



Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

# Internet Algorithmik – Inferenz einer azyklischen Internet-Hierarchie

Benjamin Hummel

Lehrstuhl für Software und Systems Engineering

Perlen 09.05.2007



# Überblick

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

- 1 Internet Algorithmik
- 2 Routing im Internet
- 3 Inferenz der AS-Beziehungen
- 4 Azyklische AS-Beziehungen
- 5 Ergebnisse



## Internet Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

- 1 Internet Algorithmik
- 2 Routing im Internet
- 3 Inferenz der AS-Beziehungen
- 4 Azyklische AS-Beziehungen
- 5 Ergebnisse



# Was ist Internet-Algorithmik?

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

## Definition

- Betrachtung algorithmischer Problemstellungen motiviert durch das Internet und seine Anwendungen.
- Goodrich/Tamassia [2001]: Internet-based approach for teaching [...] the design and analysis of data structures and algorithms.

## Anfänge

- Prägung des Begriffs ca. 2000
- Vorlesung Internet-Algorithmik an der TUM im SS04 (Sven Kosub)



# Betrachtete Probleme

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

## Algorithmen für ...

- hohe Datenaufkommen (und beschränkten Speicher)
- Datenströme
- Suche und Textindizierung
- große Graphen und deren Struktur (Page-Rank)
- ...

## Analyse von ...

- Netzwerktopologien
- Dimensionierung von Monitorsystemen
- (schlecht verstandenen) Protokollen
- Routing
- ...



Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

- 1 Internet Algorithmik
- 2 Routing im Internet
- 3 Inferenz der AS-Beziehungen
- 4 Azyklische AS-Beziehungen
- 5 Ergebnisse



## Routing

Bestimmung eines Weges für ein Datenpaket zum Zielsystem. Meistens durch Aufbau einer Routing-Tabelle, die für jedes mögliche Ziel den nächsten Rechner auf dem „besten“ Weg enthält (*next hop*).

## Autonomes System (AS)

An AS is a connected group of one or more IP prefixes run by one or more network operators which has a SINGLE and CLEARLY DEFINED routing policy. [RFC 1930]

Intuitiv: Netzwerk, das „groß genug“ ist, um eine aktive Rolle im globalen Datenaustausch zu übernehmen (z.B. ISPs, Universitätsnetze, große Unternehmensnetze).



# Routing im Internet

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

## Problem

- zu viele Hosts um alle beim Routing zu berücksichtigen
- deshalb Aggregation von Zielen mit „gleicher Richtung“
- Aggregationseinheit ist das AS

## Intradomain-Routing

Routing innerhalb eines AS.  
Protokolle: z.B. RIP, OSPF

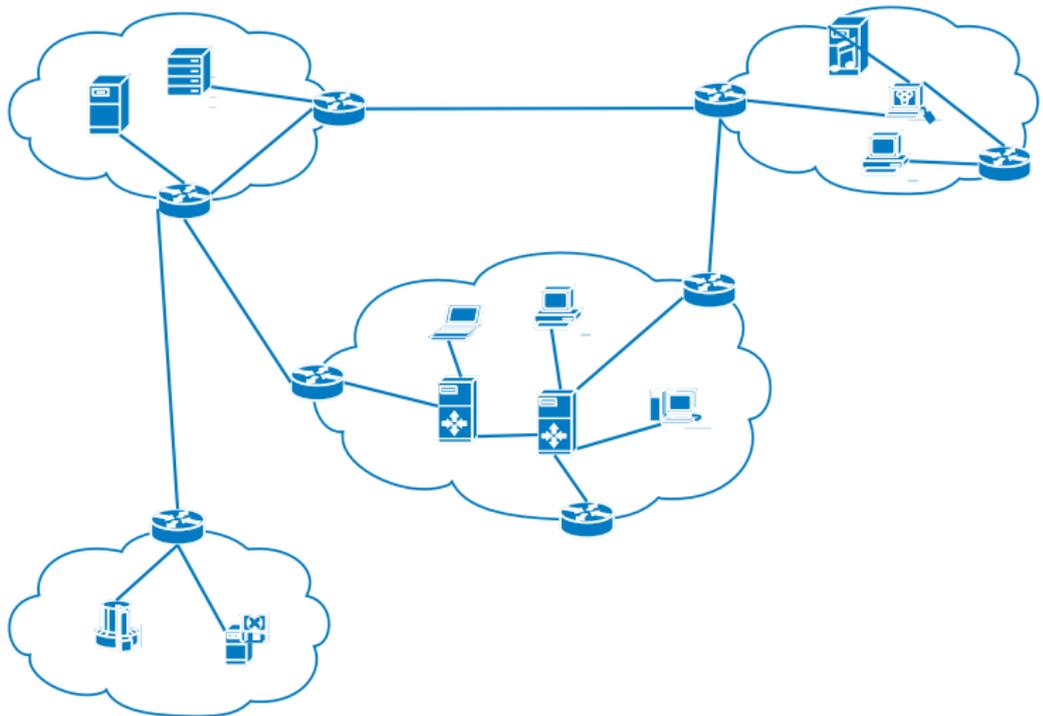
## Interdomain-Routing

Routing zwischen verschiedenen ASen.  
Protokoll: BGP (*de facto* Standard)



# AS-Graph

Hier interessiert uns nur der AS-Graph



Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

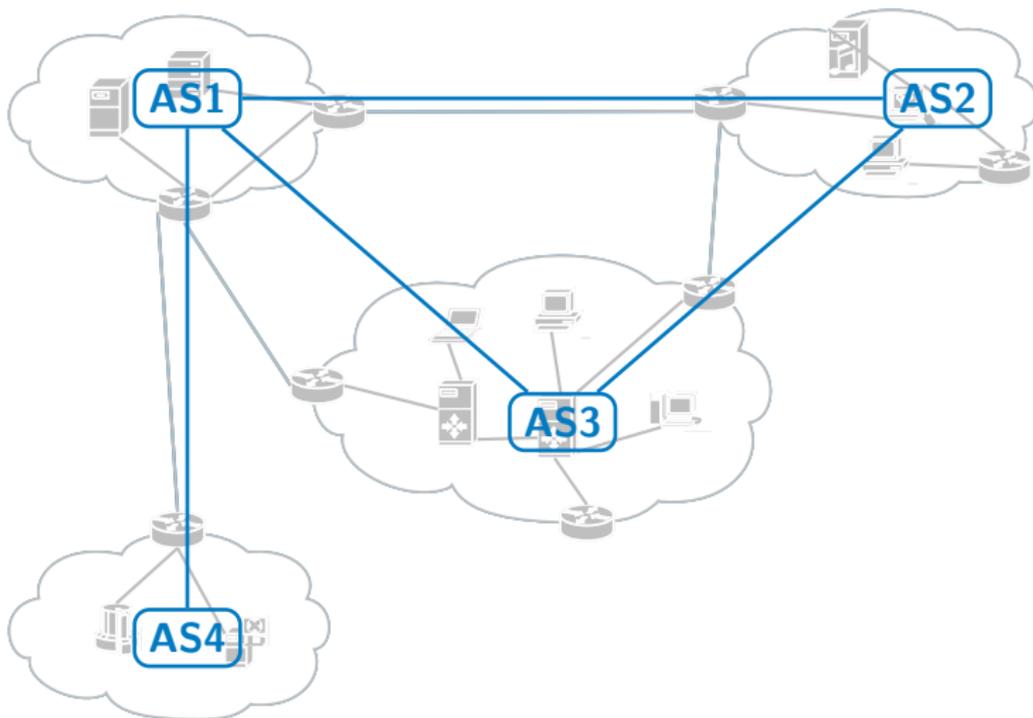
Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse



# AS-Graph

Hier interessiert uns nur der AS-Graph



Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

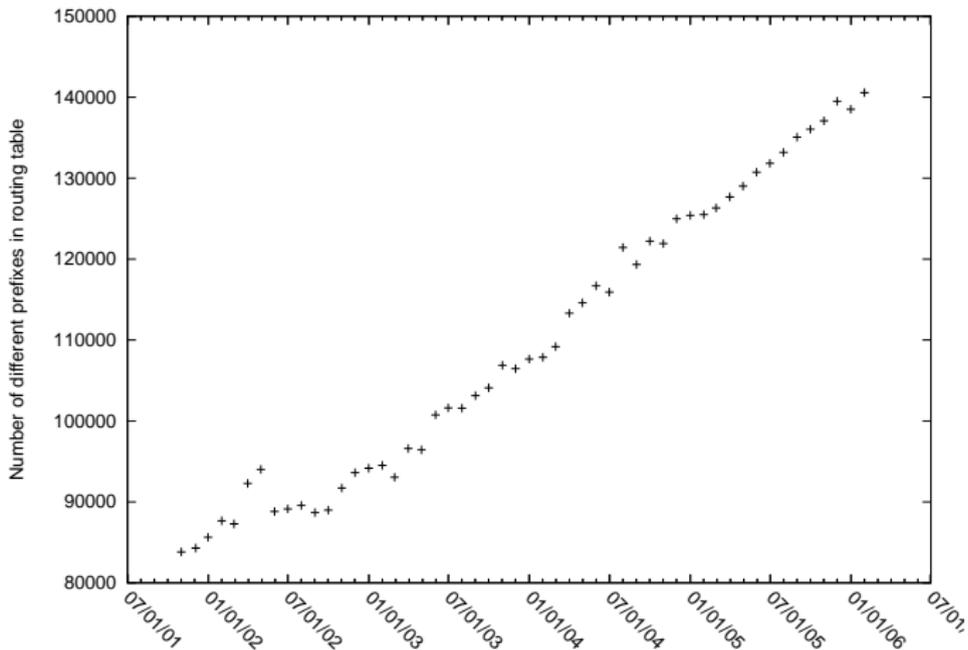
Ergebnisse



# Kennzahlen zum Routing

- ca. 440000000 Hosts [Internet Domain Survey, Juli 2006]
- ca. 21000 Autonome Systeme [WHOIS, März 2006]

Anzahl bekannter IP-Präfixe für route-views2.oregon-ix.net





# Geographische Verteilung der ASe

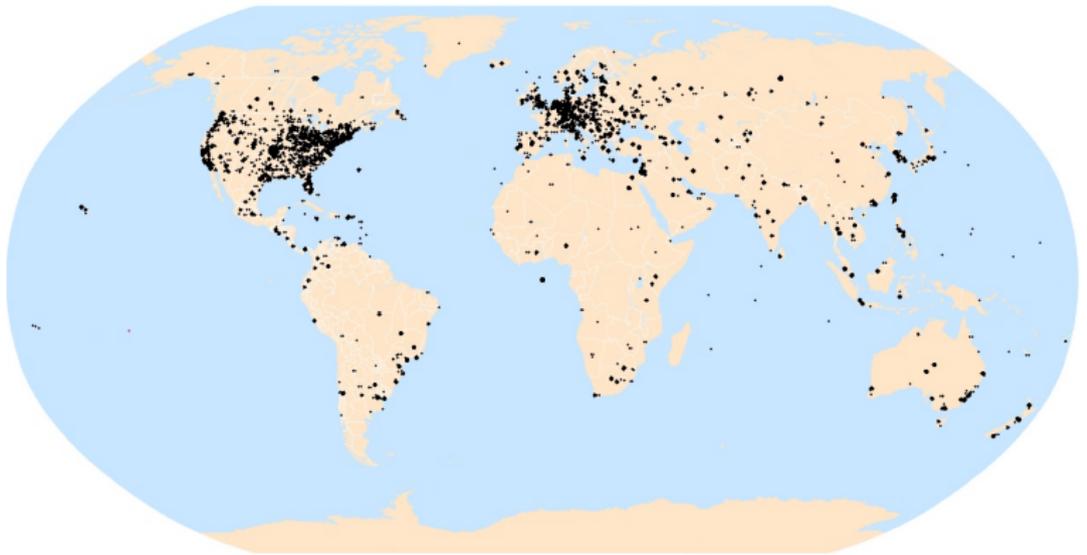
Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse





# Border Gateway Protocol (BGP)

## BGP ist ein Path Vector Protocol

- jeder Router schickt alle ihm bekannten Routen an seine Nachbarn
- jeder Router übernimmt alle Routen, die besser sind als die bekannten
- die Routen sind komplette **AS-Pfade**, d.h. Folgen von ASen bis zum Ziel

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse



# Border Gateway Protocol (BGP)

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

## BGP ist ein Path Vector Protocol

- jeder Router schickt alle ihm bekannten Routen an seine Nachbarn
- jeder Router übernimmt alle Routen, die besser sind als die bekannten
- die Routen sind komplette **AS-Pfade**, d.h. Folgen von ASen bis zum Ziel

## BGP unterstützt Import- und Export-Policies

- Filter, die bestimmen welche Routen verschickt und übernommen werden
- Policies sind meistens kommerziell motiviert



# AS-Beziehungen und die *selective export rule*

## Betrachtete Beziehungen

- customer-to-provider ( $AS1 \rightarrow AS2$ )
- provider-to-customer ( $AS1 \leftarrow AS2$ )
- peer-to-peer ( $AS1 - AS2$ )
- sibling-to-sibling ( $AS1 \leftrightarrow AS2$ )

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse



# AS-Beziehungen und die *selective export rule*

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

## Betrachtete Beziehungen

- customer-to-provider ( $AS1 \rightarrow AS2$ )
- provider-to-customer ( $AS1 \leftarrow AS2$ )
- peer-to-peer ( $AS1 - AS2$ )
- sibling-to-sibling ( $AS1 \leftrightarrow AS2$ )

## Selective Export Rule

AS $v$ exportiert zu	provider	customer	peer	sibling
Eigene Routen	Yes	Yes	Yes	Yes
Kundenrouten	Yes	Yes	Yes	Yes
Provider-Routen	No	Yes	No	Yes
Peer-Routen	No	Yes	No	Yes



# Beispiel für AS-Beziehungen

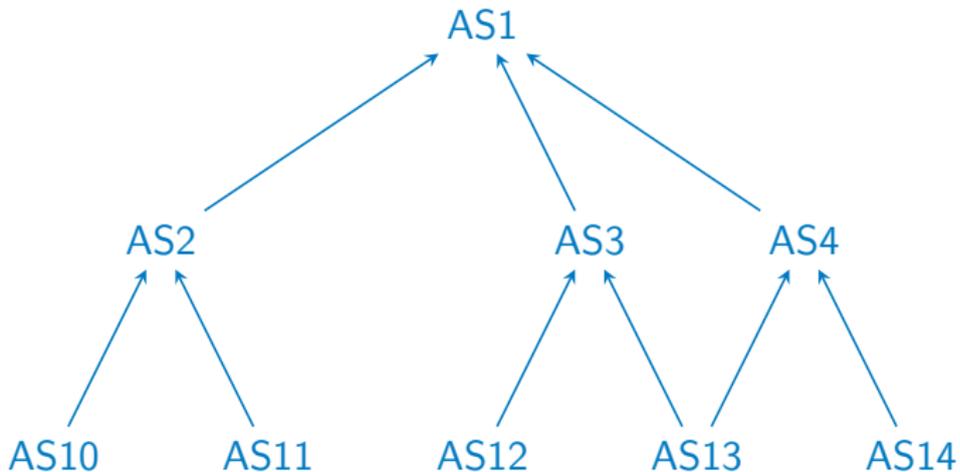
Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse





# Beispiel für AS-Beziehungen

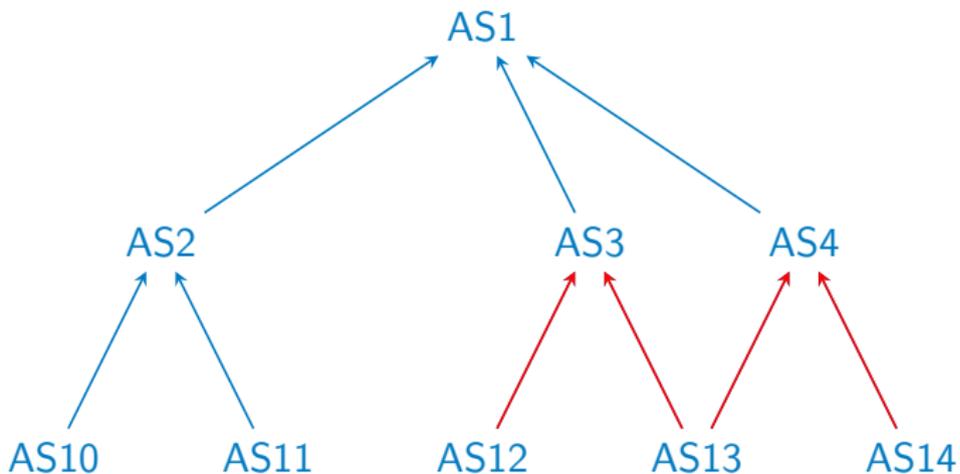
Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse





# Beispiel für AS-Beziehungen

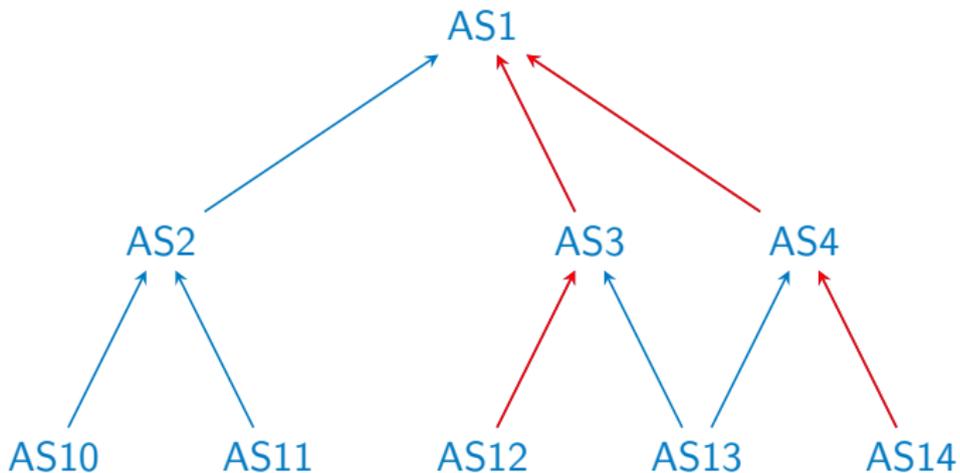
Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse





# Beispiel für AS-Beziehungen

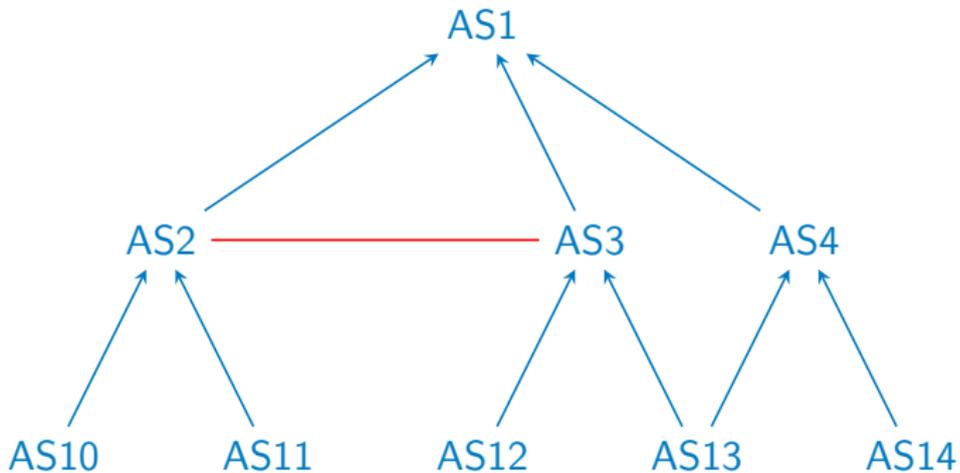
Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse





Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

- 1 Internet Algorithmik
- 2 Routing im Internet
- 3 Inferenz der AS-Beziehungen**
- 4 Azyklische AS-Beziehungen
- 5 Ergebnisse



# Betrachtetes Problem

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

## Aufgabenstellung

Gegeben eine Menge von AS-Pfaden, konstruiere den AS-Graphen (einfach) und markiere die Kanten mit Beziehungen aus  $\{\rightarrow, \leftarrow, \leftrightarrow, -\}$ , so dass die AS-Pfade *zulässig* sind bzgl. der selective export rule.

## Eingabedaten

AS-Pfade aus Routing-Tabellen öffentlich zugänglicher Router und von BGP-Beacons. Daten können auch Fehler enthalten.



- Viele Anwendungen benötigen BGP-Policies als Eingabe
  - BGP-Simulation
  - Analyse von BGP-Instabilitäten
- Konsistenztests zur Verwaltung des Internets
- Optimierung des Internetbetriebs
- Basis für geschäftliche Entscheidungen



# Beispiel

## Pfadmenge:

- AS1, AS2, AS3, AS4
- AS5, AS2, AS3

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse



# Beispiel

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

Pfadmenge:

- AS1, AS2, AS3, AS4
- AS5, AS2, AS3

AS-Graph





# Beispiel

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

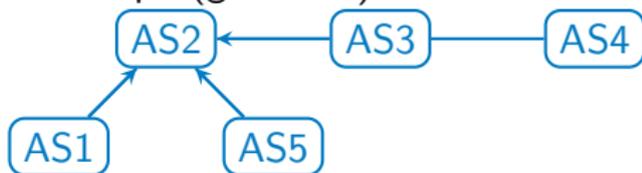
Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

Pfadmenge:

- AS1, AS2, AS3, AS4
- AS5, AS2, AS3

AS-Graph (gerichtet)





# Beispiel

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

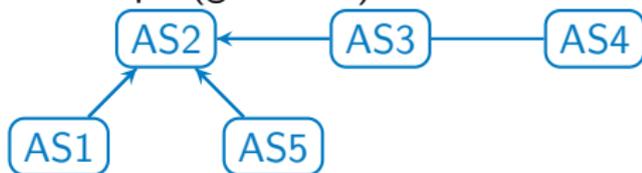
Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

Pfadmenge:

- AS1, AS2, AS3, AS4
- AS5, AS2, AS3

AS-Graph (gerichtet)



Gerichtete Pfade:

- AS1 → AS2 ← AS3 — AS4
- AS5 → AS2 ← AS3



## Vereinfachung ab hier:

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

Betrachten nur noch  $\leftarrow$  und  $\rightarrow$ -Kanten, weil

- sibling-to-sibling-Kanten machen alle Probleme NP-hart
- peer-to-peer-Kanten lassen sich immer geeignet durch  $\leftarrow$  und  $\rightarrow$  ersetzen ohne das Modell zu verletzen



# Senkenfreiheit

## Theorem [Gao, 2001]

Graph ist genau dann zulässig bzgl. der selective export rule, wenn alle AS-Pfade *senkenfrei* orientiert, d.h. nur mit  $\rightarrow^* \leftarrow^*$  markiert sind.

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse



# Senkenfreiheit

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

## Theorem [Gao, 2001]

Graph ist genau dann zulässig bzgl. der selective export rule, wenn alle AS-Pfade *senkenfrei* orientiert, d.h. nur mit  $\rightarrow^* \leftarrow^*$  markiert sind.

## Beispiele

Erlaubt:  $\rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow$ ,  $\leftarrow \leftarrow \leftarrow$ ,  $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow$

Nicht erlaubt:  $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow \rightarrow$ ,  $\leftarrow \rightarrow$



# Senkenfreiheit

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

## Theorem [Gao, 2001]

Graph ist genau dann zulässig bzgl. der selective export rule, wenn alle AS-Pfade *senkenfrei* orientiert, d.h. nur mit  $\rightarrow^* \leftarrow^*$  markiert sind.

## Beispiele

Erlaubt:  $\rightarrow \rightarrow \leftarrow \leftarrow$ ,  $\leftarrow \leftarrow \leftarrow$ ,  $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow$

Nicht erlaubt:  $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \leftarrow \rightarrow$ ,  $\leftarrow \rightarrow$

## Beweisidee

Eine Senke ( $\leftarrow \rightarrow$ ) bedeutet, dass ASe Daten über einen gemeinsamen Kunden ausgetauscht haben, was ja genau die *selective export rule* verhindert.



# Heuristik nach Gao (2001)

## Idee

- für jeden Pfad finde „größtes“ AS  $v$
- orientiere alle Kanten in Richtung  $v$
- Größe wird proportional zum Grad im AS-Graphen angenommen
- Kanten die mit  $\rightarrow$  und  $\leftarrow$  markiert sind, sind wohl sibling-to-sibling Kanten

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse



# Heuristik nach Gao (2001)

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

## Idee

- für jeden Pfad finde „größtes“ AS  $v$
- orientiere alle Kanten in Richtung  $v$
- Größe wird proportional zum Grad im AS-Graphen angenommen
- Kanten die mit  $\rightarrow$  und  $\leftarrow$  markiert sind, sind wohl sibling-to-sibling Kanten

## Probleme

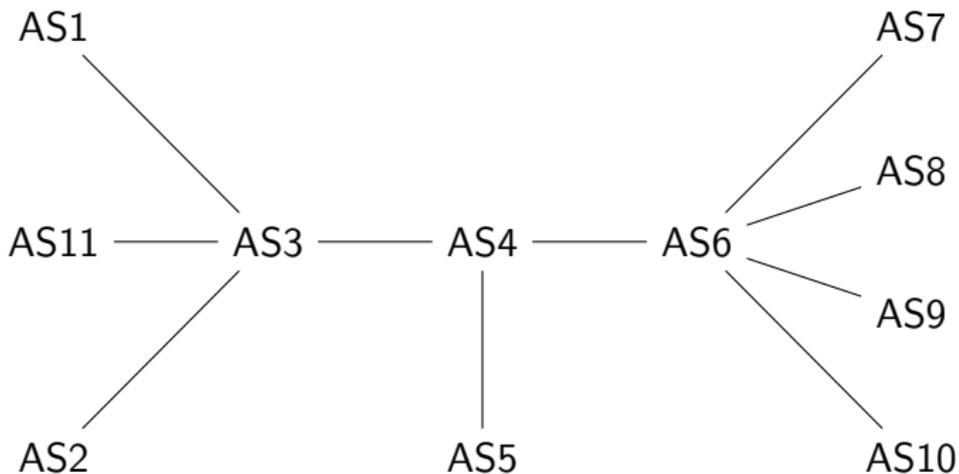
- Größenannahme sehr grob
- Fehler in den Daten führen zu (unrealistisch) vielen sibling-Kanten



## Beispiel (Gao-Heuristik)

Pfad 1: AS2 – AS3 – AS4 – AS6 – AS9

Pfad 2: AS1 – AS3 – AS4 – AS5

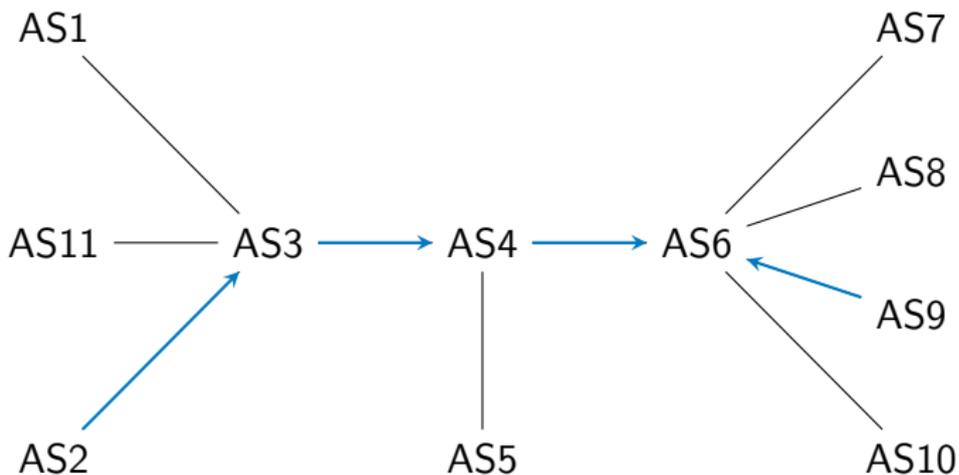




## Beispiel (Gao-Heuristik)

Pfad 1: AS2 – AS3 – AS4 – AS6 – AS9

Pfad 2: AS1 – AS3 – AS4 – AS5

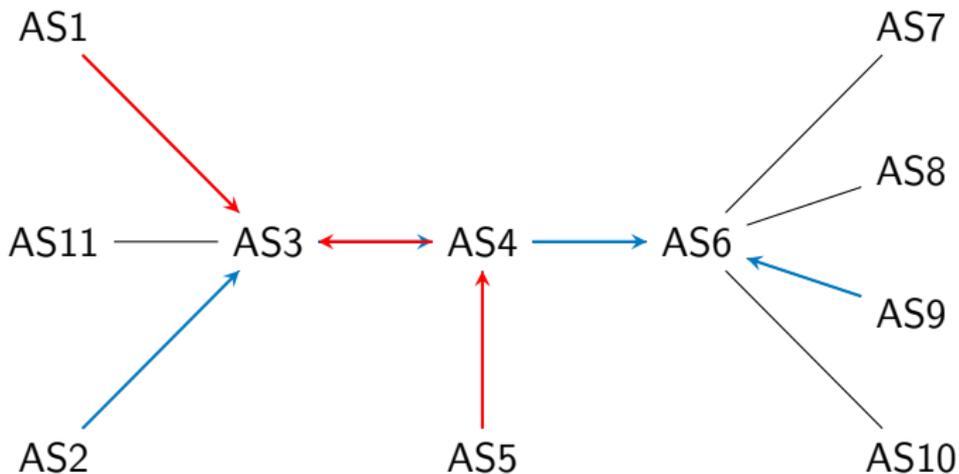




# Beispiel (Gao-Heuristik)

Pfad 1: AS2 – AS3 – AS4 – AS6 – AS9

Pfad 2: AS1 – AS3 – AS4 – AS5

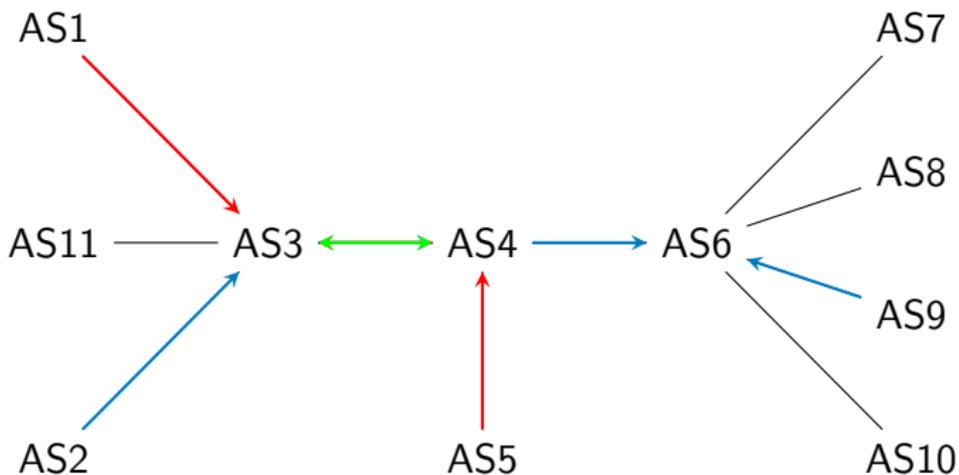




# Beispiel (Gao-Heuristik)

Pfad 1: AS2 – AS3 – AS4 – AS6 – AS9

Pfad 2: AS1 – AS3 – AS4 – AS5





# Kombinatorischer Ansatz [DiBattista, Erlebach, et al., 2006]

## Idee

- Betrachtet man Pfade der Länge 2, ist nur das Muster  $\leftarrow \rightarrow$  verboten
- Längere Pfade lassen sich durch überlappende kurze Pfade darstellen

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse



# Kombinatorischer Ansatz [DiBattista, Erlebach, et al., 2006]

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

## Idee

- Betrachtet man Pfade der Länge 2, ist nur das Muster  $\leftarrow \rightarrow$  verboten
- Längere Pfade lassen sich durch überlappende kurze Pfade darstellen

## Algorithmus

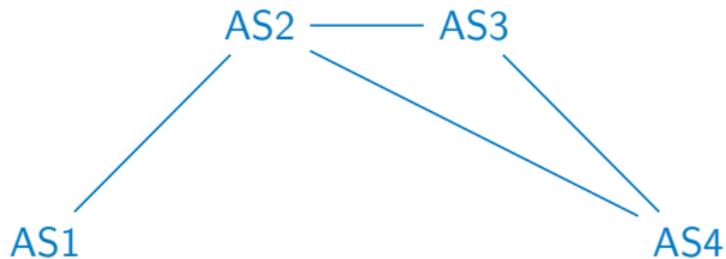
- orientiere AS-Graph beliebig
- weise jeder Kante  $v$  boolesche Variable  $x_v$  zu; ist die Variable *wahr*, wird die Kante später umgedreht
- für jedes Kantenpaar in einem AS-Pfad: formuliere verbotenes Muster als Disjunktion der beiden Variablen
- Löse 2-SAT-Problem, das sich aus Konjunktion der „Verbotsmuster“ ergibt



# Beispiel für 2-SAT-Ansatz

Pfad 1: AS1 – AS2 – AS3 – AS4

Pfad 2: AS1 – AS2 – AS4



Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

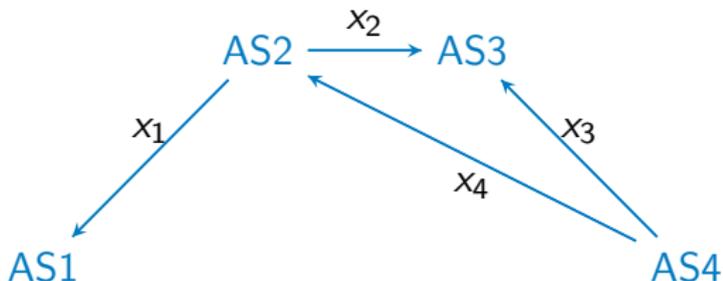
Ergebnisse



## Beispiel für 2-SAT-Ansatz

Pfad 1:  $AS1 \leftarrow AS2 \rightarrow AS3 \leftarrow AS4$

Pfad 2:  $AS1 \leftarrow AS2 \leftarrow AS4$

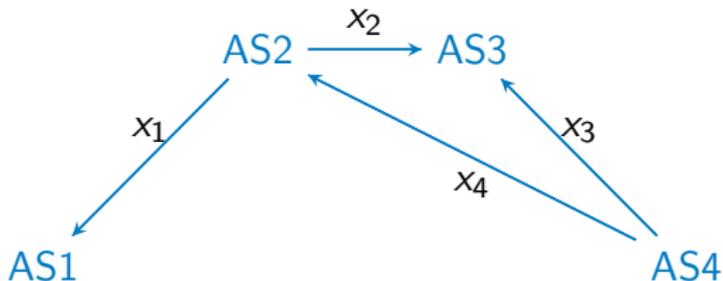




## Beispiel für 2-SAT-Ansatz

Pfad 1:  $AS1 \leftarrow AS2 \rightarrow AS3 \leftarrow AS4$

Pfad 2:  $AS1 \leftarrow AS2 \leftarrow AS4$



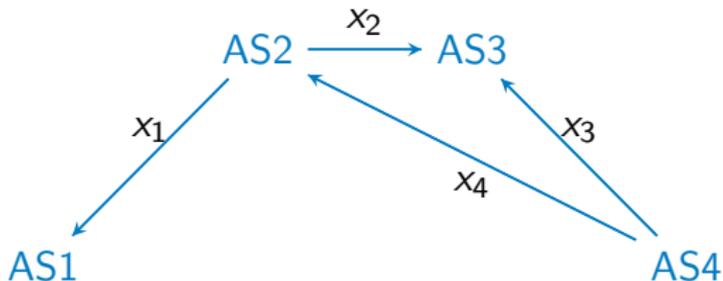
SAT-Formel:  $(x_1 \vee x_2) \wedge (\neg x_2 \vee \neg x_3) \wedge (x_1 \vee \neg x_4)$



# Beispiel für 2-SAT-Ansatz

Pfad 1:  $AS1 \leftarrow AS2 \rightarrow AS3 \leftarrow AS4$

Pfad 2:  $AS1 \leftarrow AS2 \leftarrow AS4$



SAT-Formel:  $(x_1 \vee x_2) \wedge (\neg x_2 \vee \neg x_3) \wedge (x_1 \vee \neg x_4)$

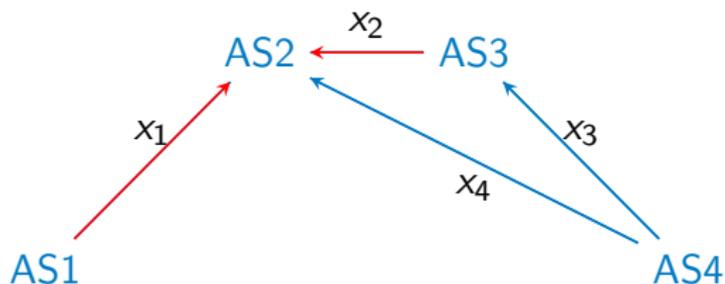
Lösung:  $x_1 = x_2 = \text{true}$ ,  $x_3 = x_4 = \text{false}$



# Beispiel für 2-SAT-Ansatz

Pfad 1: AS1  $\rightarrow$  AS2  $\leftarrow$  AS3  $\leftarrow$  AS4

Pfad 2: AS1  $\rightarrow$  AS2  $\leftarrow$  AS4



SAT-Formel:  $(x_1 \vee x_2) \wedge (\neg x_2 \vee \neg x_3) \wedge (x_1 \vee \neg x_4)$

Lösung:  $x_1 = x_2 = \text{true}$ ,  $x_3 = x_4 = \text{false}$



# Von Erfüllbarkeit zur Maximierung

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

- Vorgestellter Ansatz testet nur Erfüllbarkeit
- Reale Instanzen meist nicht erfüllbar
  - Modell zu ungenau
  - Fehler in den Daten
- Einfache heuristische Erweiterung:
  - Wenn Instanz nicht lösbar, entferne „am meisten störenden“ Pfad
  - Aktualisiere 2-SAT Instanz
  - Löse neu



Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

- 1 Internet Algorithmik
- 2 Routing im Internet
- 3 Inferenz der AS-Beziehungen
- 4 Azyklische AS-Beziehungen**
- 5 Ergebnisse



# Neuer Ansatz

## Bisher:

- Orientierung nur eingeschränkt durch Senkenfreiheit
- ... und ein paar ad-hoc Heuristiken (Gao)

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

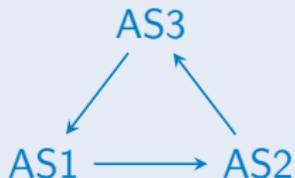


# Neuer Ansatz

## Bisher:

- Orientierung nur eingeschränkt durch Senkenfreiheit
- ... und ein paar ad-hoc Heuristiken (Gao)

## Ist das eine gültige Orientierung?



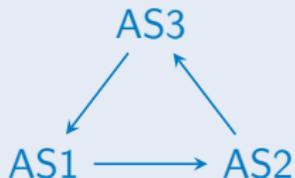


# Neuer Ansatz

## Bisher:

- Orientierung nur eingeschränkt durch Senkenfreiheit
- ... und ein paar ad-hoc Heuristiken (Gao)

## Ist das eine gültige Orientierung?



Wenn eines der 3 ASe seinen „Vertrag“ kündigt, hat es trotzdem noch volle Konnektivität!



## Neue Aufgabenstellung

Gegeben eine Menge von AS-Pfaden, konstruiere den AS-Graphen und markiere die Kanten mit Beziehungen aus  $\{\rightarrow, \leftarrow\}$ ,

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse



## Neue Aufgabenstellung

Gegeben eine Menge von AS-Pfaden, konstruiere den AS-Graphen und markiere die Kanten mit Beziehungen aus  $\{\rightarrow, \leftarrow\}$ , so dass alle AS-Pfade **senkenfrei** sind und der Graph **azyklisch** ist.

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse



# Azyklische Inferenz [Kosub, Maaß, Täubig, 2006]

## Neue Aufgabenstellung

Gegeben eine Menge von AS-Pfaden, konstruiere den AS-Graphen und markiere die Kanten mit Beziehungen aus  $\{\rightarrow, \leftarrow\}$ , so dass alle AS-Pfade **senkenfrei** sind und der Graph **azyklisch** ist.

## Lösungsidee

- Wenn ein AS auf allen Pfaden am Rand ist, richtet man „am wenigsten Schaden“ an, wenn man alle Kanten von ihm weg orientiert
- Wiederholt man das mit allen ASen (bei Anpassung der Pfade) wird der Graph automatisch azyklisch (analog zu topologischer Sortierung)

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse



# Algorithmus für azyklische Inferenz

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

Solange noch nicht-leere AS-Pfade vorhanden sind:

- Wähle AS  $v$ , das in keinem AS-Pfad *innen* steht
- Gibt es so eines nicht, ist die Instanz unlösbar
- Orientiere alle (nicht-orientierten) Kanten im AS-Graph von  $v$  weg
- Entferne  $v$  aus allen AS-Pfaden



# Beispiel für azyklische Inferenz

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

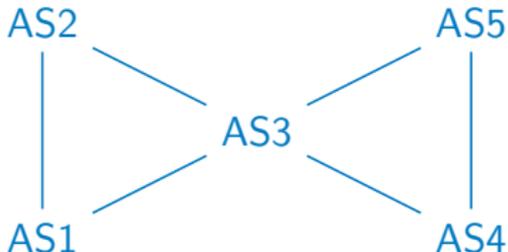
Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

Pfad 1: AS2 – AS1 – AS3 – AS5 – AS4

Pfad 2: AS1 – AS2 – AS3 – AS4





# Beispiel für azyklische Inferenz

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

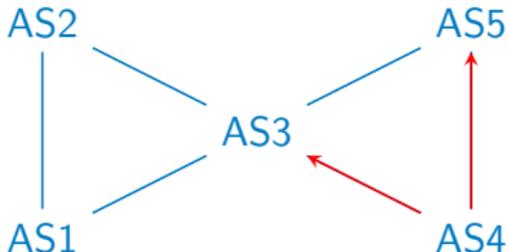
Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

Pfad 1: AS2 – AS1 – AS3 – AS5 ← AS4

Pfad 2: AS1 – AS2 – AS3 ← AS4





# Beispiel für azyklische Inferenz

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

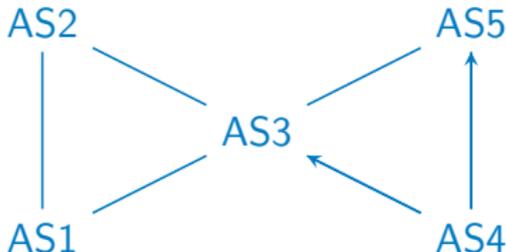
Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

Pfad 1: AS2 – AS1 – AS3 – AS5 ← AS4

Pfad 2: AS1 – AS2 – AS3 ← AS4





## Beispiel für azyklische Inferenz

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

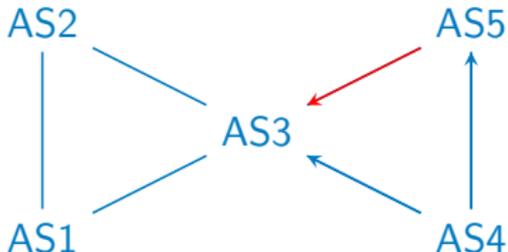
Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

Pfad 1: AS2 – AS1 – AS3 ← AS5 ← AS4

Pfad 2: AS1 – AS2 – AS3 ← AS4





# Beispiel für azyklische Inferenz

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

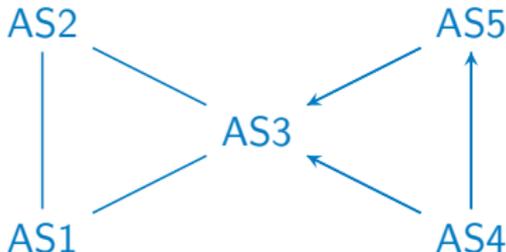
Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

Pfad 1: AS2 – AS1 – AS3 ← AS5 ← AS4

Pfad 2: AS1 – AS2 – AS3 ← AS4





# Beispiel für azyklische Inferenz

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

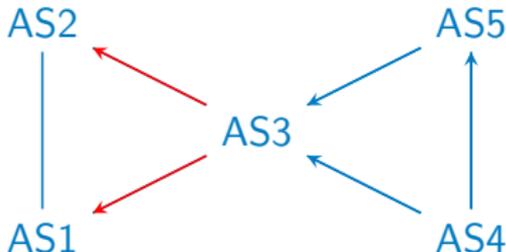
Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

Pfad 1: AS2 – AS1 ← AS3 ← AS5 ← AS4

Pfad 2: AS1 – AS2 ← AS3 ← AS4





# Beispiel für azyklische Inferenz

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

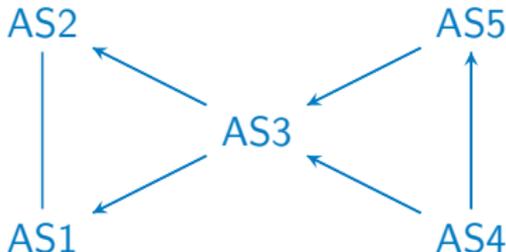
Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

Pfad 1: AS2 – AS1 ← AS3 ← AS5 ← AS4

Pfad 2: AS1 – AS2 ← AS3 ← AS4





# Beispiel für azyklische Inferenz

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

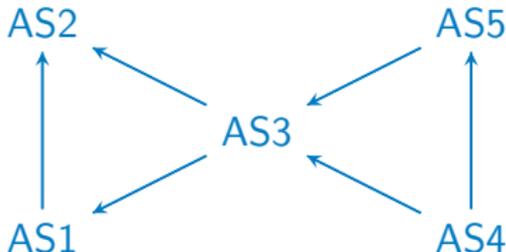
Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

Pfad 1: AS2 ← AS1 ← AS3 ← AS5 ← AS4

Pfad 2: AS1 → AS2 ← AS3 ← AS4





# Eine unlösbare Instanz

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

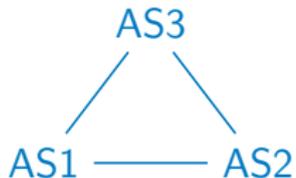
Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

Pfad 1: AS1 – AS2 – AS3

Pfad 2: AS2 – AS3 – AS1

Pfad 3: AS3 – AS1 – AS2





# Eine unlösbare Instanz

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

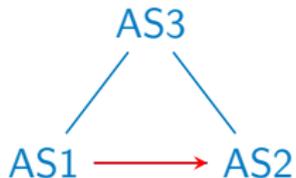
Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

Pfad 1: AS1  $\rightarrow$  AS2 – AS3

Pfad 2: AS2 – AS3 – AS1

Pfad 3: AS3 – AS1  $\rightarrow$  AS2





# Eine unlösbare Instanz

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

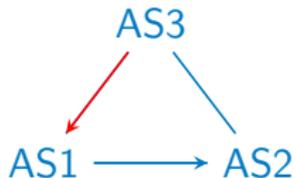
Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

Pfad 1: AS1  $\rightarrow$  AS2 – AS3

Pfad 2: AS2 – AS3  $\rightarrow$  AS1

Pfad 3: AS3  $\rightarrow$  AS1  $\rightarrow$  AS2





# Eine unlösbare Instanz

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

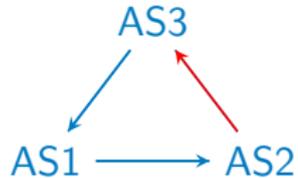
Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

Pfad 1: AS1  $\rightarrow$  AS2  $\rightarrow$  AS3

Pfad 2: AS2  $\rightarrow$  AS3  $\rightarrow$  AS1

Pfad 3: AS3  $\rightarrow$  AS1  $\rightarrow$  AS2





# Azyklische Heuristik

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

- Analog zum kombinatorischen Ansatz werden nur erfüllbare Instanzen gelöst
- Deshalb wieder heuristische Erweiterung:
  - Wenn Instanz nicht lösbar, entferne „am meisten störenden“ Pfad
  - Löse neu
- Effiziente Einbettung in den bestehenden Algorithmus möglich (kein asymptotischer Mehraufwand)
- Transparente Behandlung von Vorwissen
- Strategien zum Wiedereinfügen entfernter Pfade



Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

- 1 Internet Algorithmik
- 2 Routing im Internet
- 3 Inferenz der AS-Beziehungen
- 4 Azyklische AS-Beziehungen
- 5 Ergebnisse



# Experimenteller Vergleich der Algorithmen

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

## Algorithmen

- Gao
- Derandomisierter Approximationsalgorithmus (APX)
- Kombinatorisch/2-SAT (DPP\*)
- Azyklische Heuristik (AHeu)

## Referenzdaten

- WHOIS (RPSL)
- BGP Communities-Attribut (AS-Pfade)



# Kennzahlen zu den Referenzdaten

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse

AS paths	2002680 paths (average length 3.43) containing 21862 ASes and inducing 56922 AS pairs
reliable edge set	2739 customer-to-provider edges 2000 peer-to-peer edges
full edge set	8850 customer-to-provider edges 5434 peer-to-peer edges



# Ergebnis

Algorithm	Invalid paths	Misclassified c-to-p for reliable edge set
Gao	27.366% (249 not valley-free) (547811 with s-to-s edge)	1.387% (4 as p-to-c) (34 as s-to-s)
APX	4.483% (89775 not valley-free)	5.330% (146 as p-to-c)
DPP*	0.519% (10391 not valley-free)	0.913% (25 as p-to-c)
AHeu ( $W = 10$ )	0.483% (9666 not valley-free)	0.292% (8 as p-to-c)
AHeu ( $W = 10$ ) readd( $k = 10$ )	0.413% (8278 not valley-free)	0.329% (9 as p-to-c)

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

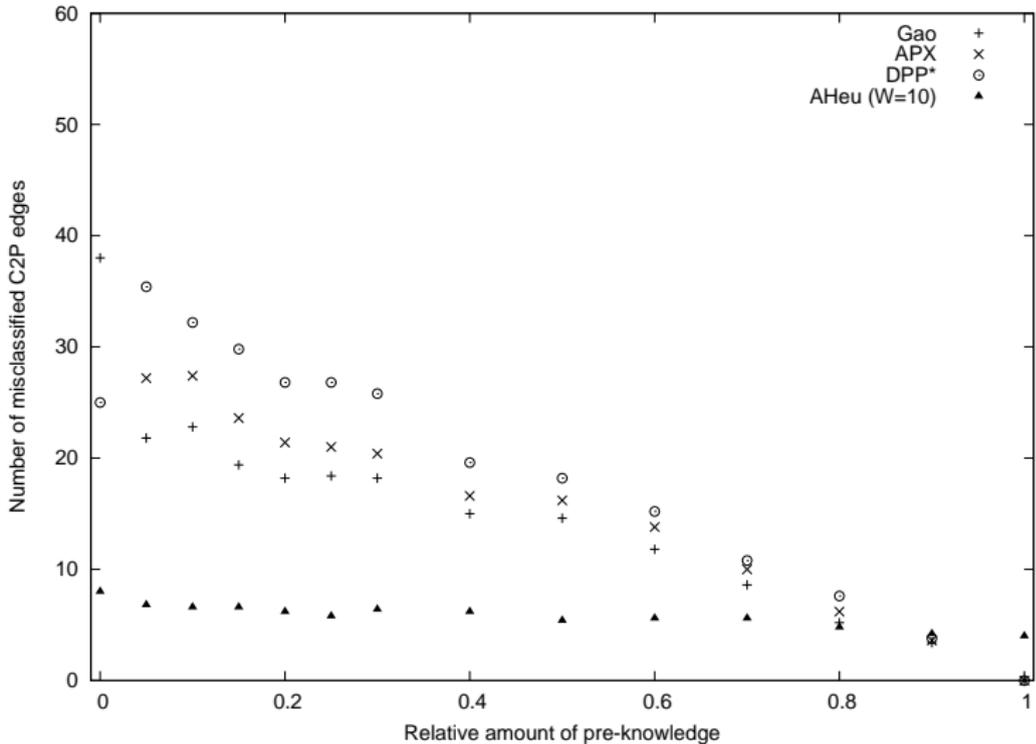
Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse



# Nutzung von Vorwissen (1)

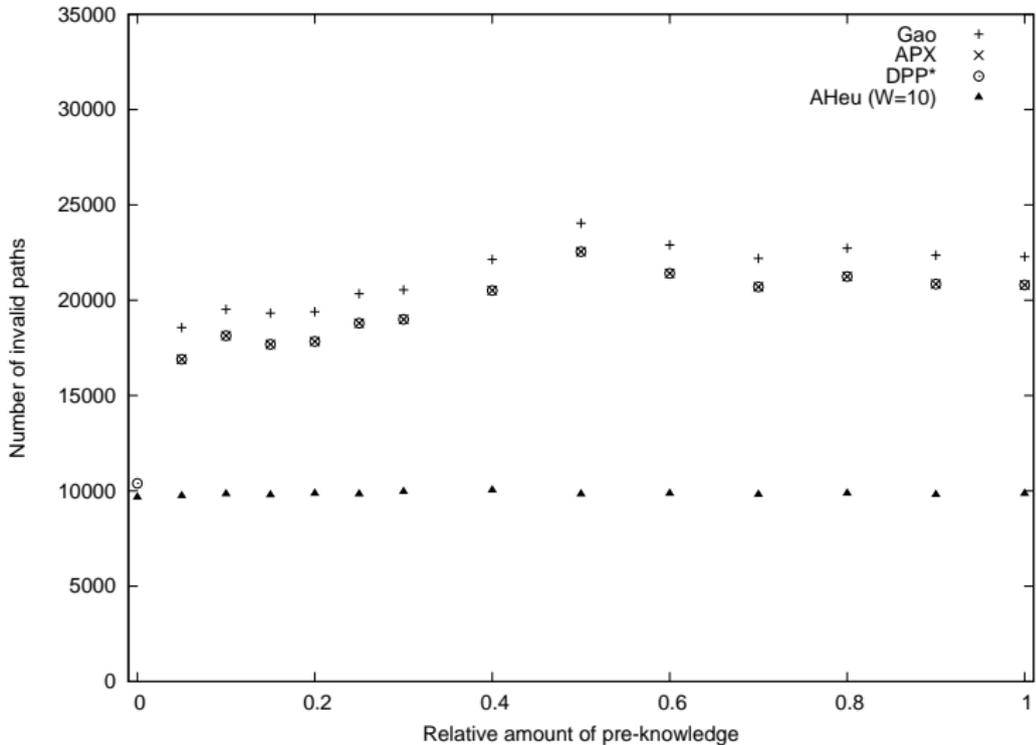
Internet  
Algorithmik  
Routing im  
Internet  
Inferenz der  
AS-  
Beziehungen  
Azyklische AS-  
Beziehungen  
Ergebnisse





# Nutzung von Vorwissen (2)

Internet  
Algorithmik  
Routing im  
Internet  
Inferenz der  
AS-  
Beziehungen  
Azyklische AS-  
Beziehungen  
Ergebnisse





## Schon erledigt

- Behandlung von peer-to-peer und sibling-to-sibling Kanten in den Algorithmen
- Approximationsgarantien (Algorithmus APX)
- Beweise für NP-Härte und Nicht-Approximierbarkeit

Internet  
Algorithmik

Routing im  
Internet

Inferenz der  
AS-  
Beziehungen

Azyklische AS-  
Beziehungen

Ergebnisse



## Schon erledigt

- Behandlung von peer-to-peer und sibling-to-sibling Kanten in den Algorithmen
- Approximationsgarantien (Algorithmus APX)
- Beweise für NP-Härte und Nicht-Approximierbarkeit

## Noch offen

- Besseres Modell für Kreisfreiheit mit Peering-Beziehungen (und Inferenz-Heuristik dafür)
- Beweis, dass das azyklische Modell „richtig“ ist (z.B. mit Spieltheorie)
- Anwendung auf verfeinertes Modell von BGP