

Technische Universität Berlin
Seminar Internet Routing
Betreuer: Jörg Wallerich

TRAFFIC ENGINEERING WITH TRADITIONAL IP ROUTING PROTOCOLS

In "Traffic Engineering with Traditional IP Routing Protocols" [1] wird untersucht, ob herkömmliche Routingprotokolle wie OSPF innerhalb eines Autonomen Systems sich im Hinblick auf optimale Lastverteilung und Leistung optimieren lassen. Der Verkehr innerhalb eines solchen Netzes soll möglichst effizient und gleichverteilt geroutet werden, ohne dass dafür Protokollmodifikationen erforderlich werden, die eine Anpassung der Routersoftware erfordern. Diese Ausarbeitung ist eine Zusammenfassung des Papers im Rahmen des Seminars "Internet Routing".

Florian Holzauer
fh-tu@fholzauer.de
18. Januar 2008

1 Einleitung

Firmen-, Universitäten-, Provider- und andere grosse IP-Netzwerke sind meist komplexe, netztopologisch und geographisch verteilte Netze, die aus Redundanzgründen oft auch auf verschiedenen Wegen miteinander verbunden sind. Meist sind die Endpunkte, also Arbeitsplätze innerhalb einer Firma oder Kunden eines Providers an einen Router angebunden, der die Daten von dort aus weiterreicht. Protokolle wie OSPF (Open Shortest Path First) [3] oder IS-IS (Intermediate System to Intermediate System Protocol) sorgen dafür, dass die Daten zuverlässig das Ziel erreichen, und dass im Fehlerfall die Wege zwischen den Routern so angepasst werden, dass trotz Ausfall einer Verbindung die Daten auf einem anderen Weg ihr Ziel erreichen, soweit das möglich ist (Abbildung 1). Um eine solche Redundanz zu erreichen existieren oft unterschiedliche Wege zwischen den einzelnen Routern - die Router tauschen untereinander regelmässig Topologieinformationen aus, um die Routingtabellen zu aktualisieren.

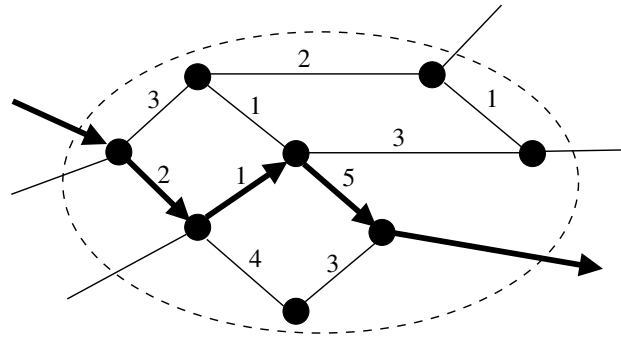


Abbildung 1: Beispiel Routingnetz

Diese Routen unterscheiden sich oft durch diverse Eigenheiten wie Auslastung, Bandbreite, Jitter, Latenz oder Kosten. In dieser Ausarbeitung soll zunächst auf herkömmliche Metriken zur Routenbestimmung eingegangen werden, sowie einige neuere Ansätze zur homogeneren Lastverteilung aufgezeigt und analysiert werden. Alle Überlegungen und Analysen entstammen dem Paper "Traffic Engineering With Traditional IP Routing Protocols".

Diese Ausarbeitung zeigt zunächst grundlegende Anmerkungen zu der Eignung von Intradomain Routing Protokollen wie OSPF auf und geht anschliessend auf den Mechanismus sowie Leistungsaspekte ein, und vergleicht verschiedene traditionelle Routinggewichtungen mit der leistungsoptimierten Version. Der Begriff eines Netzes beschränkt hier auf den Kern bzw. Backbone eines Netzes, also den Datenverkehr zwischen Routern die über mehr als eine Netzwerkverbindung zum Netz verfügen ("multihomed"). Für Endpunkte oder Router mit nur einem Upstream

ist es aus offensichtlichen Gründen unmöglich, das Routing zu optimieren, da es keine Alternativrouten gibt.

In folgenden Kapitel werden zunächst einige Überlegungen zur generellen Eignung von Routingprotokollen wie OSPF zur Lastverteilung aufgezeigt. Kapitel 3 beschreibt anschliessend das Prinzip und den Ablauf dieser Routenoptimierung, das in Kapitel 4 dann mit anderen Mechanismen verglichen und bewertet wird. Kapitel 5 rundet diese Zusammenfassung dann mit einem Fazit ab.

Die folgenden Überlegungen und Analysen beschränken sich auf Routing innerhalb eines Netzes, also nicht Routing zwischen verschiedenen Autonomen Systemen. Dort wird mit BGP (Border Gateway Protocol) nicht nur ein anderes Routingprotokoll genutzt, auch ist hier die Problemstellung eine andere, da nur schwer Einfluss auf andere externe Netze zu nehmen ist. Wichtig ist ausserdem, dass sogenannte Interior Gateways Protokolle (IGP) wie OSPF nur von Routern "gesprochen" wird, nicht von jedem Netz innerhalb eines Systems - für normale Endpunkte innerhalb des Netzes sollte Routing vollkommen transparent funktionieren.

2 IGP-Eignung für Lastverteilung

IGPs wie OSPF wählen ihre Routingpfade durch Topologieinformationen, bei denen jeder Hop mit einer Gewicht, manchmal auch Kosten genannt, versehen ist. Mittels Dijkstras Algorithmus wird der Weg zwischen Start und Ziel bestimmt, der möglichst kosteneffizient (meistens: möglichst kurz) ist. In herkömmlichen Konfigurationen wird diese Gewichtung meist manuell durch den System-Administrator vorgenommen.

Traditionell wird OSPF dazu genutzt, bei Ausfall einer Leitung automatisch eine andere Route zu nutzen, um so Ausfallsicherheit herzustellen. Im Folgendem soll die Frage betrachtet werden, ob man mit OSPF ausserdem auch eine möglichst homogene Lastverteilung innerhalb eines Netzes bewirken kann.

Auf den ersten Blick scheint dieser Ansatz nicht sonderlich vielversprechend - die oben genannten Routingprotokolle basieren auf einem simplen statischen Gewicht in Form einer positiven Integer-Zahl, der Mechanismus berücksichtigt normalerweise nicht dynamisch Verkehrsschwankungen und andere Änderungen. Hierfür existieren verschiedene Protokollergänzungen, deren großer Nachteil allerdings darin bestehen, dass sie Modifikationen des Routingprotokolls sowie laufende Verkehrsanalysen der Router erfordern.

Dass eine Entlastung stark genutzter Routen innerhalb eines Netzes schon durch intelligente Wahl der Routengewichtung möglich ist, zeigt sich schon durch ein simples Gedankenexperiment mit dem skizzierten Netz in Abbildung 2. Die vier Knoten q, r, s und w senden alle an den Zielknoten t . Das Verkehrsaufkommen zu t ist von jedem Knoten aus gleich stark, in den Beispielen jeweils eine "Trafficein-

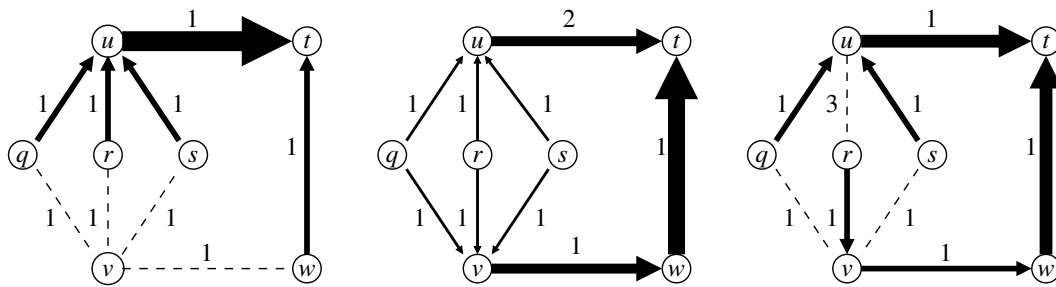


Abbildung 2: Auswirkungen von Gewichtsänderungen bei gleichem Verkehr: Die Pfeile zeigen das Verkehrsaufkommen, die Dicke entspricht der Auslastung. q, r, s und w senden jeweils gleichviel an t , die Zahlen an den Pfeilen entspricht den Routinggewichten. Gestrichelte Linien haben kein Verkehrsaufkommen.

heit". Nun soll dieses Szenario so optimiert werden, dass der Verkehr möglichst gleichverteilt zu t gelangt.

- Gleiches Gewicht bei allen Links: Der gesamte Verkehr von q, r, s wird über u geleitet, die Verbindung zwischen u und t hat eine Last von 3.
- Lokale Gewichts Anpassung bei überlasteten Links: Das Gewicht der überlasteten Strecke wird erhöht, um so die Daten umzulenken. Die Knoten q, r, s senden also insgesamt 1,5 Traffic-Einheiten zum Knoten u , sowie ebenfalls 1,5 Traffic-Einheiten zu Knoten v . Dadurch wird die Last auf der Verbindung von u zu t wie gewünscht weniger. Gleichzeitig beträgt nun die Last zwischen w und t 2,5, da w ja ebenfalls eine Traffic-Einheit sendet.
- Globale Gewichts Anpassung: Berücksichtigt man das gesamte Netz bei der Lastverteilung statt wie im zweiten Beispiel nur den ursprünglich überlasteten Link zu entlasten, kommt man auf eine Gewichtsverteilung, die unter dem Aspekt der Bandbreitenverteilung optimal ist.

Man sieht an diesem einfach gewählten Beispiel, dass es durchaus möglich ist, mehr als nur eine reine Ausfallsicherheit zu erreichen. Im Folgenden wird deutlich, dass es mit automatisch gewählten statischen Linkgewichten realisierbar ist, nahezu gleich optimale Ergebnisse beim Routing zu erhalten wie mit einem optimalen Routing-Protokoll, bei dem komplette Flexibilität in der Pfadwahl herrscht.

2.1 Vorteile der Nutzung von traditionellen IGP

Ein optimales Routing-Protokoll mit vollständiger Flexibilität hat offensichtlich weitere Vorteile beim Routing gegenüber einem Ansatz, der auf Optimie-

rung der statischen Linkgewichte basiert. Allerdings hat es auch Vorteile, traditionelles IGP wie OSPF zu nutzen. Kernpunkt des in [1] beschriebenen Frameworks ist es, dass die Routingoptimierung komplett in einem externen System stattfinden kann. Die gesamte Berechnung der Gewichte kann ausserhalb der Router im Netz auf einem dedizierten Rechner stattfinden. Dieser Ansatz bringt einige Vorteile mit sich. Da so die Routingoptimierung aus einer "globalen" Perspektive stattfinden kann. Würde jeder Router eigenständig Routingoptimierungen vornehmen würde das neben einer größeren Komplexität der Routersoftware auch Zeitprobleme mit sich führen, so wäre es zum Beispiel nicht sichergestellt, dass jeder Router zu jeder Zeit aktuelle Informationen über den Zustand des kompletten Netzes besitzt. Durch eine zentral vorgegebene und statische Routinggewichtung wird auch verhindert, dass sich lokale Änderungen eines Routers sofort in anderen Änderungen der benachbarten Router niederschlagen - das Routing bleibt so stabil und statisch zwischen zwei globalen Routinganpassungen. Neben Überlastungsaspekten der Router führt [1] auch aus, dass dies die Fehlersuche bei Problemen massiv vereinfacht.

Da die Router selbst nicht Topologieinformationen über das eigentliche Routing hinaus, wie etwa Bandbreiten, austauschen müssen erfordert das Routing nur einen geringen Protokolloverhead, was ebenfalls Last verhindert.

3 Konfigurationsmechanismus

Die Wahl einer Routingkonfiguration wird im beschriebenen Mechanismus in drei Schritten durchgeführt. Nach einer Messung der Rahmenbedingungen – einerseits also Topologie- bzw. Infrastrukturinformationen, andererseits Verkehrsanforderungen – wird das neue Routing modelliert und optimiert, und in einem dritten Schritt dann über die neu berechneten Verbindungsgewichte im gesamten Netz propagiert. Die gesamte Abfolge wird in Abbildung 3 dargestellt.

3.1 Messung

Für eine gute Wahl der Gewichte ist es vor allem relevant, eine komplette und aktuelle Übersicht über das Netz zu haben. Neben den verfügbaren Routern und Links sind auch die Bandbreite sowie aktuelle Auslastung der Links und die bisherige Konfiguration der Routinggewichte relevant. Viele dieser Daten sind über Mechanismen wie SNMP einfach aggregierbar. Auch eine Abschätzung des zukünftigen Verkehrs zwischen jedem Routerpaar im Netz wird benötigt. Diese Abschätzung kann durch vergangene Verkehrsstatistiken oder Verbrauchsankündigungen der einzelnen Knoten erfolgen, wie etwa die maximale Vertrags-Bandbreite jedes Kunden im Netz eines Providers. Verkehr an den Gateways zu anderen Netzen, Mes-

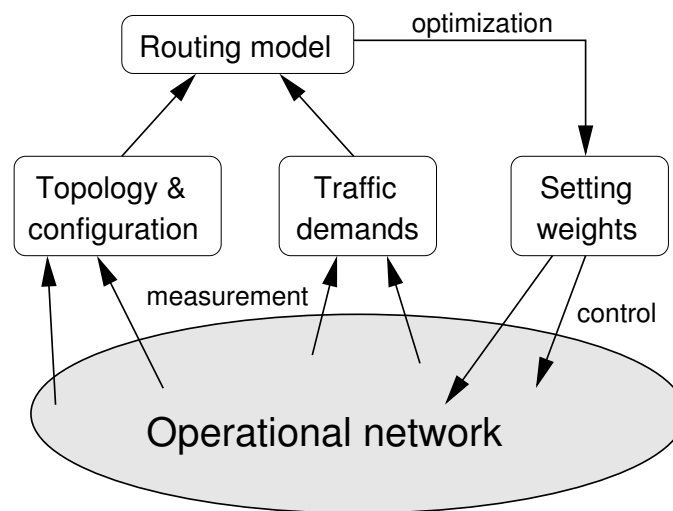


Abbildung 3: Ablauf einer neuen Routingkonfiguration.

sungen der Router oder dedizierter Messpunkte im Backbone sind ebenfalls Datenquellen, die zur Abschätzung der Verkehrsentwicklung genutzt werden können.

3.2 Modellierung

Die Modellierung der Verkehrsrouten findet statt, indem man für jedes mögliche Routerpaar mehrere möglichst gute Verbindungen berechnet - bei IGP-Mechanismen wird der Verkehr gleichmässig auf alle mittels Dijkstra berechneten kürzesten, oder im Fall von Advanced OSPF besser 'idealen', Pfade verteilt. Durch geeignete Wahl der Gewichte kann eine Überlastung von Verbindungen vermieden bzw die Auslastung optimiert werden, wie in [2] oder in Kapitel 4 näher beschrieben wird.

3.3 Konfiguration

Die fertig berechnete Konfiguration der Verbindungsgewichte wird nun automatisiert oder manuell in den Routern konfiguriert. Eine Änderung der Gewichtung sorgt dafür, dass ein Router nun seine 'link state table', die Liste der von sich aus verfügbaren Verbindungen aktualisiert, und diese neue Topologiesicht netzweit propagiert. Mit den Listen, die er von anderen Routern erhält, berechnet ein Router seine Topologiedaten und die daraus resultierenden kürzesten Verbindungen innerhalb eines Netzes, und aktualisiert seine Routingtabellen entsprechend. Während dieser Regenerierung des Netzes besitzen die Router nicht durchgehend die selben Topologiedaten, das Netz ist also inkonsistent. Die so entstehende Last und

Instabilität verdeutlicht, dass eine Änderung der Linkgewichte möglichst selten, idealerweise nicht einmal täglich, erfolgen sollte. Für ein stabiles Netz ist eine seltene Gewichtsänderung essentiell.

4 Analyse und Vergleich

Um den Sinn und die Leistung der Routingoptimierungen bewerten zu können muss auch definiert sein, nach welchen Gesichtspunkten optimiert werden soll. Im Beispiel in Abbildung 2 wurde die Last auf den einzelnen Verbindungen betrachtet, da jedoch Verbindungen unterschiedliche Kapazität haben, macht es im Folgenden Sinn, statt der reinen Last die Auslastung der Verbindungen zu betrachten, also das Verhältnis von genutzter zu maximal verfügbarer Bandbreite. Mit Verbindungskapazität ist also die gewünschte maximale Last gemeint - je nach Anwendungsfall also 100% der verfügbaren Bandbreite, oder aus Schutz gegen plötzliche Verkehrsschwangungen 60%.

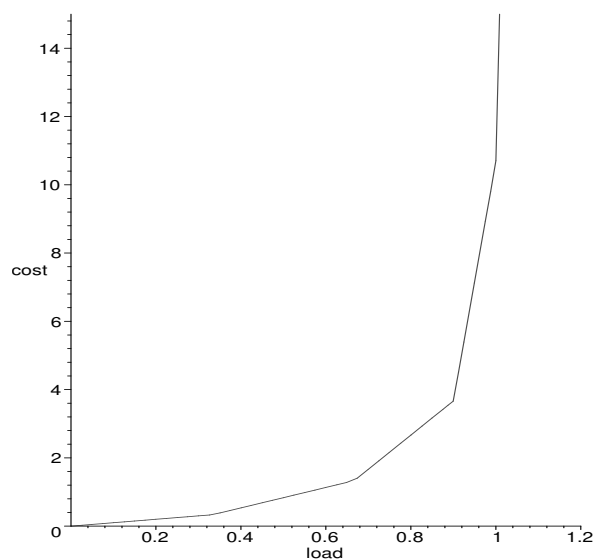


Abbildung 4: Link-Kosten-Funktion

Wie schon ausgeführt ist offensichtlich, dass die Wahl von statischen Gewichten nicht gleich optimal wie eine komplett flexible Wahl des Routings sein kann. Für die Untersuchung, wie gut verschiedene Mechanismen zur Wahl der statischen Verbindungsgewichte geeignet sind ist es daher sinnvoll, die Ergebnisse mit einem optimalen Routing zu vergleichen, also Ergebnisse die im Netzwerk unter Nutzung eines vollständig flexiblen und idealen Routingmechanismus theoretisch möglich sind. Je besser sich die statischen Mechanismen dieser Optimallösung annähern,

destso sinnvoller sind sie. Dieser Optimalvergleich ist in der Bewertung als OPT bezeichnet.

Als anderes Ende der Bewertungsskala empfiehlt es sich, bisherige Standardansätze zur Verbindungsgewichtung zu nutzen. Bei OSPF existieren hier zwei unterschiedliche Mechanismen: Einmal der trivialste Ansatz, jedes Gewicht als 1 zu definieren, so dass über Routing tatsächlich nur der Hopcount zählt, hier UnitOSPF genannt, und der von dem Unternehmen Cisco gewählte Ansatz, die Gewichtung der Links entsprechend der Kapazität eines Links zu wählen, so dass die Verbindung mit der grössten Bandbreite das niedrigste Gewicht bekommt. Im Folgenden wird dieser erste Versuch, die Beschaffenheit der Links mit in die Routenfindung einzubeziehen, als InvCapOSPF bezeichnet.

Der in dieser Ausarbeitung skizzierte und in [2] genauer beschriebene Mechanismus, also Gewichtsbestimmung durch Vorausberechnung bzw Simulation des Netzes und Optimierung auf Lastverteilung, wird AdvancedOSPF genannt.

4.1 Gleichbleibende Anforderungen

Zum Vergleich der verschiedenen Algorithmen soll zunächst das Verhalten in einem Netz mit gleichbleibendem Verkehrsverhalten und entsprechenden Bandbreitenanforderungen analysiert werden. In [2] wird diese Analyse anhand eines geplanten Netzes von AT&T mit 90 Routern und 274 Verbindungen durchgeführt, die Last zwischen jeder Quelle und Ziel ist geschätzt. Mittels AdvancedOSPF durchgeführte Routingoptimierung führte zu einer Verteilung des Verkehrs, die nur um 3% von der Idealverteilung OPT abwich, wohingegen UnitOSPF und InvCapOSPF bis zu 50% mehr Verkehr auf einigen Leitungen verursachte. Wie [1] weiter ausführt kann so durch eine Umstellung von UnitOSPF bzw. InvCapOSPF zu AdvancedOSPF bis zu 50% mehr Verkehrsaufkommen in einem Netz bewältigt werden ohne dass Investitionen in größere Bandbreiten oder Router mit dynamischeren Protokollen nötig werden.

Allerdings kann ein Ansatz wie AdvancedOSPF auch zu Fällen führen, in dem manche Verbindungen deutlich längere Wege mit sich bringen - es macht keinen Sinn, die Auslastung einer Verbindung von 30% auf 20% zu optimieren, wenn die alternative Route deutlich länger ist. Daher führt [2] an, dass AdvancedOSPF um eine weitere Komponente, der sogenannten 'Network wide objective' erweitert werden kann. Nun wird also nicht nur die reine Auslastung jedes einzelnen Links betrachtet, sondern der Algorithmus erweitert, um den Sinn einer Umverteilung besser gewichten zu können. Dies wird durch eine nichtlineare Link-Kostenfunktion wie in Abbildung 4 erreicht - je höher die Auslastung eines Links ist, desto eher lohnt es sich, den Verkehr umzuleiten.

In Abbildung 5 wird gezeigt, wie sich der nun optimierte Algorithmus verhält: In dem AT&T-Netz wird das vorhergesagte Verkehrsaufkommen ('demand') erhöht,

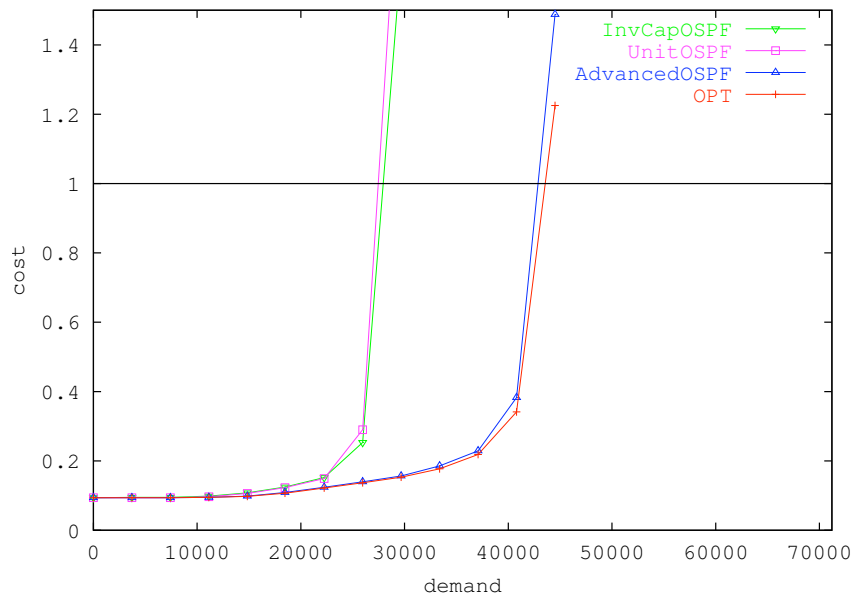


Abbildung 5: Vergleich 1: Steigender Verkehr

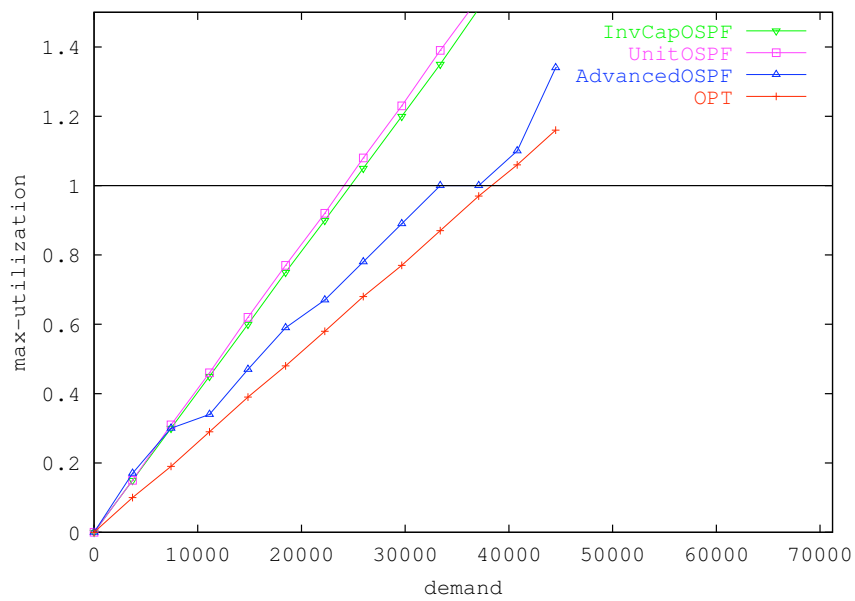


Abbildung 6: Vergleich 2: Linkauslastung

die simulierte Last zwischen jedem Quelle und Ziel, im Folgenden 'set' genannt, also proportional höher. Mit Kosten ist die Summe der Verbindungs-Kosten der eben beschriebenen Funktion im gesamten Netz gemeint - die Kosten sind hier allerdings normalisiert, so dass Kosten von 1 einem überlastetem Netz entsprechen. AdvancedOSPF kann in dieser Simulation 70% mehr Verkehr bewältigen als die beiden 'simplen' OSPF-Mechanismen. Das Optimalrouting übertrifft AdvancedOSPF nur um etwa 2%. Abbildung 6 zeigt das selbe Szenario, allerdings ist hier OPT die optimale Auslastung der einzelnen Links, also ein Indikator für Gleichverteilung des Verkehrs. Auch hier zeigt sich, dass AdvancedOSPF wesentlich besser als herkömmliche Ansätze abschneidet, aber nur 3% unter der optimalen Situation liegt.

Im Rahmen der Analyse zeigte sich laut [1] auch, dass es nur wenig Unterschied macht, den AdvancedOSPF-Mechanismus eher im Hinblick auf die globalen Link-Kosten oder im Hinblick auf die durchschnittliche Auslastung der einzelnen Links zu optimieren, die Ergebnisse unterscheiden sich nur marginal, solange der exponentielle Verlauf der Link-Kosten-Funktion beibehalten wird.

4.2 Dynamischer Verkehr

Natürlich ist in einem produktivem Netz der Verkehr nicht statisch, optimales Routing für einen Werktag tagsüber muss nicht zwangsläufig das selbe wie das für Wochenenden oder Nachts sein. Im Gegensatz zum bislang betrachteten Netz existiert also nicht ein einziges Szenario, auf das optimiert werden kann.

Um diesen Schwankungen gerecht zu werden wurde im simulierten Netz Rauschen hinzugefügt: Die einzelnen Verkehrsschätzungen der Sets wurden mit einem Faktor zwischen 0 und 2 multipliziert. Dieses neue Szenario brachte bei gleichbleibenden Gewichtungen keine größeren Änderungen der Kosten oder Maximallast eines Links - es zeigt sich, dass AdvancedOSPF gut mit kleinen bis mittleren Änderungen in den Anforderungen harmoniert, da in jedem Fall das Netz auf eine möglichst homogene Auslastung bzw Verteilung optimiert ist. Es ist daher ohne große Leistungseinbussen möglich, eine Gewichtung zu bestimmen, die bei normalen Änderungen der Verkehrsanforderungen nicht geändert werden muss.

4.3 Änderungshäufigkeit

Ein weiterer Vorteil von AdvancedOSPF liegt in der niedrigen Änderungshäufigkeit der Gewichtung. Wie schon ausgeführt destabilisiert jede Gewichtsänderung das Netz und verursacht zusätzliche Last auf den Routern sowie selbst Verkehr. Da nur auf größere Probleme wie Leitungsausfälle mit einer Gewichtsänderung reagiert werden muss, kommt diese Änderung sehr selten vor im Vergleich zu einem dynamischen Netz. Genauere Evaluation des simulierten Netzes zeigt, dass

auch bei Ausfall eines Links die Änderungen nicht signifikant genug sind, um eine Gewichtsänderung zu erfordern, AdvancedOSPF zeigt sich als relativ robust gegenüber solchen Störfällen - erst bei Ausfall mehrerer Leitungen ist eine Gewichtsänderung nötig, und auch dann nur bei wenigen Gewichten, so dass die Änderung schnell propagiert.

Angenehmer Nebeneffekt dieser statischen Konfiguration ist die Vereinfachung der Fehlersuche bei Routingproblemen. Ausserdem können Ausfallszenarien oder starke Anforderungsänderungen im zentralen Algorithmus problemlos vorberechnet werden, so dass im Störfall nur die neuen Gewichte verteilt werden müssen - es wird also gegenüber einem Algorithmus der erst im Störfall reagieren kann, wie es bei dynamischen Protokollen der Fall ist, eine Verbesserung der Reaktionsgeschwindigkeit möglich.

5 Resultat

Im Rahmen der Analysen zeigt sich dass intelligente Gewichtung der Links in einem OSPF-Netzwerk sehr gute Resultate in der Lastverteilung zeigt, und trotzdem ein robustes und fehlertolerantes Netz realisierbar ist. Die Vorteile des Ansatzes von AdvancedOSPF liegen vor allem darin, dass die eigentliche Berechnung der Idealgewichte nicht in den Routern sondern in einem zentralen System stattfinden kann, es ist keine Änderung an Routersoftware nötig, eine Umsetzung ist also nicht sonderlich preisintensiv. Allerdings kann der hier beschriebene Ansatz nicht in jedem Fall optimal sein - Applikationen im Real-Time-Bereich wie Telefonie benötigen auch möglichst niedrige Latenz und Jitter, beides Faktoren die nicht berücksichtigt wurden. Auch bei stark fehleranfälligen Netzen, die eine sehr häufige Neugewichtung erfordern würden kann ein anderer Mechanismus sinnvoller sein.

In jedem Fall zeigt es sich, dass der Ansatz, Routingprobleme nicht rein im Routingprotokoll zu lösen, sondern auch durch eine netzwerkweite Perspektive durch eine zentrale Entität, überraschend große Vorteile mit sich bringen kann. Die konkrete Entscheidung über Routingmechanismen sind jedoch von Anwendung zu Anwendung verschieden - bei sehr häufigen Verbindungsausfällen und -änderungen wie es etwa in Wireless Mesh Netzwerken der Fall ist, sind andere Algorithmen sinnvoller.

Literatur

- [1] B. Fortz, J. Rexford, and M. Thorup. Traffic engineering with traditional ip routing protocols, 2002.

-
- [2] Bernard Fortz and Mikkel Thorup. Internet traffic engineering by optimizing OSPF weights. In *INFOCOM (2)*, pages 519–528, 2000.
 - [3] John T. Moy. *OSPF: Anatomy of an Internet Routing Protocol*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1998.