

Verfahren zur Stabilisierung des Internet-Routings

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Informatik

Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

Dissertation

von

Götz Lichtwald

aus Heidelberg

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Dezember 2005

Erster Gutachter: Prof. Dr. Martina Zitterbart

Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Dorothea Wagner

Berichte aus der Telematik

Götz Lichtwald

**Verfahren zur Stabilisierung
des Internet-Routings**

Shaker Verlag
Aachen 2006

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2006

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5297-5

ISBN-13: 978-3-8322-5297-7

ISSN 0948-700X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

*Für
Ivonne und Benedikt*

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Telematik der Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH). Mein Dank gilt allen Kollegen, Freunden und Bekannten, die mich während dieser Zeit auf vielfältige Art und Weise unterstützt haben. An dieser Stelle möchte ich mich recht herzlich bei ihnen bedanken.

An erster Stelle gebührt mein Dank Frau Prof. Dr. Martina Zitterbart, die mir die Möglichkeit zur Promotion eröffnet und mich während der gesamten Zeit betreut und unterstützt hat. Durch ihre vielfältigen Ratschläge und Anregungen hat sie meine wissenschaftliche Arbeit und meine Arbeitsweise nachhaltig geprägt. Ferner eröffnete mir Frau Prof. Zitterbart die Möglichkeit meine Arbeit auf nationalen und internationalen Konferenzen vorzustellen. Die auf den Konferenzen geführten Diskussionen und die geknüpften Kontakte haben meine Arbeit positiv beeinflusst und weiter nach vorne gebracht. Während meiner Zeit am Lehrstuhl hat Frau Prof. Zitterbart meine Forschung immer finanziell unterstützt und so die Möglichkeit geschaffen das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren in einer realen Umgebung zu verifizieren.

Bei Frau Prof. Dr. Dorothea Wagner möchte ich mich recht herzlich für die Übernahme des Korreferats bedanken. Trotz ihrer hohen Arbeitslast hat sie mir die Möglichkeit für individuelle Diskussionen eröffnet.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Stefan Dresler, der mir in der Endphase der Promotion mit Rat und Tat zur Seite stand. Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Cornelis Hoogendoorn, Herrn Dr. Joachim Charzinski und Herrn Karl Schrodi, die mit mir im Rahmen des KING-Projekts fruchtbare Diskussionen geführt haben. Besonders Herr Dr. Charzinski hat den Fortschritt meiner Arbeit konstruktiv begleitet.

Ferner möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Telematik für die angenehme und konstruktive Zusammenarbeit bedanken. Hier gilt mein Dank Herrn Dr. Roland Bless, der meine Arbeit von Beginn an begleitet hat und immer zu fachlichen Diskussionen bereit war. Zudem möchte ich mich bei Herrn Uwe Walter, Mark Doll, Markus Schöller, Stefan Mink und Curt Cramer bedanken, die mich – jeder auf seine Weise – beim Fortschritt meiner Arbeit begleitet und unterstützt haben. Ebenfalls gebührt mein Dank den Kolleginnen und Kollegen aus der Verwaltung und der Technik, Frau Doris Weber und Frau Astrid Natzberg, sowie Herrn Gentiel Mussgung, Herrn Frank Winter und Herrn Detlev Meier.

Zahlreiche Studenten haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Hierbei haben sich die folgenden Studenten besonders verdient gemacht: Herr Arne Heinemeyer, Herr Markus Schmidt, Herr Istvan Szekeres und Herr Lei Dai.

Abschließend möchte ich meiner Frau, meiner Familie – insbesondere meinem Bruder und meiner Familie – danken, die mich immer unterstützt haben. Ohne den Rückhalt aus dem privaten Umfeld wäre das Promotionsvorhaben nicht durchführbar gewesen. Danke!

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	1
1.1	Problemstellung	2
1.2	Ziele	2
1.3	Gliederung der Abhandlung	3
2	Grundlagen	5
2.1	Das Internet	5
2.2	Das ISO/OSI-Schichtenmodell	6
2.3	Das Routing	9
2.3.1	Link State-Algorithmus	10
2.3.1.1	Bewertung	10
2.3.2	Distanz Vektor-Algorithmus	11
2.3.2.1	Bewertung	11
2.3.3	Vergleich: Link State- und Distanz Vektor-Algorithmus	12
2.4	Das Internet Protokoll	13
2.4.1	IPv4	13
2.4.2	IPv6	16
2.5	Routing in IP-basierten Netzen	16
2.5.1	Routing-Protokoll mit Link State-Algorithmus	17
2.5.1.1	Bewertung	18
2.5.2	Routing-Protokoll mit Distanz Vektor Algorithmus	19
2.5.2.1	Bewertung	20
2.6	Transport-Protokolle	20
2.6.1	User Datagram Protocol	21
2.6.2	Transmission Control Protocol	21

2.7	Das Border Gateway Protokoll	22
2.7.1	BGP-Signalisierungsnachrichten	23
2.7.2	Aushandlung von Zusatzmerkmalen	25
2.7.3	Internes-/Externes-BGP	25
2.7.3.1	BGP-Reflectors	27
2.7.3.2	BGP-Confederations	27
2.7.4	Policies	29
2.7.4.1	BGP-Routen-Selektionsprozess	30
2.7.4.2	BGP-Routingtabelle	31
2.7.5	BGP-Relationships	33
2.8	Zusammenfassung	35
3	Problemanalyse der Kontrollebene des Internets	37
3.1	Wachstum des Internets	37
3.1.1	Wachstum der Autonomen Systeme	37
3.1.2	Wachstum der Netzwerkpräfixe	40
3.1.3	Entwicklung der Netzwerkpräfixlängen	42
3.2	Analyse der gegenwärtigen Situation	43
3.3	Zusammenfassung	47
4	BGP-Erweiterungen	49
4.1	Route Flap Damping	49
4.2	Graceful Restart	53
4.3	NOPEER Attribut	56
4.4	Zusammenfassung	59
5	Das Fast Scoped Rerouting-Verfahren	61
5.1	Entwurfsziele	61
5.2	Grundlegende Funktionsweise	62
5.2.1	Feingranulare Zeitebene (FaSRo)	64
5.2.2	Grobgranulare Zeitebene (BGP)	65
5.2.3	Bestimmung des Fast Scoped Rerouting-Pfads	65
5.2.3.1	FaSRo-Initiator/FaSRo-Responder Autonome Systeme	72
5.2.3.2	FaSRo-Transit Autonome Systeme	74

5.2.4	Ein FaSRo-Pfad vs. ein Fächer von FaSRo-Pfaden	75
5.2.5	FaSRo-Dispersionspunkte	77
5.2.6	Schachtelung und Routenänderungen von FaSRo-Pfaden	80
5.2.7	FaSRo im Inneren eines Autonomen Systems	81
5.3	Signalisierung	83
5.3.1	FaSRo-Signalisierungsnachrichten	83
5.3.1.1	FaSRo-ID und AS-Liste	83
5.3.1.2	Signalisierungsnachrichten für den FaSRo-Pfadaufbau	84
5.3.1.3	Signalisierungsnachrichten für den FaSRo-Pfadabbau	85
5.3.1.4	Sonstige Signalisierungsnachrichten	85
5.3.1.5	Flussrichtungsdefinitionen	86
5.3.2	Aufbau eines FaSRo-Pfads	86
5.3.2.1	FaSRo-Initiator FaSRo-Pfadaufbau	87
5.3.2.2	FaSRo-Transit FaSRo-Pfadaufbau	91
5.3.2.3	FaSRo-Responder FaSRo-Pfadaufbau	92
5.3.3	Abbau eines FaSRo-Pfads	94
5.3.3.1	FaSRo-Initiator FaSRo-Pfadabbau	94
5.3.3.2	FaSRo-Transit FaSRo-Pfadabbau	97
5.3.3.3	FaSRo-Responder FaSRo-Pfadabbau	97
5.3.4	FaSRo-Keepalives	99
5.3.5	Qualitätsmessung eines FaSRo-Pfads	100
5.3.6	Sicherheit	102
5.4	Bewertung von FaSRo	102
5.5	Zusammenfassung	106
6	Das Internet mit FaSRo	109
6.1	FaSRo-Fähigkeit des Internets	109
6.1.1	Bestimmung der FaSRo-ASe	112
6.1.2	Analyse der FaSRo-Fähigkeit	114
6.1.3	Ergebnisse der FaSRo-Fähigkeitsanalyse	115
6.2	Simulative Untersuchung des FaSRo-Verfahrens	118
6.2.1	Simulationsumgebungen	121
6.2.1.1	OMNeT++	121

6.2.1.2	FaSRo-OMNeT++-Implementierung	123
6.2.1.3	SSFNet	124
6.2.1.4	FaSRo-SSFNet-Implementierung	125
6.2.2	Generierung von Simulations-Topologien	126
6.2.2.1	Analytische Topologie-Erzeugung	126
6.2.2.2	Reale Topologie-Umwandlung	126
6.2.3	Simulationsergebnisse	129
6.2.3.1	Simulation des funktionalen Verhaltens	129
6.2.3.2	Basis-Topologie	133
6.2.3.3	Analytisch generierte Topologien	134
6.2.3.4	Reale Topologie	140
6.3	Praktische Untersuchung des FaSRo-Verfahrens	142
6.3.1	FaSRo-Prototyp-Implementierung	142
6.3.2	Untersuchung des FaSRo-Prototypen in einer einfachen Topologie	143
6.3.2.1	Verhalten bei kurzzeitigem AS-Pfadfehler	145
6.3.2.2	Verhalten bei persistentem AS-Pfadfehler	148
6.3.3	Untersuchung des FaSRo-Prototypen in einer komplexen Topologie	151
6.3.3.1	Verhalten bei kurzzeitigem AS-Pfadfehler	152
6.3.3.2	Verhalten bei persistentem AS-Pfadfehler	154
6.4	Zusammenfassung	156
7	Zusammenfassung und Ausblick	159
7.1	Ergebnisse der Arbeit	159
7.2	Vergleich mit existierenden Ansätzen	160
7.3	Weiterführende Arbeiten	161
A	Shortest Path-Algorithmus	163
B	Signalisierungsnachrichten	165
B.1	BGP-Paketkopf	165
B.2	BGP-Open-Nachricht	165
B.3	BGP-Notification-Nachricht	166
B.4	BGP-Keepalive-Nachricht	167
B.5	BGP-Update-Nachricht	167

B.6	FaSRo-ID	168
B.7	AS-Liste	168
B.8	FaSRo-Open-Nachricht	169
B.9	FaSRo-Request-For-Path-Nachricht	169
B.10	FaSRo-Request-For-Path-Reply-Nachricht	169
B.11	FaSRo-Check-Nachricht	170
B.12	FaSRo-Confirm-Nachricht	170
B.13	FaSRo-Tear-Down-Nachricht	170
B.14	FaSRo-Abort-Nachricht	171
B.15	FaSRo-Probing	171
B.16	FaSRo-Keepalive	172
C	Endliche FaSRo-Automaten	173
C.1	Endlicher FaSRo-Initiator Automat	175
C.2	Endlicher FaSRo-Transit Automat	176
C.3	Endlicher FaSRo-Responder Automat	177
D	Evaluierung	179
D.1	Auswertung: FaSRo-Pfade pro Zielnetzwerkpräfix	179
D.2	Konfigurationsdateien	183
D.2.1	Basis-Topologie	183
D.2.2	Prototyp (externes und internes FaSRo)	190
	Literaturverzeichnis	193
	Abkürzungsverzeichnis	203