

**OPTIMIERUNG VON STATISCHEN ROUTINGVERFAHREN  
IN SPEZIELLEN GRAPHENKLASSEN**

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktor-Ingenieurs  
des Fachbereichs Elektrotechnik  
der FernUniversität-Gesamthochschule  
in Hagen

von  
**Diplom-Informatiker**  
**GERD BAUER**  
**Nürnberg**

**Hagen 2000**

Tag der Einreichung  
Tag der mündlichen Prüfung  
1. Berichterstatter  
2. Berichterstatter  
3. Berichterstatter

21. Juli 2000  
25. April 2001  
Prof. Dr.-Ing. Firoz Kaderali  
Prof. Dr. rer. nat. Rolf Klein  
Prof. Dr. rer. nat. Werner Poguntke

Berichte aus der Kommunikationstechnik  
herausgegeben von Prof. Firoz Kaderali

Band 7

**Gerd Bauer**

**Optimierung von statischen Routingverfahren  
in speziellen Graphenklassen**

Shaker Verlag  
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Bauer, Gerd:*

Optimierung von statischen Routingverfahren in speziellen Graphenklassen/

Gerd Bauer. Aachen : Shaker, 2001

(Berichte aus der Kommunikationstechnik herausgegeben

von Prof. Firoz Kaderali ; Bd. 7)

Zugl.: Hagen, Univ., Diss., 2001

ISBN 3-8265-8999-8

Copyright Shaker Verlag 2001

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8999-8

ISSN 1437-7497

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit wurde von Herrn Prof. Dr.-Ing. Firoz Kaderali betreut. Ihm danke ich für die Diskussionen, wertvollen Hinweise und die Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Rolf Klein und Herrn Prof. Dr. rer. nat. Werner Poguntke danke ich für die Übernahme der Korreferate.

Besonders danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Werner Poguntke für die Diskussionen und Anregungen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt ferner allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrgebietes Kommunikationssysteme für ihr Interesse an meiner Arbeit und ihr kooperatives Verhalten bei meinen Aufenthalten in Hagen. Bei Herrn Olaf Ehlert und Herrn Christian Grosch bedanke ich mich für Ihre Unterstützung.

Vor allem bedanke ich mich bei meiner Ehefrau Waltraud, die mich in vielerlei Hinsicht tatkräftig unterstützt hat, für ihre Hilfe, ihr geduldiges Verständnis, ihre Rücksichtnahme und ihre Aufmunterung in den Jahren der Erstellung dieser Arbeit. Ihr widme ich diese Arbeit.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Routing in Rechnernetzen</b>	<b>4</b>
2.1 Netztopologien und Vermittlungstechniken.....	4
2.2 Generelle Ziele von Routingstrategien.....	7
2.3 Zielkonflikte und Probleme.....	7
2.4 Anforderungen und Optimalitätskriterien.....	8
2.5 Klassifizierung von Routingverfahren.....	9
2.5.1 Kriterien für die Klassifizierung.....	9
2.5.2 Erfüllung der Kriterien durch die verschiedenen Routingverfahren.....	11
2.5.3 Routing in großen Netzen.....	18
2.6 Beispiele für bisherige Optimierungsansätze.....	19
<b>3 Graphentheoretische Grundlagen</b>	<b>23</b>
3.1 Grundbegriffe der Graphentheorie.....	24
3.2 Routingalgorithmus.....	27
3.2.1 Anzuwendender Routingalgorithmus.....	27
3.2.2 Zyklentreiheit und Bidirektionalität des Routingalgorithmus' und die Netztopologie.....	28
3.2.3 Mindestanzahl an Ersatznachbarn und Ersatzwegen.....	28
3.3 Bewertung der Kanten und Knoten.....	29
3.3.1 Kostenbewertung der Kanten.....	29
3.3.2 Bewertung der Ausfallwahrscheinlichkeit von Kanten und Knoten.....	29
3.4 Kanten- und Knoten-Disjunktheit.....	29
<b>4 Ein Verfahren zum Füllen der zyklentreien Shortest-Path-Routingtabellen für beliebige Graphen</b>	<b>31</b>
4.1 Bestimmen der Erstenachbarn und der Ersatznachbarn in einer zyklentreien Routingtabelle.....	31
4.2 Pseudocode des Algorithmus' Ersatznachbarkandidat.....	37
4.3 Reihenfolge der Knotenbearbeitung während der Bestimmung der Routingtabelleneinträge.....	38
4.4 Beschreibung eines Algorithmus' zur Zyklusermittlung.....	41
4.5 Zusammenfassung.....	43

<b>5 Optimale Graphenklassen</b>	<b>44</b>
5.1 Multi-Dreiecks-Graphen und die Graphenklasse $M$ .....	44
5.2 Beweis der ZF-SP-Optimalität von Graphen der Klasse MDG.....	48
5.3 Beweis der ZF-SP-BD-Optimalität von Graphen der Klasse MDG.....	49
5.4 Zusammenfassung.....	52
<b>6 Suboptimale Graphenklassen</b>	<b>53</b>
6.1 Analyse von bereits publizierten Graphenklassen auf SP-Suboptimalität.....	53
6.1.1 Triangulierte Graphen (TG).....	53
6.1.2 Vollständige (vollständig vermaschte) Graphen (VG).....	56
6.1.3 Nachteile von triangulierten und von vollständigen Graphen sowie daraus zu folgernde Verbesserungspotenziale und -anforderungen.....	58
6.1.4 Zusammenhang von Diameter und Kanten-/Knotenanzahl.....	59
6.2 Erfüllen der vorgenannten Verbesserungsanforderungen durch die neue Graphenklasse $AG$ .....	64
6.2.1 Definition und Erzeugungsalgorithmus der neuen Graphenklasse $AG$ .....	64
6.2.2 Ein Verfahren zum Entscheiden, ob ein beliebiger Graph $G$ zur Graphenklasse $AG$ gehört.....	78
6.2.3 Effizienz bei Ausfall einer Kante.....	90
6.2.4 Erweiterte algorithmisch erzeugte Graphen (EAG).....	93
6.3 Zusammenfassung.....	94
<b>7 Einsatzmöglichkeiten der neuen Graphenklasse in realen Netzen</b>	<b>96</b>
7.1 Ein Algorithmus zur effizienten Entscheidung, ob ein Graph $G'$ Teilgraph von $AG$ ist.....	96
7.2 Algorithmus zur automatisierten Graphenmanipulation und Kantenverlustermitt- lung durch Transformations-Simulationen.....	103
7.3 Rechnerlaufzeitanalyse für die vorgestellten Algorithmen.....	106
7.4 Anwendungsbeispiele für die vorgestellten Algorithmen	117
7.4.1 Ermitteln der aus einem Graphen $G' \in VG$ zu entfernenden Kanten.....	117
7.4.2 Ermitteln der in einen Graphen $G' \in AG_T$ einzufügenden Kanten.....	118
7.4.3 Ermitteln der bei einem Graphen $G' \notin AG_T$ einzufügenden beziehungsweise zu entfernenden Kanten.....	119
7.5 Zusammenfassung.....	123
<b>8 Zusammenfassung</b>	<b>124</b>
<b>Anhang A: Abbildungsverzeichnis</b>	<b>128</b>
<b>Anhang B: Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>130</b>

**Anhang C: Verzeichnis der für diese Arbeit entwickelten Turbo-Pascal-Programme 131**

**Anhang D: Literaturverzeichnis 132**