innerhalb des AS 3 ausgelöst, die aufgrund der gemeinsamen AS-Pfad-Abschnitte zwischen altem und neuem AS-Pfad als Störungsursache ausgeschlossen werden sollten.

Normalerweise sind die Szenarien noch komplexer. Hier kommen möglicherweise Internal Gateway Protocol (IGP), Multi-Exit-Discriminator (MED), Communities und Local-Pref-Attribute in Spiel und lassen Ereignisse innerhalb eines AS sehr weit propagieren.

Es kann von zwei unterschiedlichen Beobachtungspunkten für ein- und dasselbe Präfix einmal eine Änderung des AS-Pfades geben und einmal nicht, obwohl in beiden Fällen die AS-Pfade vor der Instabilität einen teilweise identischen Weg hatten. Die Tatsache, dass der eine Beobachtungspunkt für das Präfix keine Änderung des AS-Pfades "gesehen" hat, könnte man nun nutzen, um die ASe auf diesem AS-Pfad als Störungsquelle auszuschließen. Dabei würde in diesem Fall allerdings auch die eigentliche Quelle der Instabilität fälschlicherweise ausgeschlossen werden.

## 2.1.2 Induzierte Updates

Ausgegangen von der Abbildung 2, wird klar, dass die Ursache einer Instabilität nicht auf dem alten oder neuen AS-Pfad liegen muss.

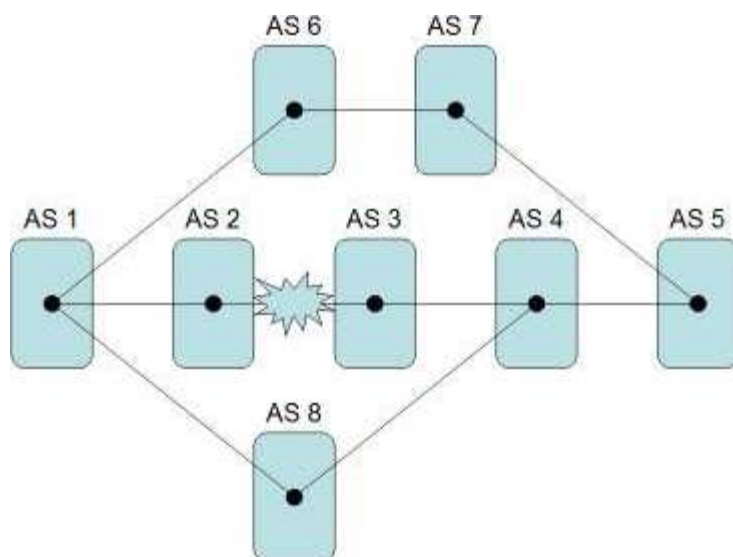


Abbildung 2: Induzierte Störung

Ein Beobachtungspunkt, der am AS 5 angeschlossen ist, sieht als AS-Pfad zu einem im AS 1 liegenden Präfix den kürzesten AS-Pfad 1-6-7-5. Im AS 4 wurde eine Bevorzugung des AS-Pfades 1-2-3-4 statt des kürzeren AS-Pfades 1-8-4 konfiguriert, d.h. der AS-Pfad 1-2-3-4 wird auch an die Nachbarn, also auch an AS 5, propagiert. Jedoch bevorzugt AS 5 weiterhin die kürzere Route. Fällt nun z.B. die Verbindung zwischen AS 2 und 3 aus, so ist der im AS 4 verwendete AS-Pfad nicht mehr verfügbar, d.h. AS 4 wechselt auf den bisher unterdrückten AS-Pfad 1-8-4. Dadurch ändert sich auch das "Mitteilen" an AS 5, wodurch dort nun möglicherweise der bevorzugte AS-Pfad auf 1-8-4-5 wechselt.

## 3 Das adapted Verfahren

Zuerst muss man notwendige Voraussetzungen für die Anwendung des Verfahrens erläutern. Eine davon wäre ein Verfahren zur Erkennung zusammenhängender BGP-Update-Bursts und

die andere eine Methode zum Ausschluss mancher ASes oder AS-AS-Kante aus der Kandidatatenmengen.

### 3.1.1 Bestimmung der AS-Pfades

Bisher wurde davon ausgegangen, dass die stabilen AS-Pfade vor und nach einem auslösenden Ereignis bereits vorliegen. Folglich könnten diese sofort für die Lokalisierung des Ereignisses verwendet werden. Da die Ermittlung dieser stabilen AS-Pfade jedoch nicht derart trivial ist, muss deren Bestimmung vorher noch etwas zusätzliche Aufmerksamkeit gewidmet werden.

In der Praxis hat man den AS-Pfad vor einem Ereignis vorliegen, muss jedoch die BGP-Konvergenzzeit abwarten, um den stabilen AS-Pfad nach einem Ereignis zu kennen. Ursache dafür ist, dass auf ein Ereignis nicht nur ein einzelnes BGP-Update erfolgt, sondern über eine längere Zeitspanne Update-Bursts eingehen können. Erst wenn die Route auf einen stabilen AS-Pfad konvergiert ist, enden die Update-Bursts.

Dazu zählt man die verschiedenen Time-Out auf:

#### **Relativer Timeout:**

Als Timeout wird die Zeitspanne zwischen dem Anfang des ersten BGP-Update-Bursts und dessen Ende verwendet. Nun wird die Ruhephase gemessen, die vor dem Eingehen des folgenden BGP-Update-Bursts herrscht. Ist diese Ruhephase kürzer als die Timeout-Zeitspanne, dann wird der nachfolgende BGP-Update-Burst dem Ereignis zugeordnet. Ist die Ruhepause länger als die Timeout-Zeitspanne, wird von einem neuen Ereignis ausgegangen. Der Nachteil dieses Timeouts ist, dass verschiedene tatsächliche Ereignisse über eine lange Zeitspanne fälschlicherweise dem gleichen Ereignis zugeordnet werden können.

#### **Statischer Timeout:**

Hier wird eine feste Timeout-Zeitspanne verwendet, wodurch man jedoch Empfindlichkeit einbüßt. Wie in [FM 04] erwähnt, kann ein für ein Präfix geeigneter Timeout bei einem anderen Präfix gänzlich ungeeignet sein; so können z.B. zusammengehörige BGP-Update-Bursts unterschiedlichen Ereignissen zugeordnet werden.

#### **Adaptiver Timeout:**

Beim adaptiven Timeout wird die Erkennung zusammengehöriger BGP-Update-Bursts in zwei Abschnitte unterteilt. Zuerst wird über eine Zeitspanne "t" ein relativer Timeout von  $t/2$  verwendet. Ist die Zeitspanne t abgelaufen und wurde noch kein stabiler AS-Pfad erreicht, greift ein relativer Timeout von 0. D.h. dass das Ende von aktuell noch laufenden BGP-Update-Bursts abgewartet und dann sofort unterbrochen wird, ohne noch eine Zeitspanne abzuwarten.

Nur die adaptive Methode wird hier verwendet. Die beiden anderen wiederum zeigen erhebliche Nachteile.

## 3.2 Bildung der Kandidatenmengen

Eine erste denkbare Methode, die in [FM 04] und [CGH 04] erwähnt wird, ist der Ausschluß gemeinsamer Abschnitte im AS-Pfad. Betrachtet man z.B. den alten AS-Pfad 1-3-5-7 und nach dem Ereignis den neuen AS-Pfad 1-3-4-6-7 so ist die Versuchung groß, AS 5 oder die Verbindungen 3-5 oder 5-7 als Ereignisauslöser zu vermuten, da die restlichen ASe in beiden AS-Pfaden enthalten sind.

Der Ausschluß von gemeinsamen Abschnitten zu Anfang oder Ende der AS-Pfade ist jedoch nicht zuverlässig anwendbar. So können in obigem Beispiel Ereignisse im internen Routing (IGP) von AS 3 oder 7 zur Veränderung des AS-Pfades führen. Somit ist diese Methode nicht für die Lokalisierung des Ereignisses geeignet.

Als weitere Methode kommt in [FM 04] der Ausschluß des schlechteren AS-Pfades zur Anwendung. Dies basiert darauf, dass davon auszugehen ist, dass das auslösende Ereignis generell auf dem besseren AS-Pfad stattgefunden hat. Im Falle einer Störung findet nur dann der Wechsel zum schlechteren Pfad statt, wenn der bessere AS-Pfad aufgrund der Störung nicht mehr zur Verfügung steht. Wird hingegen zu einem besseren AS-Pfad gewechselt, dann handelt es sich um das Ende einer Störung auf diesem besseren AS-Pfad. Folglich muss das jeweils betrachtete Ereignis dort stattgefunden haben.

### 3.3 Ermittlung der Kandidaten

Der Ausfall einer Leitung könnte weitere Informationen ableiten. Haben zwei von einem Ereignis betroffene Präfixe eine nicht-leere Schnittmenge aus deren Kandidatenmengen, lässt sich daraus ableiten, dass die Ursache des Ereignisses in dieser Schnittmenge zu vermuten ist.

## 4 Das Verfahren

Dies läuft nach folgenden Schritten:

- Erzeugen der Kandidatenmengen
- Ermitteln der zugeordneten Ereignisse
- Greedy-Heuristik zur Ermittlung der am häufigsten betroffenen Kandidaten-Tupel

### 4.1 Erzeugen der Kandidatenmengen

Zuerst nehmen wir für jedes Präfix aus der Präfixmenge und für jeden Beobachtungspunkt die jeweiligen BGP-Updates abzüglich der BGP-Updates, bei denen es sich lediglich um Route-Flaps gehandelt hat. Diese BGP-Updates werden zu BGP-Update-Bursts gruppiert und mit dem adaptiven Timeouts wird aus ihnen der stabile AS-Pfad vor und nach dem auslösenden Ereignis erzeugt. Daraus erfolgt die Auswahl des besten AS-Pfades, der nun zur Bildung der Menge der Kandidaten-Tupel genutzt wird.

```
for each prefix p {  
  for each observationpoint o {  
    U:= updates(o) - flaps(o)  
    B:= updateburst(U, timeout)
```

```

    for each burst b in B {
        r(o):= as_path( old_stable_route(b))
        r(n):= as_path( new_stable_route(b))
        r(b):= best_as_path( r(n), r(o))
        candidate_set c(o,b):= candidates(r(b))
    }
}

```

## 4.2 Ermitteln der Ereignisse

Anhand der bei den Beobachtungspunkten eingegangenen BGP-Update-Bursts werden nun alle für die Beobachtung relevanten Ereignisse ermittelt. Jede Ereignis werden die dadurch ausgelösten BGP-Update-Bursts zugeordnet.

```

for each timeunit t {
    for each prefix p {
        E:= E  $\cup$  new_event( t )
    }
}

for each event e in E {
    event_burst_set:= associate_event_bursts( B, e )
}

```

## 4.3 Vereinigung der Kandidatenmengen

Aus dem stabilen AS-Pfad der Präfixe, für die keine Änderungen stattgefunden haben, werden dennoch Kandidatenmengen gebildet. Da jedoch bekannt ist, dass diese keine Instabilitäten aufweisen, werden diese Kandidatenmengen von der obigen Vereinigung aller Kandidatenmengen abgezogen. Es werden also stabile Kandidaten-Tupel ausgeschlossen.

```

for each event e {
    for each prefix p {
        for each observationpoint o {
            for each burst(b, o) in event_burst_set {
                candidate_set c(o):=  $\cup$ c(o,b)
            }
        }
        For each observationpoint o {
            if candidate_set c ==  $\emptyset$  {
                candidate_set s:= stable_route(o, e)
            }
        }
    }
}

```



$$\left. \begin{array}{l} \text{instability\_candidates} := \bigcap c - \bigcup s \\ \} \\ \} \end{array} \right\}$$

## 4.4 Greedy-Heuristik

Nun werden die über die beobachtete Zeitspanne auf den einzelnen Beobachtungspunkten bemerkten Ereignisse einander zugeordnet und daraus die Menge der korrelierten Ereignisse gebildet. Für jedes der korrelierten Ereignisse werden wiederum die einzelnen beobachteten Ereignisse zusammengestellt und anhand dieser für das jeweilige korrelierte Ereignis alle davon betroffenen Präfixe ermittelt.

Solange die Menge der betroffenen Präfixe nicht leer ist, wird daraus ein Präfix ausgewählt. Anhand dieses Präfix wird das auslösende Ereignis genutzt, um die Kandidatenmengen aller betroffenen Präfixe zu ermitteln. In diesen Kandidatenmengen werden nun identische Tupel gezählt. Das am hierbei am häufigsten vorkommende Tupel wird als mögliche Instabilität vermerkt. Alle von dieser Instabilität betroffenen Präfixe werden dann aus der Präfixmenge entfernt.

Nach Abschluss hat man die Menge aller möglichen Instabilitäten aus den Kandidatenmengen extrahiert.

## 5 Bewertung

Zur Beurteilung der Praxistauglichkeit des Verfahrens wurden BGP-Protokolle und BGP-Tabellen aus dem Zeitraum vom 4. bis 16 Dezember 2003 gesammelt. Aus diesem Material wurde die AS-Topologie als Graph mit 16.757 Knoten und 45.376 Kanten abgebildet. Dabei enthalten waren 30.653 Kunden-Anbieter-Beziehungen und 1.532 Peering-Beziehungen. Auf diesem Daten basierend wurde nun durch Simulationen die Anwendbarkeit geprüft.

Bei der Lokalisierung der Quellen der simulierten Instabilitäten traten folgende interessante Aspekte zu Tage:

- Die Stelle einer Instabilität hat Einfluss auf die Lokalisierbarkeit der Instabilität. Instabilitäten auf sogenannten "top tier"-Kanten sind bei 69% der Beobachtungspunkte sichtbar, bei "middle tier"-Kanten beläuft sich dies auf fast 40% und bei "bottom tier"-Kanten etwa 15%.
- Mit der Standard-Heuristik und nur zwei Beobachtungspunkten lassen sich bereits mehr als 68% aller Instabilitäten auf 5 bis 7 ursächliche Kanten eingrenzen. Mit 10 Beobachtungspunkten steigt dies auf nahezu 88% an.
- Kombiniert man alle Heuristiken – wie im Verfahren geschehen – kann für mehr als 88% aller Instabilitäten die Ursache auf weniger als 5 Kanten eingegrenzt werden.

## 6 Zusammenfassung

Wie man auf den vergangenen Seiten gesehen hat, stellt sich die Lokalisierung von Routing-Instabilitäten als nicht-triviales Problem dar. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Publizierung der Störungsstelle im Border Gateway Protocol nicht vorgesehen ist. Die fehlende Information muss also durch die Korrelation anderer, im BGP noch vorhandener, Informationen wiederhergestellt werden. Eine weitere Einschränkung stellt die begrenzte Sicht auf das Internet dar. Sämtliche zur Verfügung stehenden Informationen müssen an dedizierten Beobachtungspunkten, welche passiv am BGP teilnehmen, gewonnen werden. Dennoch zeigt das schrittweise aufgebaute Verfahren mit der Möglichkeit, 88% aller Instabilitäten auf vier oder weniger AS-Kanten einzugrenzen, seine Leistungsfähigkeit bei der Suche der Störungsstelle.

Das Potential für weitere Arbeiten in diesem Bereich ist dennoch nicht erschöpft. Denkbar ist eine explizitere Untersuchung der Ausbreitung von Routing-Instabilitäten durch BGP. Ebenfalls von Interesse wäre ein möglicher Zusammenhang zwischen der Ausbreitung einer Routing-Instabilität und der Entfernung von deren Quelle zum "Zentrum" des Internets. Analog könnte analysiert werden, welchen Einfluss die Standorte der Beobachtungspunkte – wieder relativ zum "Zentrum" des Internets – auf die Ergebnisse des Verfahrens haben.

## Referenzen

[FM 04] Anja Feldmann, Olaf Maennel, Z. Morley Mao, Arthur Berger, Bruce Maggs: Locating Internet Routing Instabilities; SIGCOMM 2004

[Stew 99] John W. Stewart III: BGP4: Inter-Domain Routing in the Internet; Addison Wesley Longman, Inc., 1999.

[CGH 04] Di-Fa Chang, Ramesh Govindan, John Heidemann: Locating BGP Missing Routes Using Multiple Perspectives; SIGCOMM 2004

[TR 04] R. Teixeira und J. Rexford: A measurement framework for pin-pointing routing changes; SIGCOMM 2004

[CGH 03] Di-Fa Chang, Ramesh Govindan, John Heidemann: The temporal and topological characteristics of BGP path changes; Proc. ICNP 2003

[LAWV 01] Craig Labovitz, Ahba Ahuja, Roger Wattenhofer, Srinivasan Venkatachary: The Impact of Internet Policy and Topology on Delayed Routing Convergence; INFOCOM 2001