





# **Zufallsgesteuerte Verfahren zur Topologieoptimierung von Telekommunikationsnetzen**

Mohammad Shahbaz

# AACHENER BEITRÄGE ZUR MOBIL- UND TELEKOMMUNIKATION

Herausgeber:

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Bernhard Walke



Shahbaz, Mohammad:  
Zufallsgesteuerte Verfahren zur Topologieoptimierung von  
Telekommunikationsnetzen  
1. Auflage Aachen:  
Verlag der Augustinus Buchhandlung, 1998  
(Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation, Band 14)

ISBN 3-86073-623-X

© 1998 Mohammad Shahbaz

Verlag der Augustinus Buchhandlung  
Pontstraße 96  
52062 Aachen  
Tel. & Fax: +49 241 23948

Druck: Druckerei Paletti, Aachen  
Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

"D 82 (Diss. RWTH Aachen)"

## ZUSAMMENFASSUNG

---

Die Anpassung an die sich schnell ändernden Tarife und Netztechnologien erfordert eine ständige Planung, Konfiguration und Überwachung der heutigen Telekommunikationsnetze als strategische Ressourcen. Der Topologieentwurf eines Telekommunikationsnetzes stellt eine entscheidende Netzplanungsphase dar, die die Funktionalität, die vom Netz zu erbringenden Dienste und die Wirtschaftlichkeit des Netzes massiv beeinflussen kann. Unter Netzentwurf wird die Bestimmung der Lage von Netzknoten und die Struktur und Anzahl der Verbindungen verstanden. Die Existenz der wettbewerbsfähigen Netze wird nur durch die effiziente Nutzung der im Netz vorhandenen Betriebsmittel gewährleistet. Aus diesem Grund ist die Verfügbarkeit von flexiblen und leistungsfähigen Topologieentwurfsmethoden und Werkzeugen unabdingbar.

Die Komplexität des Topologieentwurfsproblems läßt keine exakte Suche nach dem globalen Optimum zu, wobei die Notwendigkeit von Verfahren deutlich wird, die effizient und unkonventionell den Lösungsraum durchsuchen. Die in dieser Arbeit verwendete Lösungsmethodik beruht auf den zufallsgesteuerten Optimierungsprinzipien „Simuliertes Ausglühen“ (*Simulated Annealing, SA*) und „Evolutionsalgorithmen“ (*Evolutionary Algorithms, EA*).

Der auf SA basierte Topologieoptimierungsalgorithmus ist analog zu einem physikalischen Prozeß, dem Ausglühen, konzipiert worden. Im Unterschied zu den konventionellen Optimierungsmethoden werden auch teure Netzlösungen mit einer Wahrscheinlichkeit, die mit der Zeit abnimmt, akzeptiert. Die zugrundeliegende Idee des auf EA basierten Topologieoptimierungsalgorithmus ist die Nachahmung einiger Prozesse der Evolution in der Natur. Dieser Algorithmus manipuliert eine Population der potentiellen Lösungen zum Topologieoptimierungsproblem. EA verwendet eine codierte Repräsentation der Lösungen, entsprechend dem genetischen Erbmateriale in der Natur, und nicht die Lösungen selbst. Wie in der Natur liefert die Selektion den notwendigen Steuerungsmechanismus für das Überleben der besseren Lösungen. Jeder Lösung wird ein Qualitätswert zugeordnet, der die Güte dieser Lösung im Vergleich zu anderen Lösungen in der Population angibt. Je höher der Qualitätswert eines Individuums, desto höher ist die Über-

lebenschance des Individuums, die Reproduktion und die Existenz in den nächsten Generationen.

Zum Zwecke des Vergleichs wurde ein mehrstufiger Topologieentwurfsalgorithmus (*Multi-step Topology Design Algorithm, MTD*) untersucht, der das Problem in handhabbare Teilprobleme zerlegt. Diese Teilprobleme werden nacheinander gelöst, und die Lösung des Gesamtproblems wird durch Zusammenführen der Teilergebnisse erhalten.

Um den in der Netzentwurfspraxis auftretenden Problemen gerecht zu werden, wurden die entwickelten zufallsgesteuerten Algorithmen in das TND Tool (*Topological Network Design Tool*) integriert. Die Ergebnisse aus der Topologieentwurfphase werden mittels TRANSIT (*TRANsport Network Simulation Tool*) auf die Einhaltung von Dienstgütebedingungen validiert. Die systematisch entworfenen Experimente zeigen, daß die entwickelten Algorithmen erfolgreich für den Netztopologieentwurf eingesetzt werden können.

## ABSTRACT

---

The rapidly changing tariffs and networking technologies creates the need for ongoing planning, configuration and management of networks as one of the most strategic resources. Before any network can work and provide its desired services, it has to undergo a topology design process. Topology design means determining the location of nodes, and the structure and number of connecting links. Only a cost-effective network which uses network resources to the maximum extent is able to survive in today's competitive market. So the availability of a totally flexible and productive method for network topology optimization becomes more important than before.

Due to the high dimensionality of the topology design problem it is not feasible to start an exhaustive search for an optimal global solution. There is a need for algorithms that move fast enough in an unconventional way through the search space. The approach of this work focuses on the random guided optimization principles, i.e. Simulated Annealing (SA) and Evolutionary Algorithms (EA).

The SA-based topology optimization algorithm is a simulation of a physical process called annealing. In comparison to conventional optimization methods SA allows to accept an expensive solution with a probability that decreases during the optimization process. In this way it is possible to leave the local optimal solutions and to yield the global one.

The idea behind EA-based topology optimization algorithm is to mimic some of the processes observed in natural evolution. This algorithm manipulates a population of potential solutions to topological network optimization problem. EA operates on encoded representation of the solutions, equivalent to the genetic material of individuals in nature, and not directly on the solutions themselves. As in nature, selection provides the necessary driving mechanism for better solutions to survive. Each solution is associated with a fitness value that reflects how good it is, compared with other solutions in the population. The higher the fitness value of an individual, the higher its chances of survival and reproduction and the larger its representation in the subsequent generation.

For the sake of comparison a Multi-step Topology Design Algorithm (MTDA) was investigated that decomposes the problem in some tractable

subproblems. These subproblems are solved subsequently and the results are put together to achieve the solution to the whole problem.

In order to cope with the practical issues faced a network designer the developed random guided algorithms were integrated in TND Tool (*Topological Network Design Tool*). Achieved results from the topology design step are validated w.r.t. quality of service constraints by TRANSIT (*TRANsport Network Simulation Tool*).

Properly designed experiments show that the developed algorithms work successfully in the context of network topology design.

# INHALTSVERZEICHNIS

---

<b>Zusammenfassung</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlegende Konzepte</b>	<b>5</b>
2.1 Topologien . . . . .	6
2.2 Netzrepräsentation . . . . .	7
2.3 Nachrichtenvermittlungsnetze . . . . .	10
2.3.1 Fernsprechnet . . . . .	10
2.3.2 Datennetz . . . . .	10
2.3.3 ISDN . . . . .	11
2.3.4 SDH-Netz . . . . .	11
2.3.5 ATM-Netz . . . . .	12
2.4 Netzverkehrstechnik . . . . .	12
2.4.1 Messung von Fernsprechverkehr . . . . .	14
2.4.2 Blockierung im Netz . . . . .	14
2.4.3 Verfügbarkeit von Vermittlungsstellen . . . . .	15
2.4.4 Behandlung blockierter Anrufe . . . . .	16
2.4.5 Erlang- und Poisson-Verkehrsformel . . . . .	16
2.4.6 Schätzung des Netzverkehrs für neue Systeme . . . . .	18
2.4.7 Schätzung des Netzverkehrs für existierende Systeme . . . . .	18
2.4.8 Netzverkehrstechnik in der Praxis . . . . .	19
2.4.9 Schätzung des Backbone-Netzverkehrs . . . . .	20
2.5 Dienstgüte . . . . .	21
<b>3 Konventionelle Netzplanung</b>	<b>23</b>
3.1 Planungsziele . . . . .	23
3.2 Planungsprozeß . . . . .	24
3.3 Klassifizierung der Netzplanungsprobleme . . . . .	28
3.3.1 Räumliche Zerlegung . . . . .	29

3.3.2	Wegewahlprinzipien . . . . .	30
3.3.3	Planungsmodelle . . . . .	30
3.3.4	Handhabbarkeit der Probleme . . . . .	31
3.4	Formulierung einiger Probleme . . . . .	31
3.5	Netzplanung mittels mathematischer Programmierung . . . . .	33
3.5.1	Stand der Forschung . . . . .	33
3.5.2	Topologieoptimierung und Planung des Ortsvermittlungsnetzes . . . . .	34
3.5.3	Ausfallsicherheitsbedingungen . . . . .	35
3.6	Modelle für internationale Netzplanung . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Einfluß der Kostenstruktur</b>	<b>39</b>
4.1	Analytische Kostenfunktion SQRSQR . . . . .	39
4.2	Analytische Kostenfunktion SQR I . . . . .	40
4.3	Analytische Kostenfunktion SQR II . . . . .	41
4.4	Analytische Kostenstruktur IRG . . . . .	41
4.5	Reale Kostenstruktur Telekom I . . . . .	44
4.6	Reale Kostenstruktur Telekom II . . . . .	49
4.7	Reale Kostenstruktur RF . . . . .	50
<b>5</b>	<b>Verkehrsprognosen und -schwerpunkte</b>	<b>51</b>
5.1	Quelldaten der Verkehrsprognose . . . . .	51
5.2	Verkehrsprognoseszenarien . . . . .	52
5.3	Verkehrsschwerpunkte . . . . .	54
5.4	Dynamische Verkehrsprognose . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Topologieentwurfsproblem</b>	<b>63</b>
6.1	Kombinatorisches Optimierungsproblem . . . . .	63
6.2	Beschreibung des Topologieoptimierungsproblems . . . . .	64
6.2.1	Festlegung der Zielfunktion . . . . .	66
6.2.2	Festlegung der Wegewahlstrategie . . . . .	66
6.2.3	Festlegung des Zielnetzes . . . . .	67
6.2.4	Festlegung der zu realisierenden Dienste . . . . .	67
6.2.5	Festlegung der Planungsmodelle . . . . .	67
6.3	Mathematische Problemformulierung . . . . .	68
6.4	Komplexität des Topologieentwurfsproblems . . . . .	72
<b>7</b>	<b>Mehrstufiger Netzentwurf</b>	<b>75</b>

7.1	Mehrstufiger Topologieentwurfalgorithmus . . . . .	75
7.2	Teilnetze zwischen NT- und MUX-Knoten . . . . .	76
7.2.1	Bestimmung von MUX-Lokationen . . . . .	76
7.2.2	Zuordnung von NT- zu MUX-Knoten . . . . .	80
7.2.3	Bestimmung der Struktur von NT-MUX-Verbindungen . . . . .	81
7.3	Teilnetze zwischen MUX- und SW-Knoten . . . . .	82
7.4	Backbone-Netz zwischen SW-Knoten . . . . .	83
<b>8</b>	<b>Simuliertes Ausglühen</b> . . . . .	<b>85</b>
8.1	Physikalischer Hintergrund . . . . .	85
8.2	Anwendung auf Topologieoptimierungsproblem . . . . .	86
8.3	Modellierung der Netzkonfiguration . . . . .	86
8.4	Beschreibung des SA-Algorithmus . . . . .	88
8.5	Initialisierungsphase . . . . .	91
8.6	Akzeptanzkriterium . . . . .	92
8.6.1	Metropoliskriterium . . . . .	92
8.6.2	Schwellenkriterium . . . . .	93
8.7	Abkühlungsschemata . . . . .	93
8.8	Operatoren . . . . .	94
8.9	Abbruchkriterium . . . . .	96
8.10	Beispielszenario SA . . . . .	96
<b>9</b>	<b>Evolutionsalgorithmen</b> . . . . .	<b>99</b>
9.1	Biologischer Hintergrund . . . . .	100
9.2	Beschreibung des GA-Algorithmus . . . . .	101
9.3	Codierungsmechanismus . . . . .	103
9.3.1	Codierungsarten . . . . .	104
9.3.2	Codierung eines Telekommunikationsnetzes . . . . .	105
9.4	Initialisierungstechnik . . . . .	107
9.5	Bewertungsfunktion . . . . .	109
9.6	Heiratsschemata . . . . .	110
9.7	Genetische Operatoren . . . . .	111
9.7.1	Kontextbezogene Mutationsoperatoren . . . . .	114
9.7.2	Problemorientierte Mutationsoperatoren . . . . .	117
9.8	Selektionsmechanismus . . . . .	129
9.9	Abbruchkriterium . . . . .	134
9.10	Beispielszenario GA . . . . .	135

<b>10 Topologieentwurfswerkzeug</b>	<b>137</b>
10.1 Anforderungsanalyse . . . . .	137
10.2 Organisation des Werkzeugs . . . . .	141
10.2.1 Darstellungsmodul . . . . .	143
10.2.2 Optimierungsmodul . . . . .	143
10.2.3 Kostenberechnungsmodul . . . . .	143
10.2.4 Datenbankmodul . . . . .	145
<b>11 Validierung des Netzentwurfs durch stochastische Simulation</b>	<b>147</b>
11.1 Modellierung der Netzelemente . . . . .	148
11.2 Simulatoraufbau . . . . .	149
11.3 Implementierung . . . . .	149
11.3.1 Simulationssteuerung . . . . .	151
11.4 Wegewahl im Simulator . . . . .	151
11.5 Validierung des Simulators . . . . .	152
11.6 Anwendungsspektrum des Simulators . . . . .	152
<b>12 Anwendung der Werkzeuge</b>	<b>155</b>
12.1 Topologieentwurf und -optimierung . . . . .	155
12.1.1 Manueller Netzentwurf . . . . .	156
12.1.2 Stufenweiser Netzentwurf . . . . .	156
12.1.3 Globaler Netzentwurf . . . . .	161
12.2 Wegewahlentwurf und -optimierung . . . . .	164
12.3 Optimale Netzerweiterung . . . . .	166
<b>13 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>171</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>175</b>
<b>A Abkürzungen</b>	<b>181</b>
<b>B Anforderungsanalysemodell</b>	<b>183</b>
<b>C Kostenstruktur</b>	<b>185</b>
<b>D Knoten- und Linkindizes</b>	<b>189</b>
<b>Nachwort</b>	<b>195</b>

# Einleitung

Die Telekommunikationsnetze und -systeme sind in den letzten Dekaden explosionsartig gewachsen. Ein wichtiger Faktor für ihre rapide Entwicklung ist zweifelsohne die Technologie-Innovation in diesem Bereich. Die Deregulierung der Telekommunikationsmonopole auf der ganzen Welt und insbesondere die stufenweise Einführung von Wettbewerb in Deutschland hat eine Verbesserung der Telekommunikationsnetze und -systeme zur Folge. Der Erfolg für die Wettbewerber hängt ganz wesentlich vom Einsatz optimaler Methoden und wettbewerbsfähiger Werkzeuge zur Planung dieser Netze als Rückgrat aller Dienste ab.

Die kostenoptimale Planung von Telekommunikationsnetzen unter Einhaltung gegebener Dienstgüteparameter und Randbedingungen stellt ein schwieriges Optimierungsproblem dar. Die Netzplanung ist ein iterativer Prozeß und umfaßt alle Aktivitäten, die für den Aufbau, die Inbetriebnahme und die Erweiterung von Telekommunikationsnetzen erforderlich sind. Ein fundamentaler Bestandteil der Netzplanung beruht auf der Bestimmung einer kostenoptimalen Netztopologie. Unter einer Netztopologie wird die Lage von Netzknoten sowie die Struktur und Anzahl der Verbindungen verstanden. Um eine Netztopologie mit Hilfe der Kosten bewerten zu können, bedarf es der Festlegung einer Wegewahlstrategie. Die Wegewahlstrategie (*Routing*) ist die Vorschrift zur Aufteilung des Verkehrs zwischen Quellen und Senken auf die in der Netztopologie vorhandenen Übertragungswege. Nach der verkehrsgerechten Dimensionierung der Verbindungen zwischen Netzknoten ergeben sich aufgrund der zugehörigen Kosten die Netzkosten und damit ein Maß für die Netztopologiebewertung. Die Optimierung einer Netztopologie hat bislang aufgrund der Komplexität des zugrundeliegenden Optimierungsproblems, des damit verbundenen Aufwands der Lösungsverfahren und schließlich des monopolistischen Betriebs von terrestrischen Übertragungswegen geringe Aufmerksamkeit gefunden.

Diese Arbeit leistet mit der Entwicklung neuer Lösungsverfahren und Werkzeuge einen Beitrag zum kostenoptimalen Topologieentwurf von Telekom-

munikationsnetzen. Die Unzulänglichkeit der herkömmlichen Optimierungsansätze bedingte die Fokussierung auf alternative Verfahren, die hier in Form naturanaloger und stochastischer Verfahren eingeführt werden. Diese zufallsgesteuerten Verfahren<sup>1</sup> beruhen auf einer zufälligen Suche im Lösungsraum und erlauben deshalb der inhärenten Komplexität des Topologieoptimierungsproblems gerecht zu werden. Aus der Klasse der zufallsgesteuerten Verfahren wurden in dieser Arbeit die Optimierungsprinzipien „Simuliertes Ausglühen“ und „Evolutionalgorithmen“ zur Entwicklung von Topologieoptimierungsalgorithmen verwendet. Darüber hinaus wurde die Eignung dieser Optimierungsprinzipien für den optimalen Topologieentwurf untersucht.

Diese Verfahren erweisen ihr Potential in der unkonventionellen Suche im Lösungsraum. Sie sind in der Lage das Topologieentwurfsproblem ohne Zerlegung zu handhaben und eignen sich insbesondere für den globalen Grobentwurf der Netztopologie. Das breite Anwendungsspektrum ermöglicht, sie auch im Rahmen von Netzplanungsteilaufgaben, wie z.B. dem Zuordnungsproblem, mit beschränkter Netzknotenkapazität einzusetzen.

## Aufbau der Arbeit

Mit dem Kapitel 2 wird versucht, einen zusammenfassenden Überblick der für die Darstellung der Verfahren in dieser Arbeit relevanten Konzepte zu geben. Das Studium der bekannten Topologien und die Modellierung der Netze mit Hilfe der Graphentheorie ermöglichen die algorithmenbasierte Untersuchung der Netze. Nach kurzer Erläuterung einiger wichtiger Nachrichtenvermittlungsnetze wird auf die Netzverkehrstechnik eingegangen.

Das Kapitel 3 führt in die konventionelle Netzplanung ein und verdeutlicht die Vielfalt der Netzplanungsaufgaben. Eine Darstellung des Standes der Forschung durch die Aufzählung der gelieferten Beiträge zur Lösung der Netzplanungsprobleme zeigt zweierlei Fakten, nämlich die spärliche Zahl von Untersuchungen auf dem Gebiet der Topologieoptimierung und die Dominanz der Lösungsmethodik „mathematische Programmierung“ auf allen Gebieten der Netzplanung.

Die Struktur einer Kostenfunktion beeinflusst entscheidend die Effizienz der zufallsgesteuerten Optimierungsalgorithmen. Aus diesem Grund wird in Ka-

---

<sup>1</sup>Die zufallsgesteuerten Optimierungsverfahren werden in der Literatur zum Unterschied von den deterministischen Optimierungsverfahren auch stochastische Optimierungsverfahren genannt.

pitel 4 der Einfluß der Kostenstruktur auf die Netztopologie untersucht, um einerseits die Funktionalität der Algorithmen zu prüfen und andererseits zur Leistungssteigerung evtl. aufwendige und komplexe Kostenstrukturen durch einfache und analytische Kostenstrukturen zu ersetzen.

Eine kostenoptimale Topologie ist auf die Verkehrsbeziehungen zwischen den Quellen und Senken des Verkehrs zugeschnitten. Diese Erkenntnis rechtfertigt eine fundierte Verkehrsprognose als Eingabedaten der Topologieoptimierungsalgorithmen. In Kapitel 5 wird der zu erwartende Verkehr anhand von verschiedenen Szenarien prognostiziert. Die Bestimmung der aufgrund von Verkehrsprognosedaten berechneten Verkehrsschwerpunkte wird als potentielle Orte der Netzknoten beispielhaft demonstriert.

Nach der Beschreibung des Topologieentwurfsproblems und die damit verbundene Problemkomplexität in Kapitel 6 wird in den folgenden drei Kapiteln auf die Lösungsverfahren eingegangen. In Kapitel 7 wird ein mehrstufiges Netzentwurfsverfahren vorgestellt, das auf der Zerlegung des Topologieentwurfsproblems in kleine handhabbare Probleme beruht. Zur Lösung der einzelnen Teilprobleme werden verschiedene Algorithmen vorgeschlagen.

In den Kapiteln 8 und 9 werden die zufallsgesteuerten Optimierungsverfahren zum Topologieentwurf eines Telekommunikationsnetzes untersucht und versucht, die Optimierungsprozesse in der Natur zu imitieren. Die Idee für das in Kapitel 8 entwickelte Topologieoptimierungsverfahren beruht auf einem physikalischen Prozeß, nämlich auf der Erhitzung eines Festkörpers und anschließender Abkühlung zum Erreichen eines kristallinen Zustands, und wird deshalb „Simuliertes Ausglühen“ (*Simulated Annealing, SA*) genannt. Es wird gezeigt, wie das auf dem SA-Prinzip basierende Topologieoptimierungsverfahren optimierte Netze erzeugt und welche Parameter die Konvergenz des Verfahrens und die Qualität der Lösungen beeinflussen.

Die Optimierungsverfahren in Kapitel 9 „Evolutionalgorithmen“ (*Evolutionary Algorithms, EA*) finden ihren Ursprung in biologischen Prozessen und der Evolution in der Natur. Nach der Beschreibung des EA-Prinzips wird auf die charakteristischen Eigenschaften der zur Topologieoptimierung entwickelten Algorithmen eingegangen, und die Methoden zur Leistungssteigerung werden aufgezeigt.

Die Kapitel 10 und 11 stellen jeweils den Aufbau und die Funktionalitäten der entwickelten Werkzeuge TND Tool und TRANSIT dar, die zum Topologieentwurf und zur Validierung der Ergebnisse realisiert worden sind. Dem Topologieentwurfswerkzeug TND Tool liegen die in Kapitel 7, 8 und 9 entwickelten Verfahren zugrunde.

Das Kapitel 12 demonstriert beispielhaft die Anwendung der im Topologieentwurfswerkzeug integrierten Algorithmen, die Validierung der Ergebnisse, den Einfluß der Wegewahlstrategie und die Möglichkeit der Netzerweiterung. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 13. Der Anhang umfaßt die Grundlagen und notwendige Hintergrundinformationen.

# Grundlegende Konzepte

In graphentheoretischer Terminologie kann ein Telekommunikationsnetz als eine Ansammlung von Knoten mit unterschiedlichen Funktionalitäten betrachtet werden, die miteinander durch Kommunikationskanten verbunden werden. Ein Knoten kann Teilnehmergerät, Konzentrator oder Vermittlungsstelle sein. Die Kanten repräsentieren ein Mittel zur Kommunikation zwischen den Knoten. Physikalisch sind diese Kanten Übertragungssysteme wie z.B. Leitungen, Mikrowellenrichtfunksysteme, Mobilfunksysteme oder Satellitenverbindungen.

Ein Telekommunikationsnetz wird benötigt, um den Teilnehmern Netzdienste, die in Form von Verkehrsflüssen innerhalb des Telekommunikationsnetzes dargestellt werden, anbieten zu können. Dieser Netzverkehr beinhaltet Informationen wie Daten, Sprache oder Bilder. Gemäß diesem auf Verkehrsflüssen basierendem Konzept kann ein Telekommunikationsnetz als ein System von miteinander verbundenen Geräten beschrieben werden, das Verkehr verschiedener Netzdienste transportiert.

Um die Kommunikation zwischen den Teilnehmern in einem leitungsvermittelten Netz zu ermöglichen, müssen Übertragungs- und Vermittlungssysteme über Signalisierungsfunktionen verfügen. Signalisierung bezieht sich auf den Prozeß der Informationsübertragung für die Verbindungssteuerung. Die Informationsmenge für die Signalisierung ist relativ gering im Vergleich zu der für die Nutzdatenübertragung und kann deshalb in einem ersten Schritt der Netzdimensionierung des Wirknetzes<sup>1</sup> vernachlässigt bzw. dem Nutzverkehr prozentual zugeschlagen werden. Ein getrenntes und nur für die Signalisierung benutztes Netz kann wie das Wirknetz mit der gleichen Methodik entworfen und optimiert werden.

Dieses Kapitel umfaßt die wichtigsten und zum Verständnis der vorgestellten Verfahren in dieser Arbeit notwendigen Konzepte und Definitionen.

---

<sup>1</sup>auch Transportnetz genannt

## 2.1 Topologien

Der Entwurf eines Telekommunikationsnetzes benötigt eine Methode, Vermittlungsknoten so zu verbinden, daß jeder Teilnehmer im Netz mit jedem anderen kommunizieren kann. Ein Telefonteilnehmer bzw. eine Datenend-einrichtung wird mit der nächsten Ortsvermittlungsstelle<sup>2</sup> durch eine Teilnehmeranschlußleitung verbunden. Bei Telefon- und Datenetzen verbinden Leitungsbündel die Vermittlungsknoten miteinander. Die Schwierigkeit dabei ist die effiziente und kostengünstige Vernetzung der für den Netzbetrieb erforderlichen Vermittlungsknoten. Die grundlegenden Topologien, die in Telekommunikationsnetzen zur Verbindung von Netzknoten miteinander Verwendung finden, kann man folgendermaßen klassifizieren [55, 10, 61]:

- **Maschen-Topologie:** Bei einer Maschen-Topologie gibt es fast für jedes Knotenpaar eine Verbindung<sup>3</sup>. Dies bedeutet, daß es fast immer einen direkten Weg von einem Knoten zu einem anderen gibt. Die Kommunikationswege sind deshalb kürzer im Vergleich zu anderen Topologien. Eine solche Topologie ist nur für Netze mit wenigen Knoten wirtschaftlich anwendbar und wird oft für Teilnetze höherer Hierarchieebenen angewandt. Die teilvermaschte Topologie wird bevorzugt, wenn der Verkehr zwischen einigen Knotenpaaren vernachlässigbar klein ist (s. Abb. 2.1(a) und 2.1(b)).
- **Stern-Topologie:** Die sternförmige Konfiguration benutzt einen zentralen Tandem-Vermittlungsknoten. Dabei wird jeder zugeordnete Vermittlungsknoten mit dem Tandem-Vermittlungsknoten verbunden. Diese Konfiguration wird bei Teilnetzen mit relativ geringem Verkehr eingesetzt (s. Abb. 2.1(c)).
- **Doppel-Stern-Topologie:** Bei dieser Topologie werden sternförmige Teilnetze mit einem Tandem-Vermittlungsknoten höherer Ordnung vernetzt. Man findet solche Konfigurationen bei hierarchischen Netzen (s. Abb. 2.1(d)).
- **Multidrop-Topologie:** Die Multidrop-Topologie ist, wie der minimale Spannbaum, ein spezieller Baum, mit der Eigenschaft, daß die Summe der Kanten minimal ist (s. Abb. 2.1(e)).

<sup>2</sup>auch Teilnehmervermittlungsstelle genannt

<sup>3</sup>Existiert für jeden der  $N$  Netzknoten eine Verbindung zu den anderen, d.h.  $\frac{N(N-1)}{2}$  Verbindungen, so liegt eine vollständige Maschen-Topologie vor.

- **Bus-Topologie:** Die Bus-Topologie verwendet ein gemeinsames Übertragungsmedium für den Informationsaustausch zwischen den Stationen, das „Bus“ genannt wird. Diese Topologie findet man z.B. in (Hochgeschwindigkeit-)LANs<sup>4</sup> mit Token- oder CSMA<sup>5</sup>-Zugriffsverfahren (s. Abb. 2.1(f)).
- **Ring-Topologie:** Bei ringförmigen Netzen werden die Kanten zwischen den Knoten ringförmig geführt. Die Informationsübertragung kann unidirektional (z.B. im Uhrzeigersinn) oder bidirektional sein. Bei einer einfachen Konfiguration kann gleichzeitig nur ein Knotenpaar miteinander kommunizieren (s. Abb. 2.1(g) und 2.1(h)). Bei den Konfigurationen, die die TDM<sup>6</sup>-Technik verwenden, können quasi-gleichzeitig mehrere Stationen über Zeitkanäle des Mediums miteinander kommunizieren. Die Ring-Topologie ist geeignet für die Vernetzung von lokalen Terminals oder Rechnern, aber auch für ein Teilnetz höchster Hierarchieebene (Backbone-Ebene).

Hybrid-Topologien können durch Kombinationen der obigen Topologien erreicht werden. Da der größte Kostenanteil eines Telekommunikationsnetzes auf Übertragungswege entfällt, ist die Auswahl von geeigneten Topologien bzw. die Topologie-Optimierung ein wichtiger Prozeß.

## 2.2 Netzrepräsentation

Für die analytische Untersuchung von Netzeigenschaften bedarf es einer geeigneten Modellierung des Netzes. Dabei muß das Modell die wichtigsten Eigenschaften des Netzes wiedergeben, während die nichtrelevanten Charakteristika unberücksichtigt bleiben. Die Graphentheorie stellt diesbezüglich ein leistungsfähiges Modellierungswerkzeug zur Verfügung. Im folgenden werden einige wichtige Begriffe aus der Graphentheorie zum Verständnis der Netzrepräsentation erläutert [32, 31].

Ein Pseudograph (PG) als ein mathematisches Objekt setzt sich aus Ecken und Kanten zusammen. Ein Pseudograph wird durch ein Tripel  $PG = (V, E, m)$  gekennzeichnet, wobei  $V$  die Menge der Ecken,  $E$  die Menge der Kanten und  $m$  die Abbildung  $m : E \rightarrow \{i, j | i, j \in V\}$  angibt. Sind  $V$  und  $E$  endliche Mengen, so liegt ein endlicher Pseudograph vor.

---

<sup>4</sup>Local Area Networks

<sup>5</sup>Carrier Sense Multiple Access

<sup>6</sup>Time Division Multiplexing

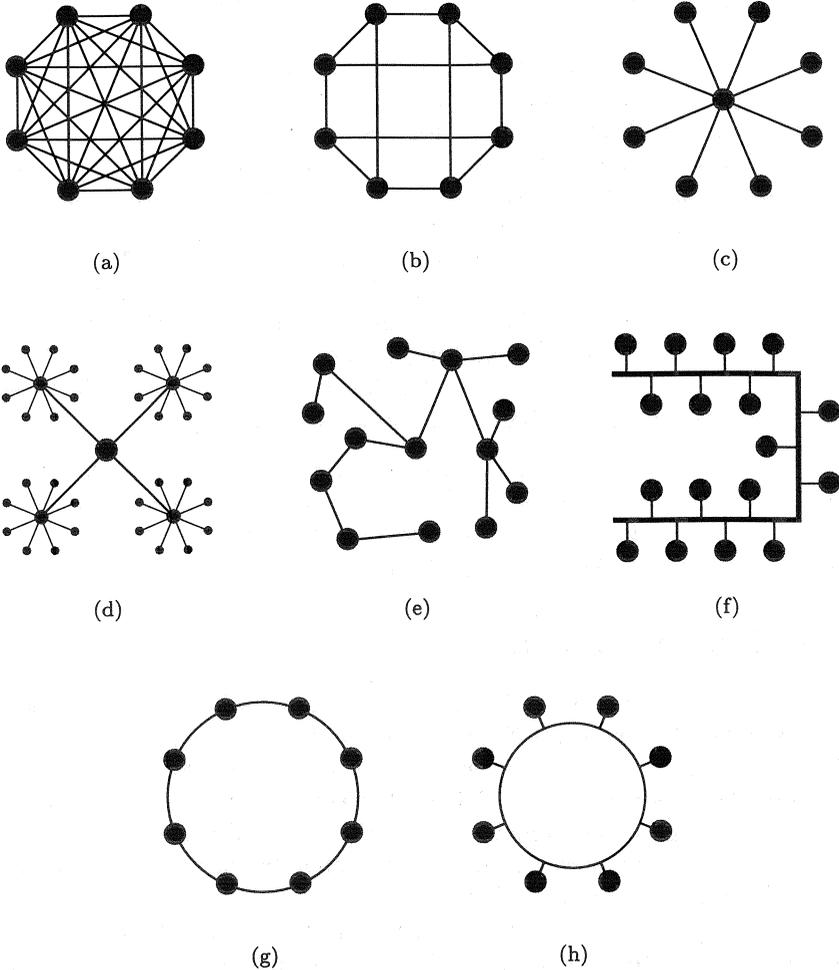


Abbildung 2.1: Netztopologien:

- (a) Vollständige Maschen-Topologie; (b) Maschen-Topologie;
- (c) Stern-Topologie; (d) Doppel-Stern-Topologie;
- (e) Multidrop-Topologie; (f) Bus-Topologie;
- (g) Ring-Topologie (I); (h) Ring-Topologie (II)

Zwei Ecken  $i$  und  $j$  sind inzident, wenn die Kante  $e \in E$  mit  $m(e) = \{i, j\}$  sie verbindet ( $i$  und  $j$  heißen dann die Endecken von  $e$ ). Zwei Kanten heißen adjazent, wenn sie mindestens eine gemeinsame Endecke besitzen. Ein endlicher Pseudograph wird durch ein Diagramm veranschaulicht: die Ecken werden durch Punkte der Zeichenebene dargestellt, die Kanten als Linien, die die Endecken der Kante verbinden. Existieren zwei oder mehrere Kanten zwischen zwei Ecken, so heißen diese Kanten Parallelkanten. Eine Kante  $e$  mit zwei gleichen Endecken, d.h.  $m(e) = \{i\}$ , ist eine Schleife. Ein Pseudograph ohne Schleifen heißt Multigraph. Ein Multigraph ohne Parallelkanten heißt Graph. Man kann einen Graphen auch als ein Paar  $G = (V, E)$  mit  $E \subseteq \{\{i, j\} | i, j \in V, i \neq j\}$  spezifizieren, da in einem Graphen jede Kante durch ihre zwei verschiedenen Endecken eindeutig bestimmt ist.

Ein gerichteter Graph oder Digraph entsteht, wenn man die Kanten eines Graphen mit einer Richtung versieht. Ein gerichteter Graph ist also ein Paar  $G = (V, E)$  mit  $E \subseteq \{(i, j) | i, j \in V, i \neq j, (i, j) \neq (j, i)\}$ . Die Kanten eines gerichteten Graphen werden zur Unterscheidung vom ungerichteten Graphen auch Bögen genannt. Jeder Graph  $G' = (V', E')$  mit  $V' \subset V$  und  $E' = \{(i, j) \in E | i, j \in V'\}$  heißt ein Teilgraph.

Die Ordnung eines Graphen wird durch die Anzahl der Knoten  $N = |V|$  definiert. Die Anzahl der an einer Ecke inzidenten Kanten wird mit Eckengrad bezeichnet. Demnach ist der Eckengrad einer isolierten Ecke gleich Null.

Um ein Telekommunikationsnetz mittels eines Graphen zu modellieren, werden die wichtigsten für den Netzentwurf relevanten Größen auf einen Graphen abgebildet. Die Ecken eines Graphen stellen dann die Netzknoten dar, während die Kanten die Verbindungseigenschaften, wie Übertragungsstrecken, Flüsse, Verbindungskosten usw. repräsentieren können.

Ist ein Netz bzw. ein Teilaspekt eines Netzes in einem Graphen abgebildet worden, dann kann man den Graphen mittels Algorithmen untersuchen. Dabei bedient man sich einiger Begriffe, die hier kurz erläutert werden. Ein Pfad zwischen den Ecken  $v_1$  und  $v_2$  ist eine Liste der Ecken, die fortlaufend durch Kanten verbunden sind. Ein Graph nennt man zusammenhängend, wenn es einen Pfad von jeder Ecke zu jeder anderen gibt. Ein einfacher Pfad existiert, wenn in der Eckenliste jede Ecke nur einmal vorkommt. Ein Zyklus entsteht, wenn bei einem einfachen Pfad die erste Ecke mit der letzten verbunden ist. Besitzt ein Graph keinen Zyklus, so liegt ein Baum vor. Eine Sammlung von nicht zusammenhängenden Bäumen heißt Wald. Ein Spannbaum eines Graphen ist ein Teilgraph, der gleiche Ecken besitzt, und dessen Kantenzahl genügend für einen Baum ist.

## 2.3 Nachrichtenvermittlungsnetze

Ein Nachrichtenvermittlungsnetz dient zum Austausch von Nachrichten zwischen Quellen und Senken der Nachrichten mit Hilfe der Netzvermittlungsknoten. Man kann prinzipiell zwischen zwei Vermittlungstechniken unterscheiden: Kanalvermittlung (*circuit switching*) und Paketvermittlung (*packet switching*). Die Kanalvermittlungstechnik ordnet den beiden Kommunikationsteilnehmern für die Dauer der Kommunikation exklusiv eine Verbindung zu. Die Paketvermittlungstechnik sieht dagegen eine mehrfache Ausnutzung der Übertragungswege vor. Für Überlegungen zur Topologieoptimierung in dieser Arbeit auf der Basis von Verkehrsströmen wurde die Kanalvermittlung zugrundegelegt. Eine Erweiterung auf Paketvermittlung kann durch die Modellierung der Paketströme auf virtuellen Verbindungen erfolgen. Im folgenden werden einige Beispiele relevanter Nachrichtenvermittlungsnetze kurz erläutert, die der Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Topologieentwurfsverfahren zugrundeliegen.

### 2.3.1 Fernsprechnetze

Fernsprechnetze sind symmetrische Anordnungen von Übertragungsmedien derart, daß jeder Fernsprechteilnehmer mit jedem anderen am Netz kommunizieren kann. Fernsprechteilnehmer benutzen Übermittlungseinrichtungen (Übertragungs- und Vermittlungseinrichtungen) gemeinsam. Dies wird durch Zeitmultiplexsysteme auf den Fernleitungen und gemeinsame Vermittlungseinrichtungen ermöglicht.

Das Fernsprechnetze setzt sich aus Fernnetz und mehreren Ortsnetzen zusammen. Jeder Teilnehmer wird durch eine Ortsvermittlungsstelle (OVSt) an das Fernsprechnetze angeschlossen. Ein Ortsnetz ist ein geographischer Bereich, der mehrere Anschlußbereiche (AsB) umfaßt. Jeder Anschlußbereich besitzt mindestens eine OVSt, die durch Ortsverbindungsleitungen mit anderen OVSt verbunden wird. Endvermittlungsstellen (EVSt) ermöglichen den Anschluß der Ortsnetze an das Fernnetz. Leitungen mit vielen gleichzeitig nutzbaren Kanälen bzw. Übertragungsmedien, die zwei Vermittlungsstellen verbinden, heißen Leitungsbündel (*trunk*).

### 2.3.2 Datennetze

Datenkommunikationsnetze sind viel älter als Sprachkommunikationsnetze. Im Jahr 1835 wurde die Telegrafie als die erste Möglichkeit der Telekom-

munikation für Daten erfunden. Der Durchbruch der Datenkommunikation über Fernsprechnetze wurde durch die Entwicklung eines kommerziellen Modems von COLLINS RADIO COMPANY im Jahr 1955 erreicht. Solche Modems wurden bald Basis für verschiedene Kommunikationssysteme. Das erste durch ARPA<sup>7</sup> geförderte Netz für paketvermittelte Datenkommunikation zwischen Rechnern wurde mit nur vier Knoten im Jahr 1969 in Betrieb gesetzt. In 1975 wurde das erste öffentliche paketvermittelte Netz durch TELENET CORPORATION betrieben. 1982 wurde das Datex-P Netz nach ITU-T Empfehlung X.25 in Deutschland eingeführt. Daneben bestand bereits ein Netz (Datex-L) für kanalvermittelte Datenübertragung, das zunächst auf Verbindungswegen des analog übertragenden Fernsprechnetzes realisiert war. Beide Netze wurden in das integrierte Text- und Datennetz (IDN) mit digitaler Übertragung überführt.

### 2.3.3 ISDN

Sprach- und Datennetze sind inzwischen in das ISDN<sup>8</sup> integriert worden. Eine vollständige Integration aller Dienste bedeutet Ersparnisse für den Benutzer, z.B. muß er nicht mehr Schnittstellen zu mehreren Netzen betreiben und hat eine einheitliche Rufnummer. Die Übertragung erfolgt plesiochron, digital über Koaxial-, Glasfaser und Richtfunkstrecken im Zeitmultiplex mit 64 bzw. 2048 kbit/s am Teilnehmeranschluß und 2, 8, 34, 144 Mbit/s im Netz.

### 2.3.4 SDH-Netz

Die Nachfrage nach hochbitratiger Übertragung über vermittelte Netze führte zur weltweiten Einführung synchroner digitaler Netze, der sog. Synchronen Digital-Hierarchie (*Synchronous Digital Hierarchy, SDH*). Als Medium werden dabei Glasfasern und neuerdings Richtfunk mit Übertragungsraten auf den Multiplexstrecken von 155, 600, 1200 Mbit/s, usw. eingesetzt. SDH-Systeme werden für die synchrone (STM<sup>9</sup>) und die asynchrone (ATM) Nachrichtenübertragung benutzt.

---

<sup>7</sup> *Advanced Research Projects Agency*

<sup>8</sup> *Integrated Services Digital Network*

<sup>9</sup> *Synchronous Transfer Mode, STM*

### 2.3.5 ATM-Netz

ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) ist eine Paketvermittlungstechnik, die 53 byte lange Pakete (Zellen) im statistischen Zeitmultiplex, entlang virtueller Kanalverbindungen, über digitale plesiochrone oder synchrone Netze hoher Bitraten überträgt. Der Dienst ist eng verwandt mit der Paketvermittlung nach X.25 bzw. dem sog. Frame Relay Dienst. Virtuelle Kanäle treten anstelle von realen Kanälen, wie sie bei ISDN zur exklusiven Bereitstellung einer konstanten Übertragungskapazität für eine Verbindung zwischen Teilnehmern üblich ist. Virtuelle Kanäle werden durch reale Übertragungs- und Vermittlungskapazität im Netz unterlegt, sobald Zellen zur Übermittlung auftreten, sonst werden die Betriebsmittel des Netzes für andere Zellströme bereitgehalten.

## 2.4 Netzverkehrstechnik

Vermittlungsstellen werden miteinander durch Leitungsbündel bzw. Kanalbündel verbunden. Die Anzahl der Kanäle entspricht der Anzahl der benötigten Verbindungen. Einer der wichtigsten Schritte bei der Netzplanung ist die Bestimmung der Anzahl und Stärke der zu verwendenden Leitungsbündel für die Vernetzung von Vermittlungsstellen. Man bezeichnet diesen Prozeß als Routendimensionierung. Um eine Route richtig zu dimensionieren, muß man wissen, wie viele Teilnehmer miteinander gleichzeitig in der Hauptverkehrsstunde über die Route kommunizieren wollen. Die Dimensionierung von Übertragungsrouten löst man u.a. mit den Methoden der Verkehrstheorie. Dabei betrachtet man zwei Parameter [18, 65]:

1. Anrufrate (*calling rate*) aus der der Verkehrswert (*carried traffic*) auf der Leitung während der Hauptverkehrszeit resultiert (getragene Rufe = versuchte Rufe – zur Verlust gehende Rufe).
2. Gesprächsdauer (*holding time*): die durchschnittliche Belegungsdauer der Kanäle durch Anrufe.

Im Rahmen der Verkehrstheorie werden folgende allgemeine Definitionen zur Ermittlung von der Hauptverkehrsstunde (*Busy Hour, BH*) angewandt:

1. Mittlerer Wochentagsverkehr aufgrund ein- oder zweiwöchiger Verkehrsmessungen während Jahreszeitabschnitten ohne Feiertage und Urlaub.

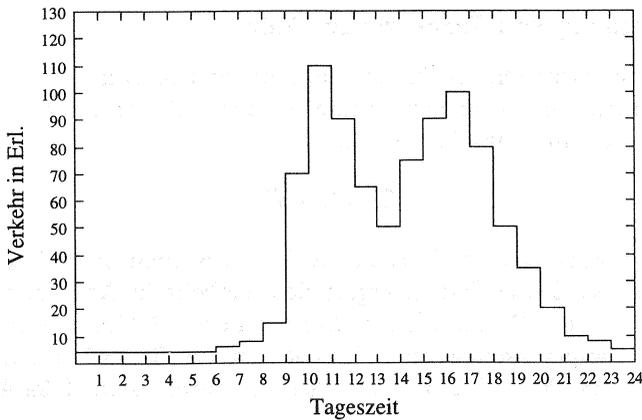


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Verkehrswerte eines typischen Werktages in Erlang (Zahl gleichzeitig belegter Kanäle

2. Mittlerer Verkehr von 30 Geschäftstagen innerhalb eines Jahres (definiert in ITU-T Rec. Q.80 als *mean busy hour traffic*)
3. Mittlerer Verkehr von 10 Geschäftstagen innerhalb eines Jahres (Nordamerika)
4. Mittlerer Verkehr von 5 Geschäftstagen innerhalb eines Jahres (ITU-T Rec. Q.80 und Rec. Q.87)

Verkehrsanforderungen von Teilnehmern an das Netz sind i.a. zufällig. Jedoch gibt es gewisse Regelmäßigkeiten. Z.B. gibt es montags und freitags üblicherweise mehr Anrufe als dienstags. Solche Merkmale findet man auch in stündlichen Verkehrswerten während der Werktage. An einem typischen Tag ist der Verkehrswert einer Stunde höher als in einer anderen. Der größte Verkehrswert einer Stunde kann bis zu 100 fach mehr betragen als der kleinste Verkehrswert einer anderen Stunde. Die Abbildung 2.4 zeigt schematisch typische stündliche Verkehrsschwankungen von Vermittlungsstellen [18]. Es ist zu erkennen, daß zwischen 10 und 11 Uhr die Hauptverkehrszeit ist. Von einem Tag zum anderen schwankt der Verkehrswert in den Hauptverkehrszeiten zwischen 20% und 25%. Für die Dimensionierung der Leitungsbündel muß auch das Systemwachstum in Betracht gezogen werden. Dafür wird der Verkehr der Hauptverkehrsstunde üblicherweise durch Extrapolation des gemessenen Verkehrs prognostiziert.

### 2.4.1 Messung von Fernsprechverkehr

Wird Fernsprechverkehr als Summe der Fernsprechanrufe auf Leitungsbündel hinsichtlich der Dauer der Anrufe definiert, so kann der Verkehrsfluß folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$T = C \times D$$

wobei  $C$  die Anrufrate erfolgreicher Rufe pro Stunde und  $D$  die mittlere Anrufsdauer ist. Diese Formel ergibt den Verkehr in Anrufminuten oder Anrufstunden. Ist z.B. die mittlere Anrufsdauer 4,2 Minuten und die Anrufrate der Hauptverkehrsstunde eines bestimmten Tages 157, dann beträgt der Verkehrsfluß  $157 \times 4,2 = 659,4$  Anrufminuten, bzw. 10,99 Anrufstunden.

Üblicherweise wird der Verkehrsfluß bevorzugt in der dimensionslosen Einheit Erlang gemessen (benannt nach dem dänischen Mathematiker A.K. ERLANG). 1 Erlang Verkehr auf einem Kanal bedeutet die ununterbrochene Belegung des Kanals in der Hauptverkehrsstunde. Für ein Bündel von Kanälen entspricht der Verkehrswert in Erlang dem Produkt aus der Anzahl der Anrufe in der Hauptverkehrsstunde und der mittleren Gesprächsdauer.

### 2.4.2 Blockierung im Netz

Angenommen für eine isolierte Ortsvermittlungsstelle mit 5000 Teilnehmern nehmen höchstens 10% der Teilnehmer den Netzdienst gleichzeitig in Anspruch, d.h. die Vermittlungseinrichtung kann maximal 500 Anrufe gleichzeitig vermitteln. Versucht der 501. Teilnehmer anzurufen, bekommt er keine Verbindung, weil die Kapazität der Vermittlung erschöpft ist. Sein Anruf wird blockiert. Die Wahrscheinlichkeit für einen blockierten Anruf ist ein wichtiger Parameter in der Verkehrstheorie für die Dimensionierung eines Telekommunikationsnetzes. Vermittlungseinrichtungen werden so dimensioniert, daß die Verkehrsbelastung der Hauptverkehrsstunde mit einer bestimmten Blockierwahrscheinlichkeit ermöglicht werden kann. Hätte man Vermittlungseinrichtungen so überdimensioniert, daß beliebig hoher Verkehr vermittelt werden könnte, würde das System dem Wettbewerbsdruck am Markt nicht Stand halten können. Bei richtig dimensionierten Vermittlungseinrichtungen erwartet man, daß während der Hauptverkehrszeiten Anrufe blockiert werden. Der entsprechende Dienstgüteparameter heißt Blockierwahrscheinlichkeit  $p$  (z.B.  $p = 0.01$ ). Dies bedeutet, daß im Mittel 1% der

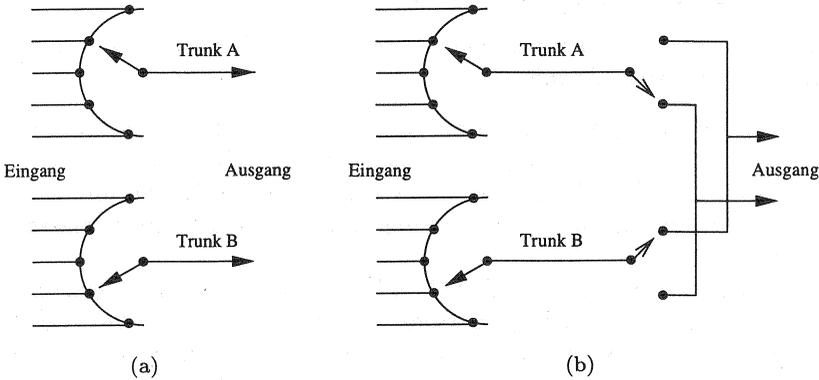


Abbildung 2.3: Vermittlungsanlage (a) ohne volle Erreichbarkeit (b) mit voller Erreichbarkeit

Anrufe während der Hauptverkehrszeit blockiert wird, d.h. also nicht zu einer Verbindung führt.

Die mittlere Dienstgüte eines Netzes erhält man durch Aufsummieren der Dienstgüteparameter der einzelnen Vermittlungsstellen, der Vermittlungsteilnetze und der Kanalbündel unter Betrachtung der Abhängigkeiten.

### 2.4.3 Verfügbarkeit von Vermittlungsstellen

Vermittlungsanlagen bestehen aus Geräten mit Schnittstellen für Leitungen oder Leitungsbündel. Man kann sie als Schalter mit Ein- und Ausgängen modellieren. Eine Vermittlung hat die Eigenschaft der vollen Erreichbarkeit, wenn jeder Eingang mit jedem beliebigen Ausgang verbunden werden kann. Eine Vermittlung bietet begrenzte Erreichbarkeit, wenn nicht jeder freie Ausgang durch einen Eingang erreicht werden kann. Abbildungen 2.3(a) und 2.3(b) zeigen Vermittlungsanlagen mit voller bzw. begrenzter Erreichbarkeit. Die den Untersuchungen in dieser Arbeit zugrundeliegenden modernen elektronischen Vermittlungsanlagen können alle Eingänge mit allen Ausgängen wahlfrei vermitteln [18].

#### 2.4.4 Behandlung blockierter Anrufe

Man unterscheidet in der Verkehrstheorie drei Möglichkeiten bzgl. der Behandlung blockierter Anrufe:

- **Aufbewahren (*lost calls held, LCH*):** Man nimmt an, daß der Anrufer sofort wieder versucht anzuwählen, sobald er ein Besetzttsignal empfangen hat. Der Anrufer wünscht sich, daß ihm eine Verbindung zugewiesen wird, sobald eine Leitung frei oder eine Vermittlungsanlage verfügbar ist.
- **Löschen (*lost calls cleared, LCC*):** Nach dem ersten mißlungenen Versuch legt der Anrufer den Hörer auf und wartet eine gewisse Zeit, bevor weitere Versuche gemacht werden. Die blockierten Anrufe verlassen das System. Weitere Versuche nach einer Pause bedeuten quasi neue Anrufe. Die Erlang-Formel basiert auf einem solchen Benutzerverhalten.
- **Verzögern (*lost calls delayed, LCD*):** Bei diesem Verfahren wird der blockierte Anrufer in eine Warteschlange eingereiht. Es gibt drei Warteschlangenprinzipien für dieses Verfahren: FIFO, LIFO und RANDOM. Dieses Verfahren findet man in modernen computer-gestützten Vermittlungssystemen.

Die Erlang-Formel eignet sich zur Dimensionierung der Verfahren LCC und LCD. Für LCH wird die Poisson-Formel benutzt (vgl. Abs. 2.4.5).

#### 2.4.5 Erlang- und Poisson-Verkehrsformel

Bei der Dimensionierung eines Übertragungsweges wird die Anzahl der benötigten Kanäle bestimmt. Dafür gibt es einige auf der BH-Verkehrsbelastung basierende Formeln, die von folgenden Parametern abhängen: Zwischenankunftszeit und Bediendauer von Rufen, Anzahl der Verkehrsquellen, Erreichbarkeit der Vermittlung und Behandlung blockierter Anrufe.

Die Verlustformel Erlang-B ist wahrscheinlich die bekannteste. Sie ist durch ITU-T standardisiert worden (ITU-T Rec. Q.87) und wird in Ländern außerhalb der Vereinigten Staaten von Amerika i.d.R. eingesetzt.

$$E_B = \frac{\frac{A^n}{n!}}{1 + A + \frac{A^2}{2!} + \dots + \frac{A^n}{n!}} \quad (2.1)$$

wobei gilt:

- $n$  : Anzahl der Kommunikationskanäle eines Bündels,
- $A$  : mittlerer Verkehrswert in Erlang,
- $E_B$  : Blockierwahrscheinlichkeit nach der Erlang-B-Formel.

Diese Formel beruht auf folgenden Annahmen:

- unendliche Anzahl von Verkehrsquellen (Unabhängigkeit der Rufe),
- Löschen von blockierten Anrufen,
- endliche Anzahl der Kanäle, und
- volle Erreichbarkeit.

Man kann diese Formel zur Anwendung in der Praxis so umformen, daß sich eine rekursive Formel ergibt:

$$E_B(n+1) = \frac{A \cdot E_B(n)}{n+1 + A \cdot E_B(n)} \quad (2.2)$$

Man geht dabei von der Tatsache aus, daß die Blockierwahrscheinlichkeit  $E_B$  gleich 1 ist, wenn kein Bediener vorhanden ist, d.h.  $E_B(0) = 1$ . Ähnlich bekommen wir  $E_B(1) = \frac{A}{1+A}$  und so fort [27]. Außerdem ist es durch die rekursive Formel leicht möglich, die für die Dimensionierung erforderliche Anzahl der benötigten Kanäle  $n$  für gegebene Werte von  $E_B$  und  $A$  zu berechnen.

In den USA werden Vermittlungen für das LCH-Verfahren dimensioniert, und es wird deshalb die Poisson-Formel benutzt, um die Wahrscheinlichkeit für  $n$  gleichzeitige Rufe zu bestimmen [65, 18]. Sie lautet:

$$P = \frac{A^n \cdot e^{-A}}{n!} \quad (2.3)$$

wobei gilt:

- $n$  : Anzahl der Kanäle im Bündel,
- $A$  : mittlerer Verkehrswert,
- $P$  : Wahrscheinlichkeit, daß  $n$  Rufe während der Bediendauer eines Rufes im System eingehen.

Für die Poisson-Formel werden folgende Annahmen gemacht:

- unendliche Anzahl von Verkehrsquellen,
- Einreihen in eine Warteschlange,
- begrenzte Anzahl an Kanälen, und
- volle Erreichbarkeit.

### 2.4.6 Schätzung des Netzverkehrs für neue Systeme

Der internationale Telekommunikationsverein (ITU) verfügt über eine Menge von Netzverkehrsdaten verschiedener Typen. Solche Daten basieren auf Studien über öffentliche Netze weltweit. AT&T (1966) und CCITT (1964 bis 1968) lieferten mittlere BH-Verkehrswerte (ankommende und abgehende Anrufe) als 0,058, 0,04 und 0,037 Erlang für einen typischen Fernsprechteilnehmer bei AT&T und CCITT. Die Zahlen aus den Geschäftsstellen der Ärzte und der Anwälte sowie aus den Fernsprechteilnehmern mit Nebenstellenanlagen weichen von denen der privaten Fernsprechteilnehmer ab. Sie liegen bei 0,25 Erlang. Der Gebrauch des Personal-Computer (PC) durch Firmen für Datenfernverarbeitung ist weit verbreitet. Seit PCs das öffentliche analoge Fernsprechnetzen benutzen, ist der Verkehrswert gestiegen. Er beträgt auf PC-Anschlüssen 0,2 bis 0,9 Erlang (siehe auch [55, 18]). Weitere Informationen zu ITU-T-Empfehlungen über die Netzverkehrstheorie und die Netzplanung findet man in [17]. Eine Möglichkeit, den Verkehr für ein zu entwerfendes Netz zu prognostizieren, ist in Kap. 5 gegeben. Die Prognose beruht auf den statistischen Daten der Arbeitsstättenzählung [66].

Für Datenanwendungen gibt es keine Angaben über die mittleren Verkehrswerte. Jede Anwendung oder jeder Benutzer unterscheidet sich von anderen. In diesem Fall gibt es keine einheitlichen Verkehrsmodelle. Man kann aber annehmen, daß jedes Terminal einen vorgegebenen (minimalen) Verkehrsanteil der gesamten Kapazität produziert. Durch einen Verkehrswachstumsfaktor kann man dann den Gesamtverkehr im Netz variieren.

### 2.4.7 Schätzung des Netzverkehrs für existierende Systeme

Die meisten Netze mit Vermittlungsanlagen verfügen über die Fähigkeit, jeden Anruf auf Magnetband aufzuzeichnen. Es gibt zwei Typen von Verkehr auf Band für Fernsprechnetze. Das SMDR-Band (*Station Message Detail Recording*) wird durch Nebenstellenanlagen (PABX<sup>10</sup>) täglich oder monatlich produziert. Das AMA-Band (*Automatic Message Accounting*) wird allgemein durch Netzmanagement-Knoten monatlich produziert. Während das SMDR-Band detaillierte Fernsprechanrufe, die durch eine PABX vermittelt werden, aufzeichnet, registriert das AMA-Band die Anrufe auf, die durch Vermittlungsknoten vermittelt werden. Jede Aufzeichnung kann die miteinander kommunizierenden Knoten, die Zeitangabe oder die Anrufdauer bzw.

<sup>10</sup> *Private Automatic Branch eXchange*

die Datenmenge beinhalten. Detaillierte Verkehrsflüsse zwischen Knotenpaaren können daraus abgeleitet werden. Diese Informationen werden für die Netzplanung bzw. Netzerweiterung verwendet. Eine optimale Netzdimensionierung beruht auf geeigneten Methoden zur Ermittlung von zeitkonsistenten Verkehrsmittelwerten (*Time Consistent Average, TCA*).

### 2.4.8 Netzverkehrstechnik in der Praxis

Um die für die Netzdimensionierung wichtigen zeitkonsistenten Verkehrsmittelwerte zu erhalten, werden in der Praxis zwei Verfahren verwandt [55]:

- ITU-T-Methode, die die monatlichen 30 Hauptverkehrsstunden der jährlichen Verkehrsdaten erfordert, und
- Nordamerikanische Methode, die die monatlichen Verkehrsdaten erfordert.

Der Hauptunterschied zwischen den beiden Methoden liegt in der Menge der verwendeten Daten. Bei der nordamerikanischen Methode braucht man nur ein einziges monatliches AMA-Band mit Verkehrsdaten, während die ITU-T-Methode zwölf solcher Verkehrsbänder im Jahr benötigt.

Das ITU-T-Verfahren, für die Berechnung des zeitunabhängigen Verkehrs, wird durch die Tabelle 2.1 illustriert. Danach werden die ersten 30 höchsten Werte der jährlichen Verkehrsflüsse berücksichtigt.

Tabelle 2.2 zeigt die Einträge für das nordamerikanische Verfahren. Sie enthält Einträge für alle 30 Tage und alle 24 Stunden am Tag. Für die Planung eines privaten Firmennetzes werden die Geschäftsstunden an Geschäftstagen gezählt.

Es soll hier betont werden, daß beide Verfahren auf irgendeinen Punkt-zu-Punkt-Verkehrsfluß angewandt werden können. Beziehen sich die Messungen nicht auf eine bestimmte Netztopologie, ist der Punkt-zu-Punkt-Verkehrsfluß zwischen zwei bestimmten Teilnehmern gemeint. Die Ermittlung von TCA-Werten für jedes Teilnehmerpaar ist mit immensem Aufwand verbunden. Deswegen wird üblicherweise der Verkehrsfluß für jedes Knotenpaar oder die Verkehrsbelastung für jeden Knoten im Netz ermittelt. Die so ermittelten TCA-Werte sind für die Netzdimensionierung von großer Bedeutung.

Höchstwert1	Höchstwert2	Höchstwert3	...	Höchstwert30
T1	T2	T3	...	T30

$$\text{TCA} = \text{Mittelung}(\text{T1}, \text{T2}, \text{T3}, \dots, \text{T30})$$

Tabelle 2.1: ITU-T-Methode für die Berechnung von TCA

Stunden	Tag 1	Tag 2	...	Tag 30	TCA <sub>s</sub>
H1	T 1,1	T 1,2	...	T 1,30	TCA1
H2	T 2,1	T 2,2	...	T 2,30	TCA2
H3	T 3,1	T 3,2	...	T 3,30	TCA3
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
H24	T 24,1	T 24,2	...	T 24,30	TCA24

$$\text{TCA}_h = \text{Mittelung}(\text{TCA}_{h1}, \text{TCA}_{h2}, \text{TCA}_{h3}, \dots, \text{TCA}_{h30})$$

$$\text{TCA} = \text{Maximum}(\text{TCA}_1, \text{TCA}_2, \text{TCA}_3, \dots, \text{TCA}_{24})$$

Tabelle 2.2: Nordamerikanische Methode für die Berechnung von TCA

### 2.4.9 Schätzung des Backbone-Netzverkehrs

Die Verkehrsbelastung für ein Backbone-Netz kann nur exakt hergeleitet werden, wenn Verkehrswerte zwischen Knoten bekannt sind. Wenn dies nicht der Fall ist, kann man ersatzweise annehmen, daß die Verkehrsbelastung jedes Knotens gleichmäßig zu allen anderen Knoten verteilt ist. Danach kann der Verkehrsfluß in jeder Leitung berechnet werden. Eine symmetrische Verkehrsmatrix für ein Backbone-Netz kann folgendermaßen definiert werden:

1. Berechnung der Verkehrsbelastung ( $TT_i$ ) für jeden Knoten  $i$ ,
2. Berechnung der gesamten Verkehrsbelastung im Netz ( $GT$ ) und
3. Berechnung des Verkehrswertes zwischen den Knoten ( $T_{ij}$ ) nach folgender Formel:

$$T_{ij} = \frac{(TT_i * TT_j)}{GT} = T_{ji}$$

Wenn  $i = j$  ist, kann man den knoteninternen Verkehr bestimmen. Der knoteninterne Verkehr bedeutet, daß Quelle und Senke im gleichen Knoten zusammenfallen. Deshalb hat er keinen Einfluß auf die Leitungsdimensionierung. Man kann die Größe der Verkehrswerte zwischen den Knoten  $T_{ij}$  durch einen Faktor variieren. Nachdem die Verkehrswerte zwischen den Knoten berechnet wurden, wird die Kapazität der benötigten Leitungen bestimmt. Es ist zu bemerken, daß jeder in dieser Arbeit entwickelten Topologieoptimierungsalgorithmen Ende-zu-Ende-Verkehrsbeziehungen zwischen den Quellen und Senken des Verkehrs erfordert. Die Optimalität einer Topologie, die aufgrund der Knotenverkehrsinformation entworfen ist, wird durch die Güte der Abbildung des Knotenverkehrs auf Ende-zu-Ende-Verkehrsbeziehungen bestimmt.

## 2.5 Dienstgüte

Die Dienstgüte (*Quality of Service, QoS*) ist ein wichtiger Faktor in der Telekommunikation. Sie hat für verschiedene Teilnehmer eine unterschiedliche Bedeutung. Für Übertragungstechniker bedeutet QoS ein Maß für die Kundenzufriedenheit, d.h. wie gut ein Anruf empfangen und gehört werden kann.

In der Verkehrstheorie ist die Zahl blockierter Anrufe für den Vermittlungstechniker ein wichtiges Maß für die Dienstgüte. In dieser Arbeit wird die Blockierwahrscheinlichkeit als einziger Parameter zur Charakterisierung der Dienstgüte der untersuchten Netze herangezogen. Beispielhaft wird auf andere wichtige Parameter für Dienstgüte hingewiesen:

- Verzögerungszeit vor Empfang des Wähltons,
- Verzögerungszeit nach dem Wählen bis zum ersten Klingeln beim angerufenen Teilnehmer,
- Wahrscheinlichkeit für den Abbruch einer Verbindung,
- Verfügbare Töne (für besetztes Telefon, defektes Telefon usw.),
- Korrektheit der Telefonrechnung,
- Angemessene Kosten für die Kunden,
- Reaktion auf Dienstanforderung,
- Reaktion und Höflichkeit des Operators (bei Handvermittlung),
- Installationsdauer eines neuen Telefons usw..



# Konventionelle Netzplanung

**D**as ständige Wachsen der Kommunikationsbedürfnisse im öffentlichen und privaten Bereich führt zu einem wesentlichen Anstieg des zu bewältigenden Verkehrs und der benötigten Netzbetriebsmittel. Um diesem Wachstum gerecht zu werden, ist eine optimale Planung der bereitgestellten Netze unerlässlich. Erst dadurch können vorhandene Investitionsmittel effizient eingesetzt und die Wettbewerbsfähigkeit erhalten werden.

Unter Netzplanung und Bereitstellung von Netzbetriebsmitteln werden Funktionen und Tätigkeiten der Planung, Bereitstellung und Implementierung der erforderlichen Ressourcen (Vermittlungsrechner, Leitungen), aufgrund von Schätzwerten über existierende und neue Anwendungen mit Hilfe von Modellen, Emulatoren und Simulatoren verstanden. Die richtige Ausführung dieser Funktionen und Tätigkeiten garantiert, daß der Bedarf an Betriebsmitteln sowohl für die Spitzenlast in der Hauptverkehrsstunde (BH) als auch für die Durchschnittslast befriedigt wird.

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Aspekte der konventionellen Netzplanung zusammengefaßt. Eine Klassifikation der Netzplanungsprobleme und des Standes der Forschung bzgl. der Lösungsverfahren verdeutlicht die Notwendigkeit und den Beitrag der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren.

### 3.1 Planungsziele

In den letzten Jahren hat sich die Netzplanung als ebenso wichtig erwiesen, wie die Zulieferindustrie für Netze. Die Netzplaner der Telekommunikationsnetze haben das primäre Ziel, Kommunikationsnetze mit minimalen Kosten und maximaler Dienstgüte zu entwerfen, zu planen und zu betreiben [62]. Durch eine Steigerung der Planungsqualität können Netzkosten beträchtlich gesenkt und auf Veränderungen flexibel reagiert werden. Der Einsatz von guten Planungswerkzeugen und Entwurfsalgorithmen führt zu

einer Leistungssteigerung. Die zu erwartenden Vorteile lassen sich wie folgt beschreiben:

- **Erhöhung der Planungsqualität** durch die Verbesserung der Koordination und Kommunikation der Planungsbeteiligten und die Möglichkeit des frühzeitigen Erkennens von Planungsfehlern und Entlastung des Planers von Routineaufgaben.
- **Verringerung der Planungszeit** durch eine größere Flexibilität bei Änderungen durch Benutzung eines Werkzeugs. Dies betrifft sowohl den Mensch-Maschine-Dialog, als auch den Zugriff auf und die Aktualisierung von Wissen, das im System vorhanden ist, u.a. durch eine Vereinheitlichung und Konsistenz der Dokumentation.
- **Senkung der Planungskosten**

Das Hauptziel der Netzplanung betrifft die Wirtschaftlichkeit. Der große Teil der technischen Planungsprozesse in der Praxis besteht darin, eine der vielen verschiedenen Planungsmöglichkeiten zu wählen, um einen bestimmten Grad von Netzentwicklung und Netzausbau hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Jedoch ist die Wirtschaftlichkeit nicht der einzige Faktor.

## 3.2 Planungsprozeß

Die Komplexität der Netzplanung in der Praxis erfordert eine Teilung des Planungsprozesses trotz leistungsfähiger Computerwerkzeuge. Die Aktivität der Planung umfaßt eine große Anzahl von Schritten wie z.B. Verkehrsplanung, topologische Optimierung, Wegewahlstrategie, Gerätezuordnung und Dokumentation der Planungsergebnisse. Im allgemeinen kann man den Planungsprozeß für Telekommunikationsnetze bzgl. der Netzfunktionalität in zwei Teilgebiete unterteilen:

- **Optimierung der Vermittlungsnetze:** Die Verkehrsflüsse zwischen allen Vermittlungsknoten werden berechnet.
- **Optimierung der Übermittlungsnetze:** Die Netzstruktur wird in dieser Phase bestimmt. Die Kapazität der Knoten und der Leitungen muß den jeweils zu übertragenden Verkehr tragen können.

Darüber hinaus wird hinsichtlich des Zeithorizonts bei Telekommunikationsnetzen zwischen drei Planungsprozessen unterschieden [24]:

- **Langfristige Planung:** Die langfristige Planung legt grundsätzlich das Ziel für die nächsten 5 bis 10 Jahre fest, und strebt eine optimale Netzstruktur am Ende der technologischen Entwicklung an. Die langfristige Planung basiert jedoch auf ungenauen Eingabedaten, weil für eine lange Periode die Dienstanforderung, die Technologie und die Kostenparameter des Netzes nur unzureichend vorausgesehen werden können. Deswegen wird in der Praxis das Ergebnis der langfristigen Planung niemals zu einem kostenoptimalen Netz führen. Man wird stattdessen versuchen, eine große Anzahl möglicher Szenarioentwicklungen zu studieren und eine möglichst flexible Netzstruktur zu erreichen.

Die Eingabedaten für die langfristige Planung sind Knotenspezifikationen, technische und geographische Bedingungen, Sicherheitsbedingungen, Verkehrsanforderungen zwischen den Knoten für verschiedene Netzdienste und die Kostencharakteristika der potentiellen Geräte. Die durchzuführenden Schritte dieser Planung konzentrieren sich im Grunde auf die topologische Optimierung.

Als Resultate der langfristigen Planung erhält man grundsätzlich die Form der Topologie eines flexiblen Netzes mit den zugehörigen ungefähren Kantenkapazitäten und Anlagenstandorten. Natürlich kann man das Zielnetz nicht als das zukünftige in der gegebenen Zeit zu realisierende Netz betrachten. Das Grundziel der Langzeitplanung ist die strukturelle Orientierung für die kurzzeitige Entwicklung.

- **Mittelfristige Planung:** Die mittelfristige Planung soll eine Festlegung eines Netzes für maximal 5 Jahre vorgeben. Für diese Periode sind evtl. neue bzw. existierende Dienstanforderungen, technologische und finanzielle Möglichkeiten und Bedingungen überschaubar bzw. bekannt. Deshalb hat das bereits existierende Netz großen Einfluß auf die möglichen Lösungen.

Die Verkehrs- und Sicherheitsanforderungen für die Planungsperiode, technische Daten und Kosten der benötigten Geräte, die Struktur des Zielnetzes aus der langfristigen Planung und die genauen Beschreibungen des existierenden Netzes sind für die mittelfristige Planung als Eingaben von Wichtigkeit.

Die Endentscheidung in der mittelfristigen Planung basiert auf der Bewertung und dem Vergleich von verschiedenen Planungsalternativen. Das Resultat beschreibt die optimale Evolution des Netzes, die Implementierung neuer Verbindungen, Einrichtungen, Anforderungen und

die Modifikation der Realisierung und der Nutzung von existierenden Anforderungen und Einrichtungen.

- **Kurzfristige Planung:** Diese Art von Planung ist eine Vorbereitung für die Investitionen in näherer Zukunft unter Berücksichtigung der aktuellen finanziellen und technologischen Bedingungen. Anders als die langfristige und mittelfristige Planung hinsichtlich der unterschiedlichen Aspekte gibt die kurzfristige Planung konkrete Anhaltspunkte für die Dimensionierung des Netzes und eine Menge detaillierter Dokumentationen für die Installation.

Die Eingaben für die kurzfristige Planung umfassen die Anforderungen für das Planungsjahr, die Kostendaten und die genauen Beschreibungen des existierenden Netzes gemäß dem optimalen mittelfristigen Entwurf.

Netzplanung ist ein interaktiver Prozeß und ist Teil eines komplexen Betriebszyklus, dessen Hauptaufgabe darin besteht, den laufenden Betrieb aufrechtzuerhalten. Die Netzplanungstechnik beginnt mit der Prognose des Netzverkehrs und der Festlegung der Netztechnologie. Mit den gegenwärtig vorhandenen Netzen als Basis werden die groben Entwürfe entwickelt. Netzerweiterung und -Modernisierung ergeben sich aus den Langzeitstudien und den ersten Entwürfen, wobei sie den finanziellen Rahmenbedingungen und Managemententscheidungen unterworfen sind.

Man unterscheidet zwischen Entwicklungsplan und technischem Plan. Diese Pläne sind Grundlagen für die detaillierten oder spezifizierten Pläne und sind unter den Randbedingungen finanzieller Möglichkeiten zu sehen. Entwicklungspläne geben Mittel zur Erfüllung der erwarteten Anforderungen für neue Leitungen und Dienste oder Dienstverbesserungen an. Technische Pläne legen technische Standards und Leitlinien fest. Sie geben an, welche Techniken benutzt werden, um die geforderte Flexibilität und Dienstgüte des Netzes garantieren zu können. Im Gegensatz zum Entwicklungsplan, bei dem die Quantität des Netzes spezifiziert wird, gibt der technische Plan die Qualität des Netzes an. Eine Planungsgruppe hat zweierlei Probleme simultan zu lösen: Die Erfüllung der Dienstanforderung für neue Teilnehmer und die Netzverbesserung durch neue Netzdienste. Die Planung von Telekommunikationsnetzen ist heute wie folgt charakterisierbar:

- Hersteller von Telekommunikationssystemen entwickeln sich vom Technik- zum Systemlieferanten, der auch Planungsaufgaben realisiert.

- Erfahrene Beratungsfirmen bauen hochspezialisierte Planungsgruppen auf, die Hersteller und Netzbetreiber beraten.
- Der Planungsprozeß selbst wird untergliedert in mehrere Phasen, von denen die strategische und die technische Planung die wichtigsten sind.

Die technische Planung schließt sich an die strategische Planung an, setzt deren Konzepte um und stellt das technische Funktionieren der Systeme und die technische Umsetzbarkeit der Lösung sicher. Beispiele dafür sind das Festlegen von Systemkonfigurationen, Aufstellplänen, Wegewahltafeln, Anpassen der Software.

Unter dem Begriff strategischer Planung werden alle Arbeiten und Entscheidungen zusammengefaßt, die das Netzkonzept betreffen und deren Qualität starke Auswirkungen auf die Kosten des Netzes hat. Beispiele damit verbundener Fragestellungen sind:

- Wo befinden sich potentielle Teilnehmer, wie sieht deren Kommunikationsverhalten bezüglich Umfang und weiteren Parametern aus?
- Welche technischen Systeme sollen eingesetzt werden (z.B. kanal- oder paketvermittelte Datensysteme, leitungs- oder richtfunkgebundene Übertragung)?
- Wieviel und wo sollen welche konzentrierenden technischen Einrichtungen (Multiplexer, Vermittlungsstellen, abgesetzte vermittlungstechnische Konzentratoren) installiert werden?
- Durch welche Struktur sollen diese Einrichtungen miteinander verbunden werden (hierarchische oder nichthierarchische Netze, Ring-, Stern- oder Maschennetze)?

Ziel ist es, unter der Vielzahl möglicher Antworten auf diese Fragen jene zu finden, die alle betrieblichen, technischen und sonstigen Randbedingungen erfüllen, deren Kosten verglichen mit allen anderen denkbaren Lösungen minimal sind und die die geforderte Güte und Zuverlässigkeit erbringen. Um diese Aufgaben zu lösen, werden die Telekommunikationsnetze in ihren wesentlichen Eigenschaften, wie z.B. geographische Standorte, Netzstrukturen, Kapazitäten und Kostenfunktionen der Netzkomponenten, nachgebildet.

Der Erfolg und Aufwand der strategischen Planung ist vom Fachwissen des Netzplaners und von der Nutzung unterstützender Software abhängig [23]. Dabei wird der Durchdringungsgrad eines Werkzeugs von der Aufgabenstellung bestimmt. Handelt es sich um häufig wiederkehrende Aufgaben wie Optimierung von Anzahl und Standorten abgesetzter Konzentratoren zur

kostengünstigen Anschaltung von Terminals an einen Host-Rechner oder die Optimierung der Struktur von Übertragungsnetzen, ist es lohnend, Werkzeuge zu entwickeln. Der Netzplaner beschafft die entsprechenden Daten und bereitet sie auf, bzw. variiert die Eingabeparameter. Die Suche nach der optimalen Lösung wird vollständig dem Rechner übertragen oder interaktiv gelöst (s. Kap. 10 und 11).

### 3.3 Klassifizierung der Netzplanungsprobleme

Hinsichtlich der Natur der Netzdienste unterscheidet man zwischen dem Einzeldienstnetz, bei dem nur ein einziger Netzdienst, wie z.B. Sprache angeboten wird, und dem Multidienstnetz, bei dem Sprache, Daten und Bilder übertragen werden können. Der zu übertragende Verkehr hat stochastische Eigenschaften, was zu Schwierigkeiten für die Netzplanung und Netzoptimierung führt. Auch die Wegewahlprinzipien zur Bestimmung von Leitwegen sind ein entscheidender Faktor für die Planungsmodelle. Zur Netzplanung gehören eine Menge komplexer Planungswerkzeuge und Tätigkeiten, die sich auf das topologische oder strukturelle Netz konzentrieren. Das globale Ziel des gesamten Planungsvorganges ist die Erfüllung bestimmter Dienstanforderungen, wobei der Ausgleich zwischen der Dienstgüte und der Kostenminimierung eingehalten wird. Im allgemeinen enthalten Netzplanungsprobleme eine enorme Anzahl Variablen in Verbindung mit komplexen funktionalen Abhängigkeiten und vielen Entscheidungskriterien. Das ist die Ursache dafür, daß es nötig ist, das Gesamtnetzplanungsproblem in Probleme kleinerer Dimension und Komplexität zu zerlegen, bis sie mathematisch und rechnerisch in vertretbarer Zeit lösbar sind. Natürlich müssen die einzelnen Probleme wieder zum Gesamtproblem zusammengesetzt werden können. Ferner werden sich Netze wegen technologischer Weiterentwicklungen und neuer verfügbarer Netzdienste verändern. Dies führt zu Modifikationen der ursprünglichen Planung. Die Entwicklung in unterschiedlichen Gebieten der mathematischen Programmierung und in immer leistungsfähigeren Programmwerkzeugen macht die Anwendung mathematischer Programmierungsmethoden für die Netzplanung attraktiver. Die in dieser Arbeit entwickelten zufallsgesteuerten Entwurfsalgorithmen eröffnen neue Möglichkeiten zur Lösung von Netzplanungsproblemen (s. Kap. 8 und 9).

Die Schwierigkeit bei der Lösung eines Problems mit Hilfe der mathematischen Programmierungsverfahren besteht in der Identifikation der wich-

tigsten Problemcharakteristika und in der Formulierung der Bedingungen. Aufgrund der impliziten Ähnlichkeit einiger Teilprobleme ist die Klassifikation der Probleme bzgl. der für sie geeigneten Lösungsverfahren angebracht. Die wichtigsten Informationen, die bei Netzplanungsproblemen von Bedeutung sind, sind folgende:

- die Topologie des Netzes und die Kapazität der Netzkomponenten (Vermittlungsanlagen, Leitungen, Funkverbindungen, Satelliten etc),
- Verkehr zwischen den Knoten (Verkehrsmatrix),
- Lage der Vermittlungssysteme und von Übergabepunkten zu Fremdnetzen,
- geographische Ausdehnung,
- Gebiete mit Angebot an Netzdiensten,
- Wegwahlverfahren,
- Typen der Vermittlungssysteme und der Übermittlungssysteme,
- funktionale Spezifikation der Vermittlungssysteme und Übermittlungssysteme,
- Kosten und Tarife der Netzkomponenten,
- geforderte Dienstgüte: Blockierwahrscheinlichkeit, Verzögerungszeit,
- technische und finanzielle Bedingungen,
- Zuverlässigkeit.

Eingabedaten, Zielfunktion, Bedingungen und Kriterien werden in der Problemstellung formuliert. Allgemeine Strategie für die Formulierung spezifischer Probleme ist die Anwendung eines detaillierten Modells für das bezüglich der Eingaben, Zielfunktion, und Bedingungen relevante allgemeine Problem, während Vereinfachungen der verbleibenden Aspekte vorgenommen werden. Der Vorgang muß den geforderten Grad an Genauigkeit und die mögliche Granularität (Auflösungstechniken) berücksichtigen.

### 3.3.1 Räumliche Zerlegung

Für flächenmäßig große Netze ist es zweckmäßig eine räumliche Zerlegung vorzunehmen. Hier werden zwei Zerlegungsebenen betrachtet: Ortsnetz und Vermittlungsnetz. Zu dem ersteren gehören Land- und Stadtnetz, zu dem letzteren gehören Bundes- und Großstadtnetze. Bei beiden Netzen können jeweils verteilte Netze existieren, die Teilnehmernetze bzw. Verbindungsnetze enthalten, wobei die Verbindungsknoten die Ortsknoten und Durchgangsknoten verbinden.

### 3.3.2 Wegewahlprinzipien

Wir unterscheiden zwischen einem hierarchischen Netz, bei dem mehrere Knoten einer niedrigen Ebene einem Knoten höherer Ebene zugeordnet werden und einem nichthierarchischen Netz, bei dem Verbindungen zwischen beliebigen Knoten möglich sind. Für beide Netztypen gibt es sowohl Direkt- und Durchgangswegewahl als auch Alternativwegewahl für den Fall, daß die Hauptroute überlastet ist oder ganz ausfällt. Für die Alternativroute gibt es zwei Wegewahlprinzipien:

- **Feste Alternativroute:** für ein gegebenes Netz werden die Folgen der möglichen Pfade aus jedem zu anderen Knoten fest in einer Wegewahltablette gehalten, und
- **Dynamische Route:** die Folgen der möglichen Pfade können jederzeit geändert werden.

Die dynamische Wegewahl gestattet die Optimierung der Netzkapazität als Funktion des sich mit der Zeit ändernden Verkehrs. Zwei Hauptschemata der dynamischen Wegewahl werden nach dem Stand der Technik in Betracht gezogen.

- **Überlauf-Wegewahl:** Falls Leitungen der ersten Route überlastet oder sogar blockiert sind, wird der Verkehr auf eine andere Route umgeleitet, die durch bestimmte Regeln gewählt wird.
- **Lastausgleichs-Wegewahl:** Der Verkehr wird über Pfade derart geleitet, daß insgesamt alle Leitungsbündel im Netz gleich belastet sind.

### 3.3.3 Planungsmodelle

Man unterscheidet zwischen den statischen und dynamischen Modellen. Bei den statischen Modellen werden die zu optimierenden Netze für das Ende der Planungsperiode festgelegt. Die dynamischen Modelle hingegen berücksichtigen die Strategie für die Netzerweiterung. Die Methoden zur Lösung solcher Probleme sind entweder heuristisch, mathematisch oder eine Kombination von beidem. Bei den heuristischen Methoden basiert die Lösung auf heuristischen Algorithmen (manchmal auch auf mathematischen Algorithmen für Teilprobleme). Bei mathematischen Programmiermodellen werden mathematische Algorithmen zum Lösen des Problems angewandt (heuristische Näherungen können bei der mathematischen Formulierungsphase vorgenommen werden). Die Mischmodelle werden als mathematisches Pro-

gramm formuliert. Für das Lösen des Problems geht man heuristisch so vor, daß man die Teilprobleme mit mathematischen Algorithmen löst und daraus die Gesamtlösung bestimmt. Die dabei gefundene Lösung ist eine Näherung für die exakte Lösung, die man bekommen hätte, wenn sich das Problem vollständig mit mathematischen Programmierungsalgorithmen lösen ließe. Manchmal ist die Grenze zwischen den heuristischen und gemischten Modellen schwer zu erkennen.

### 3.3.4 Handhabbarkeit der Probleme

Die sehr schwer mit Hilfe der mathematischen Programmierung lösbaren Probleme werden in der Literatur in einer Problemklasse besonderen Typs zusammengefaßt. Zu ihrer Lösung sind oft Vereinfachungen durch eine Problemumformulierung oder das Weglassen einiger Bedingungen im Lösungsraum erforderlich. Beispiele solcher Probleme sind:

- Netzmodernisierung
- Ausfallsicherheitsbedingung
- Budgetbeschränkung
- Ungewißheit der Eingabedaten

Für eine Diskussion über die Klassifikation der Probleme bzgl. ihrer Lösbarkeit wird auf Abs. 6.4 verwiesen.

## 3.4 Formulierung einiger Probleme

Eine große Anzahl der Netzplanungsprobleme kann nach den obigen Kriterien klassifiziert werden. Beispiele für die Problemformulierung gemäß der oben genannten Klassifikation sind:

- **Strukturoptimierung von hierarchischen Telefonnetzen mit festem Wegewahlverfahren:** Dies ist ein klassisches Problem der Netzplanung. Man kann es kurz folgendermaßen formulieren: Gegeben sind Netztopologie, Verkehrsmatrix, Leitungskostenfunktion, Wegewahlprinzip und die geforderte Dienstgüte. Man finde die Leitungskapazitäten so, daß die Gesamtleitungskosten minimal sind. BERRY (1970) hat dieses Problem anhand der Konvexprogrammierung formuliert und behandelt. Eine andere Formulierung für das strukturelle Optimierungsproblem ist das Finden der Leitungskapazität mit dem

Ziel, die Blockierwahrscheinlichkeit zu minimieren, wenn die Netzkosten (Budget) als explizite Bedingung vorgegeben sind. Dieses Problem ist zu dem ersteren völlig analog. Zielfunktion und Bedingungen sind einfach getauscht. Falls das Problem mathematisch gelöst werden soll, dann kann man den Programm-Code für das erste Problem ohne Modifikation übernehmen.

Dem funktionalen Planungsproblem entspricht das Wegewahl-Optimierungsproblem, das allgemein folgendermaßen formuliert werden kann: Man finde bei vorgegebener Netztopologie, Verkehrsmatrix und Leitungskapazität das Wegewahlverfahren so, daß die Dienstgüte optimal ist. Das Problem der globalen Optimierung für das funktionale Netz ist ein sehr schwieriges Problem, bei dem simultan beide oben genannten Problemtypen gelöst werden müssen.

- **Planung dynamischer Übermittlungssysteme mit Alternativwegewahl:** Dies ist ein wichtiges Problem der Übermittlungssystem-Optimierung, bei der Leitungsbündel entsprechender Kapazität den Kanten derart zugeordnet werden, daß die Kosten innerhalb einer Zeitperiode minimal sind. Dabei wird das Alternativwegewahlprinzip verwendet. Solche Probleme wurden intensiv in den siebziger und achtziger Jahren untersucht und gehören zur Klasse der komplexen Probleme. Man kann das Problem als statisches Problem betrachten, wobei das durch die Planung entstandene Netz innerhalb einer begrenzten Zeitperiode gilt.

Die oben genannten Probleme können verschiedene Formulierungen für die Problemspezifikation und unterschiedliche Lösungsansätze haben. Es ist üblich, gleiche Problemspezifikationen aber unterschiedliche Lösungsalgorithmen zu verwenden, um falls möglich, die Effizienz der Lösungsansätze zu prüfen.

Üblicherweise werden die Lösungen des Fernsprechnet-Planungsproblems durch auf Heuristiken basierende Algorithmen gefunden. Für Teilprobleme wie z.B. die Suche nach dem kürzesten Pfad werden mathematische Algorithmen angewandt.

## 3.5 Netzplanung mittels mathematischer Programmierung

Die Entwicklung der mathematischen Programmierung in verschiedenen Gebieten und die ständig wachsenden Optimierungsprobleme in der Fernsprechnet- und ISDN-Planung als Folge der rapiden Entwicklung in der Übertragungs- und Vermittlungstechnik haben die Anwendung der mathematischen Programmierung für die Netzplanung in der Praxis gerechtfertigt.

### 3.5.1 Stand der Forschung

Die mathematische Programmierung als Lösungsverfahren für die strukturelle Optimierung des Telefonnetzes mit Alternativwegewahlverfahren wurde von BERRY (1970) entwickelt. In seiner Arbeit hat er das statische Optimierungsproblem mit der festen Alternativwegewahl als ein Konvexprogrammierungsproblem, in dem die Netzkosten als Funktion der Verkehrsflüsse ausgedrückt werden, formuliert. Dieses mathematische Modell und das entsprechende Problem des Überlaufverkehrs wurde detailliert ebenfalls von BERRY [5] (1971) studiert. Im Jahr 1985 erweiterten BERRY und HARRIS [4] das Modell für ein Großstadtnetz mit zusätzlichen Bedingungen der modularen Leitungskapazität, was zu einer nichtlinearen Integerprogrammierung führte.

Eine umfassende Analyse der mathematischen Eigenschaften der konkaven Kostenfunktion von Multidienstnetzen wurde von MINOUX durchgeführt. 1989 stellte MINOUX [40] eine interessante Untersuchung in mathematischen Modellen und deren Algorithmen für allgemeine optimale Netzdesignprobleme vor. Außerdem werden in seiner Arbeit andere Probleme der Kommunikationsnetzplanung behandelt.

In 1980 präsentierte BLAAW [6] eine Strukturoptimierung hierarchischer Netze mit Alternativwegewahl und einer bestimmten geforderten Dienstgüte, definiert durch eine obere Grenze der Blockierwahrscheinlichkeit. Wegen der komplexen Beziehung zwischen der Anzahl der benötigten Leitungskanäle, dem zu übertragenden Verkehr und der Blockierwahrscheinlichkeit resultiert ein schwieriges nichtlineares Problem, das durch Zerlegungsverfahren oder Heuristiken gelöst werden kann.

Für eine Planung dynamischer Übertragungssysteme präsentierte CAMERINI et al. [8] (1982) einen heuristischen Algorithmus, der eine Erweiterung

zum von YAGED [68] (1973) vorgeschlagenen Algorithmus ist. Yaged [69] hatte in 1971 ein Planungsproblem statischer Übertragungssysteme behandelt.

Ein Modell der Misch-Integer-Programmierung für das Planungsproblem dynamischer Übertragungssysteme wurde von BAYBARS und KORTANEK [3] (1984) präsentiert. Sie schlugen eine heuristische Lösung für das Problem vor und verglichen sie mit der durch die Methode *Branch and Bound* exakt gefundenen Lösung.

Eine umfassende Untersuchung des Kapazitätserweiterungsproblems von LUSS [39] (1982) ergab eine interessante Diskussion und den Vergleich der Lösungen für ähnliche Probleme in unterschiedlichen Zusammenhängen. In der Arbeit von NEEBE und RAO [42] (1986) handelt es sich um eine Lösung des Problems der Kapazitätserweiterung, die durch die Methode *Branch and Bound* mit Lagrange-Relaxation ermittelt wurde.

DOUILLEZ und RAO [14] (1975) formulierten ein Problem der optimalen Kapazitätserweiterung, bei dem sich die Kantenkapazität durch Hinzufügen der Kapazitätselemente entwickelte. Sie schlugen eine effiziente Lösung vor, die auf den Algorithmus von DIJKSTRA [48] für kürzeste Pfade basiert.

### 3.5.2 Topologieoptimierung und Planung des Ortsvermittlungsnetzes

Einen Überblick über die Topologieoptimierung in großen hierarchischen Kommunikationsnetzen stellten BOORSTYN und FRANK [7] im Jahre 1977 vor. Diese Arbeit diskutierte verschiedene Probleme der Topologieoptimierung wie z.B. die örtliche Anordnung von Konzentratoren, die Terminal-Zuordnung, die Anordnung des Backbone Netzes usw..

Zur Topologieoptimierung in Datennetzen werden viele heuristische und mathematische Methoden angewandt. Durch entsprechende Anpassung werden einige Modelle und Methoden auch für die Planung von Fernsprechnetzen eingesetzt.

Eine interessante Analyse und einen Überblick in dem Gebiet des Entwurfs von zentralisierten Datenfernverarbeitungsnetzen gaben KERSHENBAUM und BOORSTYN [34] (1983). Dieses Problem beschäftigte sich mit der Bestimmung des kostenminimalen zentralisierten Fernverarbeitungsnetzes, wenn die Lagen der Terminals und der zentralen Datenverarbeitungsanlage bekannt sind. Eine verbesserte auf *Branch and Bound* basierte Technik wurde für dieses Problem entwickelt.

Wichtige Aufgaben bei der Planung eines Ortsvermittlungsnetzes sind die Bestimmung der Anzahl und der Lagen der Vermittlungsstellen und die Zuordnung der Teilnehmerknoten zu Vermittlungsstellen. LO und KERSHENBAUM (1989) formulierten dieses Problem als bedingtes Konzentradoranordnungsproblem und schlugen einen Zwei-Phasen-Algorithmus vor, der Lagrange-Relaxation und die Technik *Branch and Bound* verwendet.

### 3.5.3 Ausfallsicherheitsbedingungen

In seiner Arbeit beschäftigte sich TANAKA et al. [60] (1988) mit der Beschreibung der Entwurfsmethode für nichthierarchische Netze mit Ausfallsicherheitsbedingungen. Das Problem wurde durch kombinatorische Optimierungsalgorithmen gelöst. TSUJII und KUROSAWA [63] (1980) stellten ein Modell für eine alternative Leitwegleitung des Verkehrs vor, wenn eine Leitung im Netz ausgefallen ist. Das Problem wurde als *multicommodity max-flow problem* in der Graphentheorie formuliert. Dafür wurde ein heuristischer Algorithmus entwickelt und ein Beweis für die Qualität der durch den Algorithmus gefundenen Lösung abgeleitet. GAVISH et al. [20] (1989) präsentierte eine allgemeine mathematische Formulierung eines Problems mit einer Sicherheitsbedingung für die Übertragungssystemplanung. In seinen Lösungsschritten hatte er eine Relaxation des linearen Misch-Integer-Programmierungsproblems eingeführt und die Lösung des entsprechenden linearen Programmierungsproblems berechnet.

## 3.6 Modelle für internationale Netzplanung

Zur Netzplanung gehören bestimmte Planungsaktivitäten wie z.B. Prognose, Wegwahlstrategie, Verkehrsbestimmung und Dimensionierung der Leitungen. Der grundlegende Zweck des internationalen Netzplanungsmodells ist das Organisieren aller Planungsaktivitäten bei der Implementierung des Gesamtplanungsvorgangs, um eine effiziente Langzeitplanung durchführen zu können. Man muß aber bedenken, daß es kein Modell gibt, das für alle Fälle gleichermaßen geeignet ist und deshalb stets angewandt werden kann. Es gibt Ansätze für internationale Netzplanungsmodelle, die durch CCITT-Empfehlungen entstanden sind. Die Vorgehensweise für den internationalen Netzplanungsprozeß sieht nach der CCITT-Empfehlung folgendermaßen aus [9, 16]:

### 1. Festlegung der Methoden

Die Beteiligten müssen die Methoden für die Planungsstudie festlegen. Diese Methoden umfassen folgende Faktoren:

- Manuelle oder rechnergestützte Modellstudie
- Art des Computermodells
- Dauer der Studie
- Kapitalkosten
- Methode des finanziellen Vergleichs (gegenwärtiger Wert)
- Andere wirtschaftliche Parameter
- Arten der benötigten Eingabeinformationen
- Form der Ergebnisse

### 2. Sammeln der Eingabeinformationen

Die Beteiligten müssen die in diesem Schritt vereinbarten Eingabeinformationen bekommen. Diese Informationen beinhalten:

- Verkehrsprognose
- Administrationsvorgaben:
  - Wegewahlverfahren
  - zulässige Netztechnik
  - Übertragungstechnik: Richtfunk/Satellit/Kabel
- Eigentumsrecht der existierenden Einrichtungen
- Verfallsdaten der Einrichtungen
- Neue Einrichtungen:
  - Kapazität
  - Kosten
  - Verfügbarkeit
- Dienstgüteeanforderung

### 3. Wegewahl für das vorgeschlagene Netz

Wenn die Planung manuell durchgeführt wird, kann die Verkehrswegewahl durch eine Studiengruppe, die von den Beteiligten festgelegt wird, bestimmt werden. Die Verkehrslast der verschiedenen Einrichtungen im Netz werden bei der Wahl der geeigneten Einrichtungen (Schritt 4. ) benutzt.

Im Fall des rechnergestützten Modellierungsvorgangs können die Schritte 3. oder 4. getrennt oder zusammen bearbeitet werden.

Bei manueller und rechnergestützter Bearbeitung werden einige Iterationen der Schritte 3. und 4. verwendet.

### 4. Auswahl der Einrichtungen

Der Auswahlvorgang soll die operationellen, technischen und finan-

ziellen Anforderungen widerspiegeln, die die Beteiligten stellen. Die Einrichtungen sollen so dimensioniert werden, daß sich entsprechend der Präferenzen der Beteiligten Netze mit niedrigen Kosten ergeben. Schritte 3. und 4. sollen solange wiederholt werden, bis entsprechende Ergebnisse für die Routen und die Auswahl der Einrichtungen erreicht werden.

5. **Kostenzuteilung durch potentielle Teilnehmer**

Netzkosten sollen durch potentielle Teilnehmer getragen werden. Diese Kosten umfassen:

- Kapitalkosten der Einrichtungen
- Wartungskosten der Einrichtungen
- Nebenkosten

6. **Kontrolle der Resultate mit potentiellen Teilnehmern**

An dieser Stelle soll die Studiengruppe den potentiellen Teilnehmern Resultate präsentieren. Wenn die potentiellen Teilnehmer einverstanden sind, kann der Prozeß fortgesetzt werden, sonst geht man zurück zu Schritt 2.. Es kann nötig sein, mehrere durch Teilnehmer gewünschte Alternativnetzlösungen zu untersuchen.

7. **Erreichen des Abkommens über den Endentwurf**

Wenn Resultate aus dem Schritt 5. von den Beteiligten akzeptiert werden, kann die Ausschreibung für die erforderlichen Einrichtungen erfolgen.

8. **Implementation der ersten Einrichtungen**

Die Lieferung der ersten Einrichtungen kann erfolgen, nachdem parallel zur Ausschreibung der Entwurf durch weitere Überprüfungen validiert worden ist.

9. **Überprüfen der Betriebs- und Kostenparameter**

Der Netzplan muß regelmäßig überprüft werden, sobald neue Informationen verfügbar sind. Dies kann Änderungen aufgrund von Wirtschaftlichkeitsbedingungen, Verkehrsprognosen, Kosten, neuen Technologien oder politischen Bedingungen zur Folge haben.



---

## Einfluß der Kostenstruktur

Der Kostenstruktur als Zielfunktion kommt im Rahmen der Topologieoptimierung eine große Bedeutung zu. Die in dieser Arbeit zur Topologieoptimierung entwickelten Verfahren verwenden für die Bewertung eines Netzes die Gesamtkosten, die sich aus Kosten der Knoten und Verbindungen zusammensetzt (s. App. C). Bei einer gegebenen Anzahl von Knoten hängt die Topologie eines Netzes stark von der Kostenstruktur der Verbindungen ab. Die in der Praxis angebotenen Kostenstrukturen der Verbindungstypen entziehen sich einer effizienten Verwendung im Rahmen eines mathematischen Lösungsverfahrens. Um den Einfluß der Kostenstruktur besser zu verstehen, wurde ein Kostenmodul bestehend aus mathematischen und realen Kostenfunktionen entwickelt. Die Leistungsfähigkeit der Optimierungsalgorithmen kann gesteigert werden, wenn aufwendige Kostenberechnungen während einer zufallsgesteuerten Optimierung durch äquivalente, einfache mathematische Funktionen ersetzt werden könnten. Darüber hinaus erlaubt das Wissen über die Eigenschaften einer Kostenfunktion, die Ergebnisse einer Topologieoptimierung besser zu interpretieren.

In diesem Kapitel werden die für die Netzplanung und -Entwicklung zur Verfügung stehenden Kostenstrukturen vorgestellt und ihren Einfluß auf die optimierten Netzergebnisse untersucht. Zur Optimierung wurde der auf einem genetischen Algorithmus basierende Topologieentwurfalgorithmus aus Kap. 9 verwendet.

### 4.1 Analytische Kostenfunktion SQRSQR

Diese Kostenfunktion zeigt konkave Eigenschaften bezüglich der Verbindungslänge zwischen Knoten und der Kapazität (s. Abb. 4.2).

$$\Psi = \text{const} \cdot \sqrt{l} \cdot \sqrt{C} \quad (4.1)$$

Hierbei bezeichnet  $l$  die Länge einer Verbindung,  $C$  die Kapazität und  $\Psi$  die Gesamtkosten.

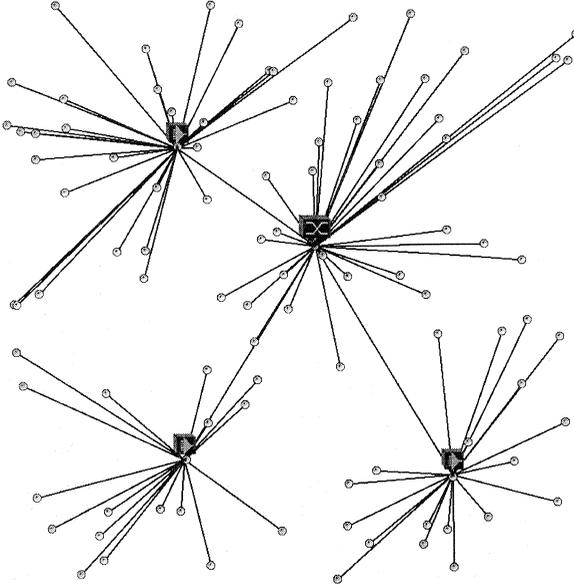


Abbildung 4.1: Netzerggebnis basierend auf der Kostenstruktur SQR SQR

Abbildung 4.1 zeigt ein basierend auf dieser Kostenstruktur optimiertes Beispielnetz mit einer Vermittlungsstelle und vier Konzentratoren, wobei sich ein Konzentrador am Ort der Vermittlungsstelle befindet. Kurze Verbindungen sind dominierend, da die Leitungskosten proportional zu Länge  $l$  sind.

## 4.2 Analytische Kostenfunktion SQR I

Diese Kostenfunktion zeigt konkave Eigenschaften bezüglich der Verbindungslänge, nicht aber der Kapazität (s. Abb. 4.4).

$$\Psi = \text{const} \cdot \sqrt{l} \quad (4.2)$$

Abbildung 4.3 zeigt ein basierend auf dieser Kostenstruktur optimiertes Beispielnetz. Da die Länge  $l$  die sichtbar dominierende Größe darstellt, kann man keinen großen Unterschied zwischen den Abbildungen 4.1 und 4.3 feststellen. Sichtbar ist aber, daß die kurzen Verbindungen angestrebt werden.

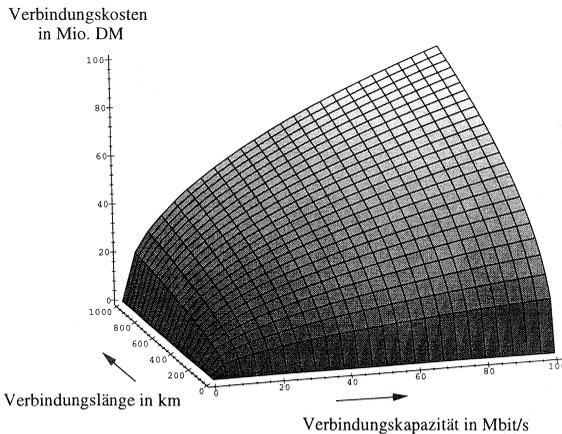


Abbildung 4.2: Verbindungskosten in Abhängigkeit der Kapazität und der Länge

### 4.3 Analytische Kostenfunktion SQR II

Diese Kostenfunktion zeigt konkave Eigenschaften bezüglich der Kapazität, nicht aber der Verbindungslänge (s. Abb. 4.6).

$$\Psi = \text{const} \cdot \sqrt{C} \quad (4.3)$$

Abbildung 4.5 zeigt ein basierend auf dieser Kostenstruktur optimiertes Beispielnetz. Die Netzknoten können in diesem Fall jede beliebige Lage einnehmen, da die Leitungskosten nicht nach ihrer Länge sondern nach zu übertragender Verkehrsmenge angerechnet werden. Die Abbildung 4.5 zeigt eine der möglichen Lösungen.

### 4.4 Analytische Kostenstruktur IRG

Diese irreguläre Kostenstruktur dient als Testfunktion u.a. für nichtdeterministische Optimierungsalgorithmen. Aufgrund der von üblichen Kostenfunktionen abweichenden Annahmen, die beispielsweise eine Kostenredukti-

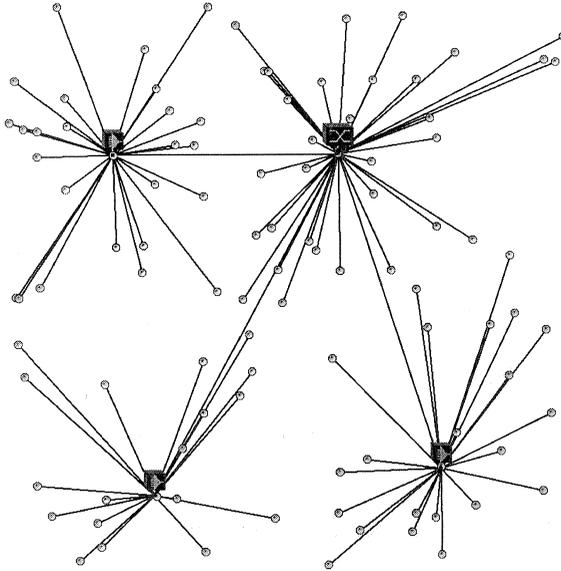


Abbildung 4.3: Netzerggebnis basierend auf der Kostenstruktur SQR I

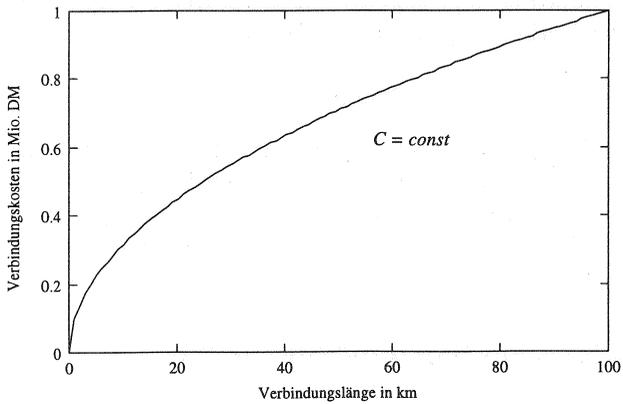


Abbildung 4.4: Verbindungskosten in Abhängigkeit der Länge

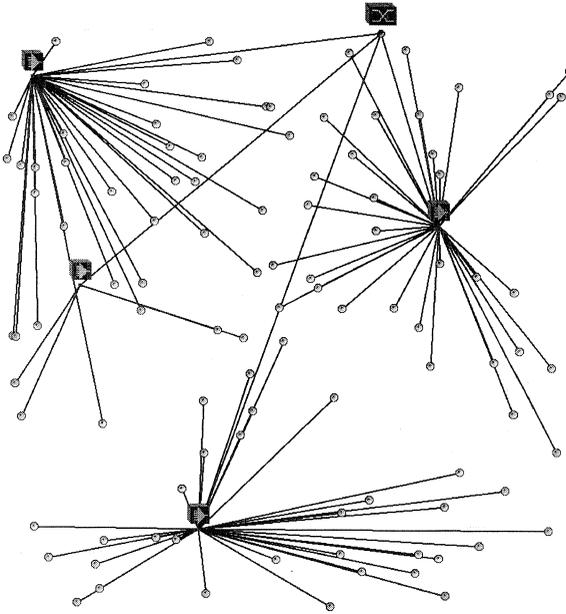


Abbildung 4.5: Netzerggebnis basierend auf der Kostenstruktur SQR II

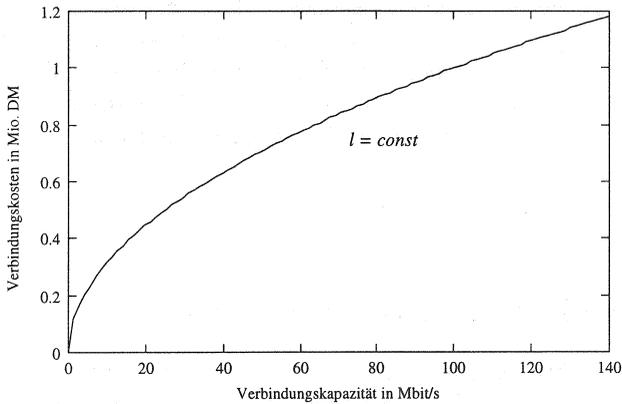


Abbildung 4.6: Verbindungskosten in Abhängigkeit der Kapazität

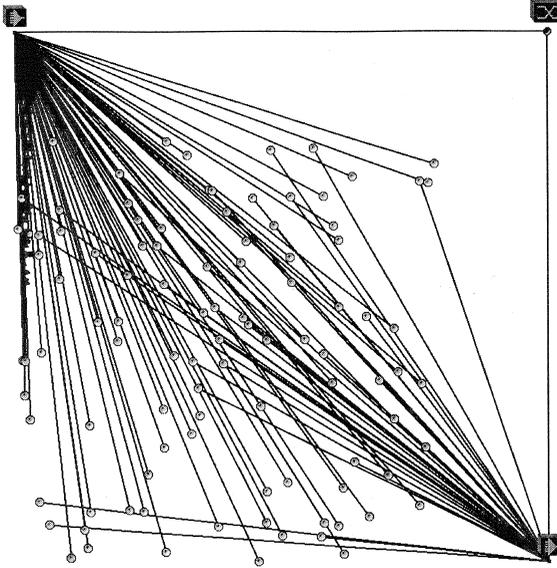


Abbildung 4.7: Netzergebnis basierend auf der irregulären Kostenstruktur IRG

on bei längeren Verbindungen einschließen, kann getestet werden, ob Topologieoptimierungsalgorithmen für diese Kostenstruktur das Optimum (hier größtmögliche Unordnung der Topologie durch abstoßende Wechselwirkung der Knoten) erreichen können (s. Abb. 4.7). Die Kosten sind umgekehrt proportional zur Länge  $l$ , wie in Abb. 4.8 dargestellt ist.

$$\Psi = \text{const} \cdot \frac{1}{l} \quad (4.4)$$

## 4.5 Reale Kostenstruktur Telekom I

Die veröffentlichte Kostenstruktur für Standardfestverbindungen (SFV) zeigt konkave Eigenschaften bezüglich der Länge einer Verbindung bei einem konkreten Leitungstyp [19]. Telekom I kennzeichnet in dieser Arbeit die Kostenstruktur für SFV zwischen den Entfernungsmeßpunkten der von

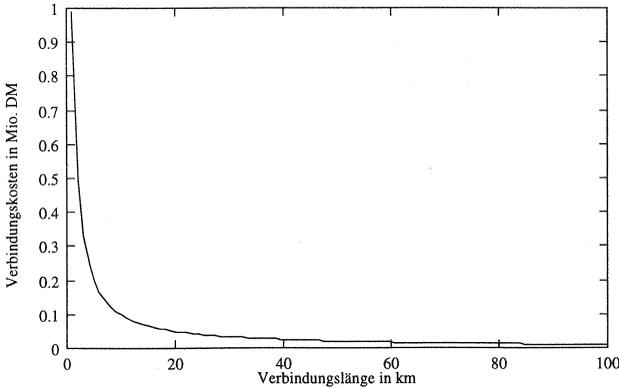


Abbildung 4.8: Verbindungskosten in Abhängigkeit der Länge

der DEUTSCHEN TELEKOM AG festgelegten Anschlußbereiche. Es wird also vereinfachend vorausgesetzt, daß man immer beliebig nahe zu einem Entfernungsmesspunkt liegt.

In einem einfachen Kostenmodell setzen sich die gesamten Netzkosten aus den Kosten für die Netzknoten und die Verbindungen zusammen. Aufgrund der Nichtverfügbarkeit von Knotenkosten werden für die Untersuchungen in dieser Arbeit Knotenkosten als Fixkosten angenommen (s. Tab. C.1 in App. C). Diese können bei Vorliegen konkreter Kosten leicht ersetzt und zur Topologieoptimierung benutzt werden.

Für die Kostenstruktur der Verbindungen im Netz wurde die Kostenstruktur der DEUTSCHEN TELEKOM AG vom 01.01.1995 für 64 kbit/s-, 2 Mbit/s-, 34 Mbit/s- und 155 Mbit/s-Standardfestverbindungen mit der Bedingung zugrundegelegt, daß man immer beliebig nahe zu einem Entfernungsmesspunkt liegt. Zunächst wird eine leicht vereinfachte Struktur benutzt, da die ursprüngliche Struktur nicht für eine Implementierung geeignet ist. Die Vereinfachung zeigt aber dennoch die wichtigsten Grundzüge einer für diese Problematik vorstellbaren Kostenverteilung. Die Kostenstruktur der einzelnen Übertragungswege sind aus den Tabellen C.2, C.3, C.4 und C.5 in App. C zu entnehmen. Allgemein berechnen sich die Kosten für einen Leitungstyp nach:

$$\Psi_{\text{Typ}} = \Psi_{\text{Sockel}} + [l - l_{\min,i}] \cdot \Psi_i \quad (4.5)$$

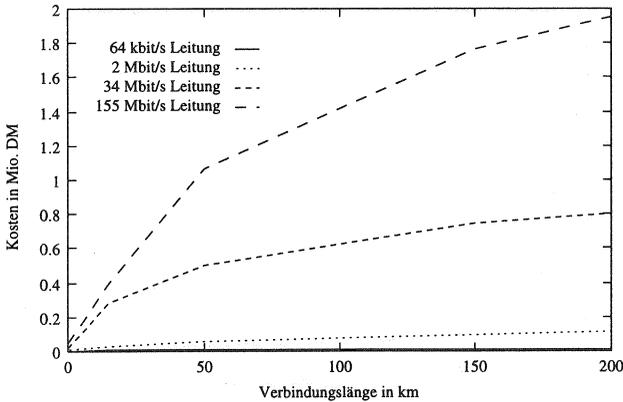


Abbildung 4.9: Konkave Kostenstruktur der Übertragungswege

- $\Psi_{\text{Typ}}$  : Verbindungskosten
- $\Psi_{\text{Sockel}}$  : Sockelbetrag
- $l$  : Verbindungslänge
- $l_{\text{min},i}$  : untere Bereichsgrenze im Tarifbereich  $i$
- $\Psi_i$  : längenbezogener Kostenfaktor im Tarifbereich  $i$ .

Die graphische Darstellung der Kostenstruktur für die verschiedenen Verbindungstypen findet sich in Abbildung 4.9. Die Strukturen für die übrigen Leitungstypen zeigen das gleiche Verhalten.

Es wird deutlich, daß die Kosten für eine Verbindung einen stark nichtlinearen Charakter haben. Die Struktur ist konkav, da der Kostenzuwachs pro Kilometer für große Verbindungsängen immer geringer wird. Teilbereiche z.B. von 0 – 15 km, 15 – 50 km, 50 – 150 km und oberhalb von 150 km sind quasi linear. Löst man die Struktur im Bereich einzelner Kilometer auf, so wird in Abbildung 4.10 jedoch auch der Treppencharakter deutlich, der durch die Gauß-Klammer-Funktion (Kosten pro angefangene Kilometer) erreicht wird. Obwohl die Kostenfunktion aufgrund des Rundungsverfahrens un stetig ist, wird im folgenden (bei nicht so genauer Auflösung) diese Kostenfunktion als quasi stetig und stückweise linear angesehen.

Betrachtet man nicht die Nutzung eines bestimmten Leitungstyps als Eingabe zur Berechnung der Kostenfunktion, sondern die Nutzung einer bestimmten Übertragungskapazität, so kann man auf den ersten Blick verbor-

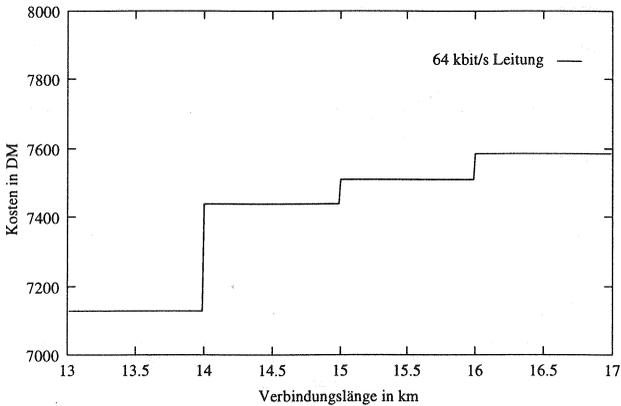


Abbildung 4.10: Treppencharakter der Kostenfunktion

gene Merkmale der Kostenfunktion feststellen (s. Abb. 4.9). Bei bestimmten Verbindungslängen und Kapazitätsanforderungen wechseln die Typen der Leitungen, wenn nur die günstigste Lösung betrachtet wird, und für eine Verbindung nur Bündel eines Typs zugelassen werden, und zwar nicht nur in Abhängigkeit von der Kapazitätsanforderung, sondern auch von der Verbindungslänge. Dieses Verhalten ist in Abbildung 4.11 dargestellt. Anderenfalls ist für jede Verbindung mit einer bestimmten Kapazitätsanforderung ein „Knapsackproblem“ zu lösen. Oft stehen der optimalen Lösung eines Knapsackproblems jedoch technische Probleme entgegen, die Gesamtkapazität der Kombination von verschiedenen Leitungstypen zu einem Leitungsbündel vollständig zu nutzen. Machen Optimierungsalgorithmen sehr häufig Gebrauch von der Kostenfunktion in Abhängigkeit von den Kapazitätsanforderungen, so ist es oft zweckmäßig nicht für die ständig unterschiedlichen Kapazitätsanforderungen jedesmal ein Knapsackproblem zu lösen. Es sollten approximative Lösungen (z.B. ein Leitungsbündel mit gleichen Typen) eingesetzt und erst in der endgültigen Lösung dann die tatsächlichen Kosten ermittelt werden.

Es zeigt sich, daß beispielsweise bei einer Kapazitätsanforderung von 384 kbit/s bis ca. 75 km eine 2 Mbit/s-Leitung für die Übertragung kostengünstiger ist. Oberhalb dieser Distanz sind jedoch sechs 64-kbit/s-Leitungen vorzuziehen. Die benutzte Kostenstruktur zeigt noch viele solcher „Eigenarten“.

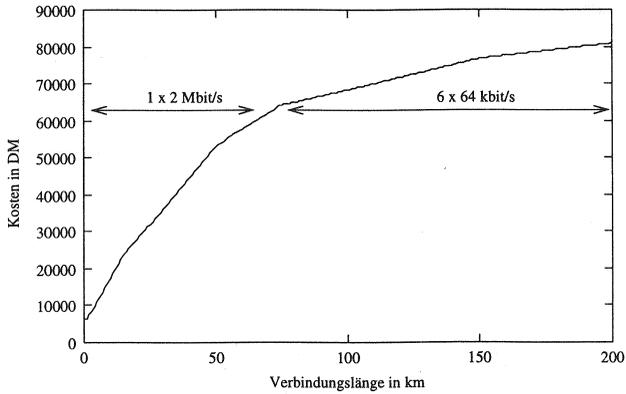


Abbildung 4.11: Wechsel des Verbindungstyps bei einer Kapazitätsanforderung von 384 kbit/s

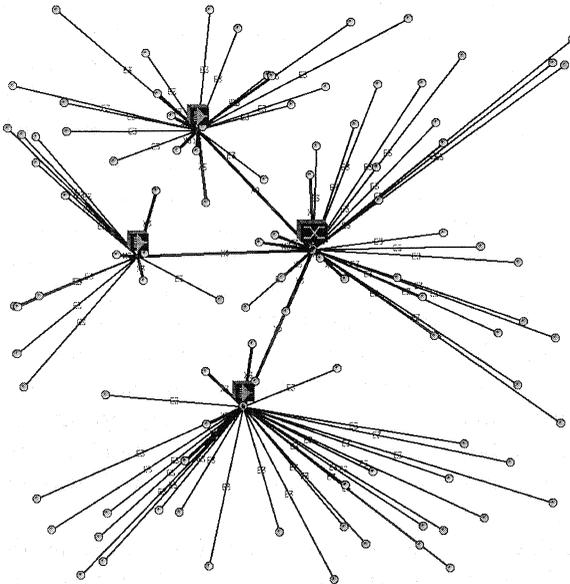


Abbildung 4.12: Netzerggebnis basierend auf der Kostenstruktur Telekom I

Ein basierend auf dieser Kostenstruktur optimiertes Beispielnetz zeigt Abbildung 4.12.

## 4.6 Reale Kostenstruktur Telekom II

Die reale Kostenstruktur für Mietleitungen der DEUTSCHEN TELEKOM AG ist deutlich undurchsichtiger, wenn man die Abhängigkeit von Entfernungsmesspunkten der Anschlußbereiche berücksichtigt. Lediglich für Fernverbindungen sind die Kosten stückweise linear wie in Abb. 4.9, 4.10 vorgestellt. Grundsätzlich gestaltet sich die Tarifierung einer Verbindung abschnittsweise. Als erster Abschnitt gilt dabei die Teilstrecke vom Verbindungsendpunkt zum Meßpunkt im Anschlußbereich (Typ I), als zweiter die Teilstrecke von diesem Meßpunkt zum Meßpunkt der Ortsvermittlungsstelle (Typ II) und ein dritter ist die Strecke zwischen den Ortsvermittlungsstellen (Typ III). Für Verbindungen zwischen Verbindungsendpunkten in den möglichen Kombinationen werden aufgrund der Kostendominanz einiger Teilstrecken die Gesamtkosten einer Verbindung für die folgenden drei Fälle tarifiert:

- Fall 1: Die Verbindungsendpunkte liegen in demselben Anschlußbereich.
- Fall 2: Die Verbindungsendpunkte liegen in unterschiedlichen Anschlußbereichen desselben Ortsnetzes.
- Fall 3: Die Verbindungsendpunkte liegen in unterschiedlichen Ortsnetzen.

Siehe dazu auch Tab. C.6 und Abb. C.1 in App. C. Für weitere Tarifierungsdetails wird auf die entsprechenden Tarifierungsunterlagen der DEUTSCHEN TELEKOM AG verwiesen [19].

Der Einsatz der exakten Kostenstruktur für Mietleitungen der DEUTSCHEN TELEKOM AG ist im Rahmen der Optimierungsuntersuchungen nicht möglich, da die geographischen Koordinaten der Entfernungsmesspunkte der Anschlußbereiche von der DEUTSCHEN TELEKOM AG nicht bekannt gegeben werden. Um eine gute Näherung für die Kostenstruktur der Mietleitungen zu erzielen, wurde versucht die geographischen Koordinaten der Entfernungsmesspunkte zu rekonstruieren. Dazu dienten als grundlegende Daten sämtliche Vorwahlen aus dem Verzeichnis der DEUTSCHEN TELEKOM AG und eine Datenbank mit Koordinaten aller deutschen Städte [30]. Die Ziffern der Ortsnetzkennzahl (ONKz) kennzeichnen verschiedene Netzhier-

archieebenen, und die Vorwahlen sind mit Städtenamen verbunden. Hiermit ist es möglich, die Lage der Zentralvermittlungsstellen (ZVSt), Hauptvermittlungsstellen (HVSt) und Knotenvermittlungsstellen herauszufinden. Für die Lage von Endvermittlungsstellen (EVSt) wurden vereinfachend die Position der max. 10 nächsten Städte nach ihrer Bevölkerungszahl gewählt. Entsprechend kann eine Auflösung bzgl. der Bestimmung von Entfernungsmesspunkten der Anschlußbereiche vorgenommen werden. Das Ergebnis der Rekonstruktion von Entfernungsmesspunkten diente als Grundlage zur Realisierung der Kostenstruktur für Mietleitungen Telekom II.

#### 4.7 Reale Kostenstruktur RF

Die Richtfunkstrecken stellen mit Einschränkung eine preisgünstige Alternative zu Standardfestverbindungen dar. Sie sind verschiedenen Rahmenbedingungen unterworfen, wie die Sichtverbindung oder max. Abstand zwischen den Endpunkten der Verbindung und Existenz freier Lizenzen. Die Einschränkungen bzgl. des Erwerbs einer Lizenz kann im Rahmen eines Optimierungsalgorithmus, basierend auf Kostenstruktur RF nicht berücksichtigt werden, da keine Informationen diesbzgl. öffentlich vorliegen. Für die Bestimmung der Sichtverbindung wird aufgrund der Höhendaten der Punkte zwischen den Endpunkten der Verbindung die Existenz einer Sichtverbindung überprüft. Die dieser Arbeit zugrundeliegenden Richtfunkstrecken werden unter drei Frequenzen 7GHz, 23GHz und 38GHz mit jeweiliger max. Reichweite von 50, 15 und 5 km betrieben. Innerhalb dieser max. Reichweite ist die Kostenstruktur RF längenunabhängig. Die Kostenstruktur der Richtfunkstrecken setzen sich aus Lizenzgebühren, Wartungskosten und Investitionskosten zusammen.

# Verkehrsprognosen und -schwerpunkte

Die optimale Topologie und Dimensionierung eines Telekommunikationsnetzes wird massiv von dem zu tragenden Verkehr beeinflusst. Das Ergebnis einer Topologieoptimierung ist daher auf die Verkehrsbeziehungen zwischen den Quellen und Senken zugeschnitten. In der Praxis liegen oft vor Inbetriebnahme eines Netzes keine Daten bzgl. der Verkehrsbeziehungen zwischen den Knoten vor, so daß der zukünftige Netzverkehr zur Netzplanung prognostiziert werden muß. Es wird der Gesamtknotenverkehr prognostiziert, wobei eine Umrechnung auf Verkehrsbeziehungen zwischen den Knoten zum Zwecke der Topologieoptimierungsalgorithmen mit Hilfe der im Abs. 2.4.9 angegebenen Beziehung durchgeführt wird.

In diesem Kapitel werden Szenarien vorgestellt, die eine sinnvolle Verkehrsprognose für den Entwurf von benutzerspezifischen oder universellen Netzen wiedergeben. Basierend auf den Verkehrsprognosedaten wird eine fundamentale Verwendung der Prognosedaten bei der konventionellen Netzplanung, nämlich die Bestimmung der potentiellen Lagen von Netzknoten, demonstriert.

## 5.1 Quelldaten der Verkehrsprognose

Die für die Netzberechnung und Optimierung benutzten Verkehrsdaten basieren auf einem Datensatz des STATISTISCHEN BUNDESAMTES der eine Arbeitsstättenzählung als Grundlage hat [59]. Die Daten der Arbeitsstättenzählung entstammen dem Jahr 1987 und enthalten Informationen über Arbeitsstätten in verschiedenen Größenklassen und Wirtschaftssystematiken. Sie sind ausschließlich für das Westdeutsche Bundesgebiet verfügbar. Eine weitere Quelle ist mit den geographischen Daten des INSTITUTS FÜR ANGEWANDTE GEODÄSIE gegeben [30]. Neben den rein geographischen Daten werden aus dieser Quelle ebenso Informationen über Gebietsflächen, Einwohner und andere Schlüssel verwendet. Diese Daten sind auf dem Stand von 01.06.1995 und für Gesamtdeutschland verfügbar.

Die Angaben zu den in dieser Arbeit ermittelten Verkehrsknoten enthalten neben den Namen des Objektes und dessen Knotenverkehr auch die Koordinaten des Objektes. Dabei wurden Lambertkoordinaten gewählt. Die Lambert Abbildung ist gekennzeichnet durch eine winkeltreue Kegelabbildung bzw. eine konforme Kegelabbildung mit zwei längentreuen Parallelkreisen in normaler Lage. Dabei gilt: Standard Parallel 1: 48 Grad 40 Minuten und Standard Parallel 2: 53 Grad 40 Minuten.

Für die Berechnung der Koordinaten wird der Punkt 10 Grad 30 Minuten Ost, 51 Grad 0 Minuten Nord gleich 0/0 Meter gesetzt. Die Angaben in den Tabellen sind wegen der Übersichtlichkeit jedoch in km gehalten.

## 5.2 Verkehrsprognoseszenarien

Die Daten der Verkehrsprognose basieren auf folgenden Annahmen: Bei den Prognosen der Szenarien SZ1 – SZ15 wird für jede Wirtschaftssystematik und Größenklasse von Arbeitsstätten ein Verkehrswert für die Arbeitsstätte selbst und ein weiterer Verkehrswert pro Beschäftigten angenommen. Die entsprechenden Verkehrswertparameter der verschiedenen Prognosen sind der Tab. 5.1 zu entnehmen. Die Szenarien SZ1 bis SZ15 sind Verkehrsszenarien, in denen die westdeutschen Bundesländer und West-Berlin betrachtet werden. In den Szenarien SZ16 bis SZ19 wird die prognostizierte Verkehrssituation für Gesamtdeutschland betrachtet. Ihnen liegt die Bevölkerungsdichte im Bundesgebiet zugrunde. Dabei werden zur Bevölkerungsdichte proportionale Knotenverkehrsannahmen gemacht. Die entsprechenden Verkehrswertparameter sind ebenfalls der Tab. 5.1 zu entnehmen.

Tabelle 5.1: Die verfügbaren Szenarien

Szenario	Verkehrsparameter	Größenklasse	Wirtschaftssystematik(en)
SZ1	0.005 Erlang pro Beschäftigtem	$\geq 1000$ Beschäftigte	alle
SZ2	0.005 Erlang pro Beschäftigtem	$\geq 100$ Beschäftigte	alle
SZ3	0.005 Erlang pro Beschäftigtem	$\geq 10$ Beschäftigte	alle
SZ4	0.005 Erlang pro Beschäftigtem	alle	alle

Szenario	Verkehrsparameter	Größenklasse	Wirtschaftssystematik(en)
SZ5	0.005 Erlang pro Beschäftigtem	alle	Land- und Forstwirtschaft, Fischerei
SZ6	0.005 Erlang pro Beschäftigtem	alle	Energie- und Wasserversorgung, Bergbau
SZ7	0.005 Erlang pro Beschäftigtem	alle	Verarbeitendes Gewerbe
SZ8	0.005 Erlang pro Beschäftigtem	alle	Baugewerbe
SZ9	0.005 Erlang pro Beschäftigtem	alle	Handel
SZ10	0.005 Erlang pro Beschäftigtem	alle	Verkehr und Nachrichtenübermittlung
SZ11	0.005 Erlang pro Beschäftigtem	alle	Kreditinstitute und Versicherungsgewerbe
SZ12	0.005 Erlang pro Beschäftigtem	alle	Dienstleistungen, Unternehmen
SZ13	0.005 Erlang pro Beschäftigtem	alle	Organisationen ohne Erwerbszweck und private Haushalte
SZ14	0.005 Erlang pro Beschäftigtem	alle	Gebietskörperschaften und Sozialversicherungen
SZ15	$f \times 0.005$ Erlang pro Beschäftigtem $f = 0.5$ $f = 0.8$ $f = 0.3$ $f = 1.0$ $f = 2.0$ $f = 3.0$ $f = 6.0$ $f = 4.0$	alle	differenziert nach Systematik Land- und Forstwirtschaft, Fischerei Energie- und Wasserversorgung, Bergbau Verarbeitendes Gewerbe Baugewerbe Handel Verkehr und Nachrichtenübermittlung Kreditinstitute und Versicherungsgewerbe Dienstleistungen, Unternehmen

Szenario	Verkehrsparameter	Größenklasse	Wirtschaftssystematik(en)
	f = 1.0  f = 1.0		Organisationen ohne Erwerbszweck und private Haushalte Gebietskörperschaften und Sozialversicherungen
SZ16	0.001 Erlang pro Einwohner	Städte mit $\geq$ 50 Erlang	Privathaushalte
SZ17	0.002 Erlang pro Einwohner	Städte mit $\geq$ 50 Erlang	Privathaushalte
SZ18	0.005 Erlang pro Einwohner	Städte mit $\geq$ 150 Erlang	Privathaushalte
SZ19	0.001 Erlang pro Einwohner	alle Städte	Privathaushalte

### 5.3 Verkehrsschwerpunkte

In Tab. 5.1 wurden 19 Szenarien als Beispiele für mögliche Vorgaben für eine topologische Netzplanung zusammengestellt. Diese Szenarien dienen dazu, die entwickelten Netzoptimierungsalgorithmen für verschiedene Verkehrssituationen zu testen. Unter Berücksichtigung der geographischen, rechtlichen oder firmenpolitischen Einschränkungen bzgl. der Lage der Netzknoten ist oft erwünscht, die potentiellen und günstigen Orte zu den Knotenpositionen zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurden im Rahmen dieser Arbeit mehrere Algorithmen entwickelt (s. auch Abs. 7.2.1). In diesem Abschnitt werden der COT- (*Center Of Traffic*) und der RS-Algorithmus (*Rolling Snowball*) zur Bestimmung der Schwerpunkte verwandt. Der COT-Algorithmus ermittelt die Schwerpunkte des Verkehrs, wobei die Anzahl der gewünschten Schwerpunkte vorgegeben wird. In diesem Kapitel wurden beispielhaft für SZ16 jeweils 1, 5, 30, 63 Verkehrsschwerpunkte berechnet. Der RS-Algorithmus berechnet die möglichen Knotenorte durch die Lösung eines Zuordnungsproblems, wobei die Vermittlungseinrichtungen mit einer max. Anschlusskapazität, z.B. 16 bzw. 32, den Verkehrsquellen und -senken zugeordnet werden. Anzahl und Ort der Vermittlungseinrichtungen entsprechen Anzahl und Ort der Verkehrsschwerpunkte. Hiermit ist es möglich, die Anzahl der benötigten Verkehrsschwerpunkte basierend auf gerätespezifischen Daten, wie z.B. Anschlusskapazität bestimmen zu lassen. Der Nachteil ist, daß dieser Algo-

rithmus für große Netze, wie z. B. SZ19 mit ca. 15000 Verkehrsquellen und -Senken, im akzeptablen Zeitrahmen keine Lösung liefert.

Das Szenario SZ16 beschreibt ein prognostiziertes Verkehrsaufkommen basierend auf der Bevölkerungsdichte. Es werden niedrige Verkehrsannahmen gemacht. Die Knotenverkehrsverteilung ist aus der Abb. 5.1 ersichtlich. Die Länge der Säulen auf der Karte ist dem Verkehrswert in Erlang proportional.

Die Abbildungen 5.2, 5.3, 5.4 und 5.5 sind Beispiele für die potentiellen Knotenlokationen, wenn jeweils 1, 5, 30 bzw. 63 Verkehrsschwerpunkte gefordert sind. Für den Fall, daß die Anzahl der möglichen Knotenorte a-priori nicht bekannt ist und aus der Bedingung der begrenzten Anschlußkapazität der Knoten berechnet werden soll, sind zwei Beispiele mit Knotenanschlußkapazitäten 16 bzw. 32 in Abbildungen 5.6 und 5.7 angegeben.

Im Kapitel 12 werden beispielhaft die weitergehenden Entwurfsschritte an SZ16 durchgeführt.

## 5.4 Dynamische Verkehrsprognose

Zum Zwecke der langfristigen Netzplanung ist es wirtschaftlich, nicht den zu erwartenden Gesamtverkehr der nächsten Jahre von Anfang an im Netz zu installieren. Es ist durchaus sinnvoller, die Lebensdauer eines Netzes in Zeitperioden entsprechend der Marktentwicklung zu unterteilen. Dieses dynamische Zeitperiodenschema sollte dann beim Netzentwurf berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist es möglich, die Zielsetzungen der Netzerweiterung durch den zu erwartenden Verkehr in verschiedenen Zeitperioden zu definieren. Hiermit wird eine Möglichkeit geschaffen, die erforderlichen Investitionen am Anfang des Netzaufbaus zu minimieren, während die zu tragende Verkehrsdynamik von Anfang an berücksichtigt wird. Man kann für die ersten Zeitperioden eine Verkehrszunahme durch Gewinnung neuer Teilnehmer vorausplanen. Danach ist eine Sättigung des Verkehrs zu berücksichtigen, da i.d.R. mit einer Stagnation der Teilnehmeranzahl zu rechnen ist.

Für die dynamische Verkehrsprognose können die Ergebnisse aus der Tab. 5.1 für die erste Zeitperiode verwandt werden. Die Verkehrswerte für die nächsten Zeitperioden können nach folgender Gleichung prognostiziert werden:

$$\gamma^t = \gamma^0(1 + t)^{1-\beta}$$

wobei  $\gamma^t$  den prognostizierten Verkehr für die Zeitperiode  $t$  und  $\beta$  die Markt-sättigung angibt ( $0 < \beta \leq 1$ ).

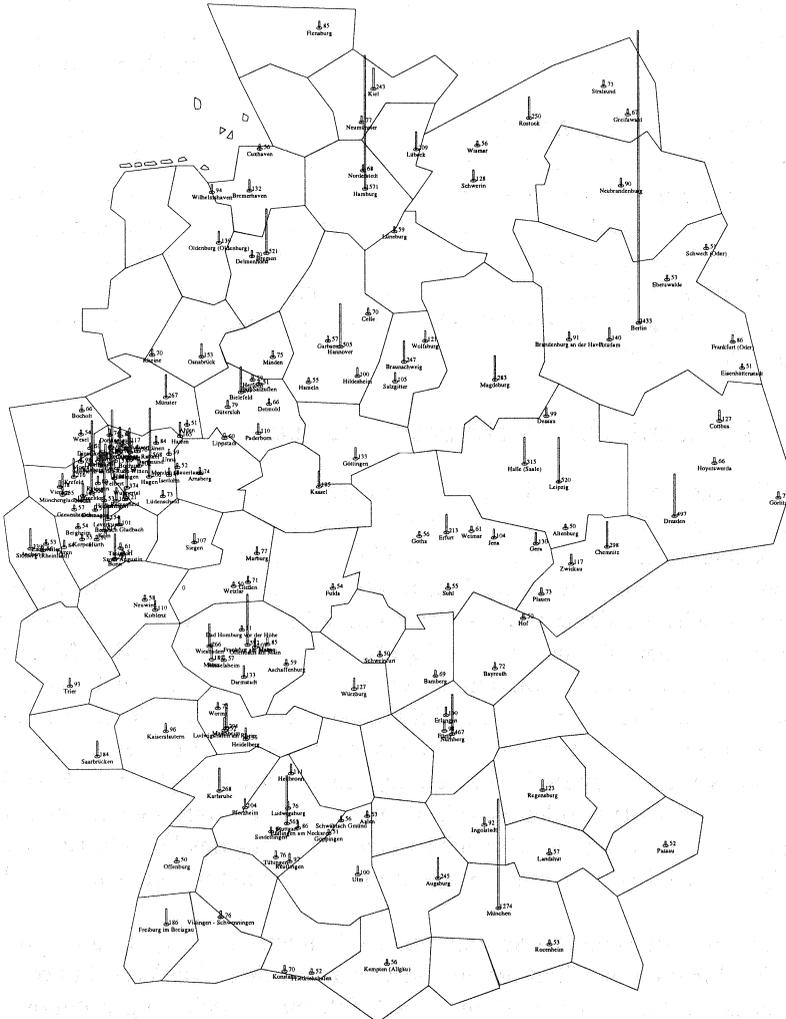


Abbildung 5.1: Verkehrsprognose SZ16

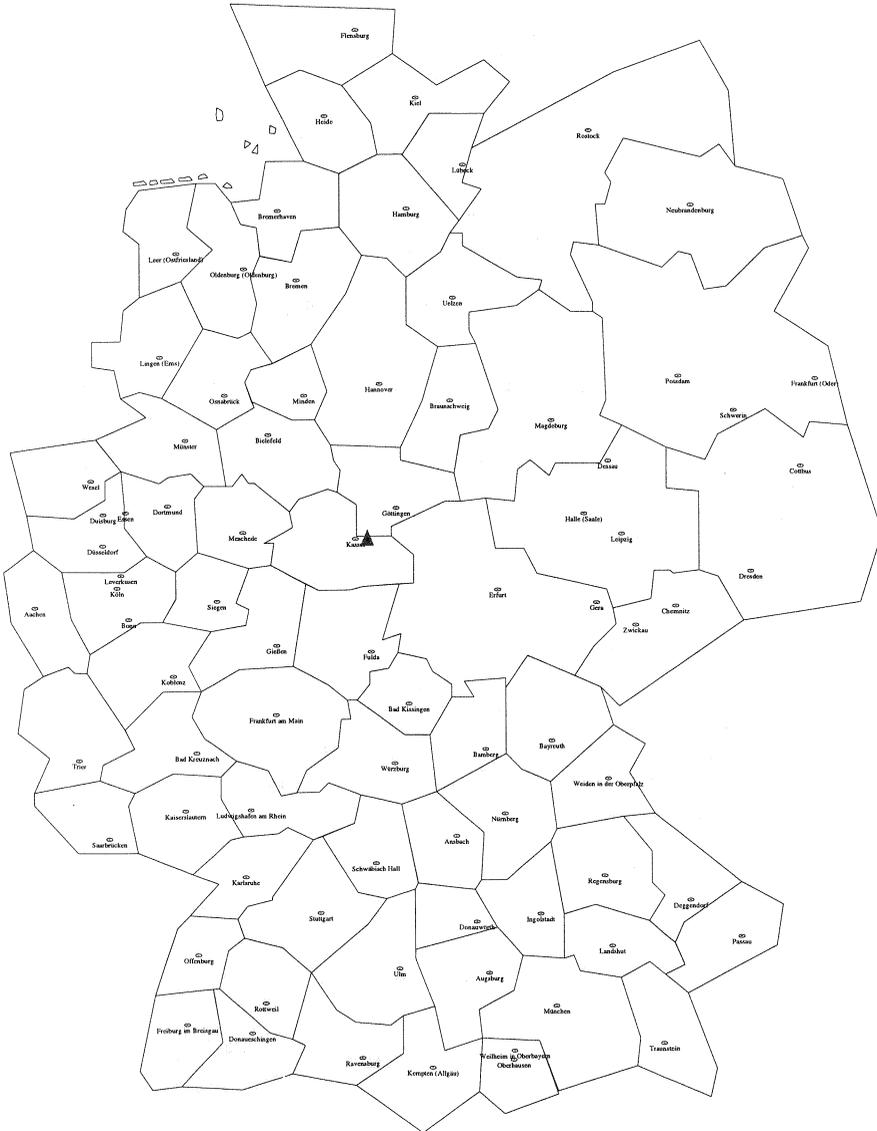


Abbildung 5.2: 1 Verkehrsschwerpunkt SZ16

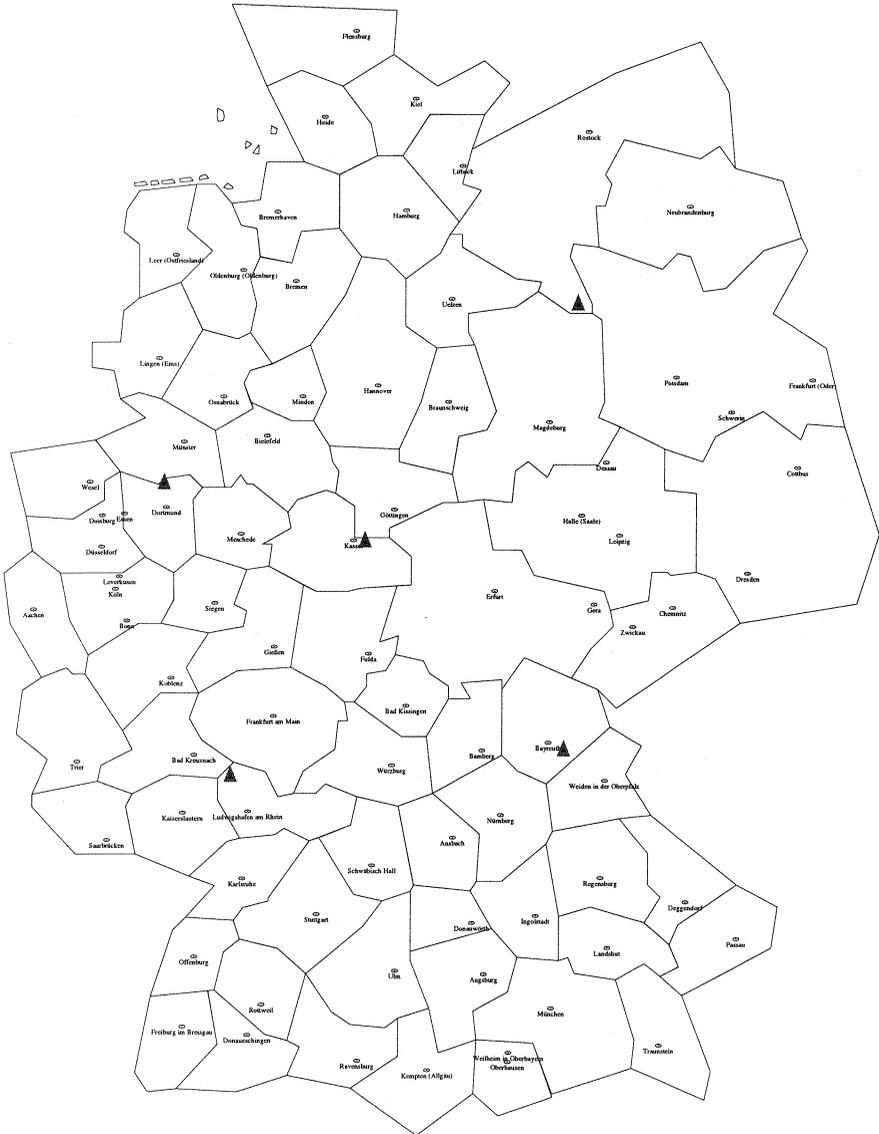


Abbildung 5.3: 5 Verkehrsschwerpunkte SZ16





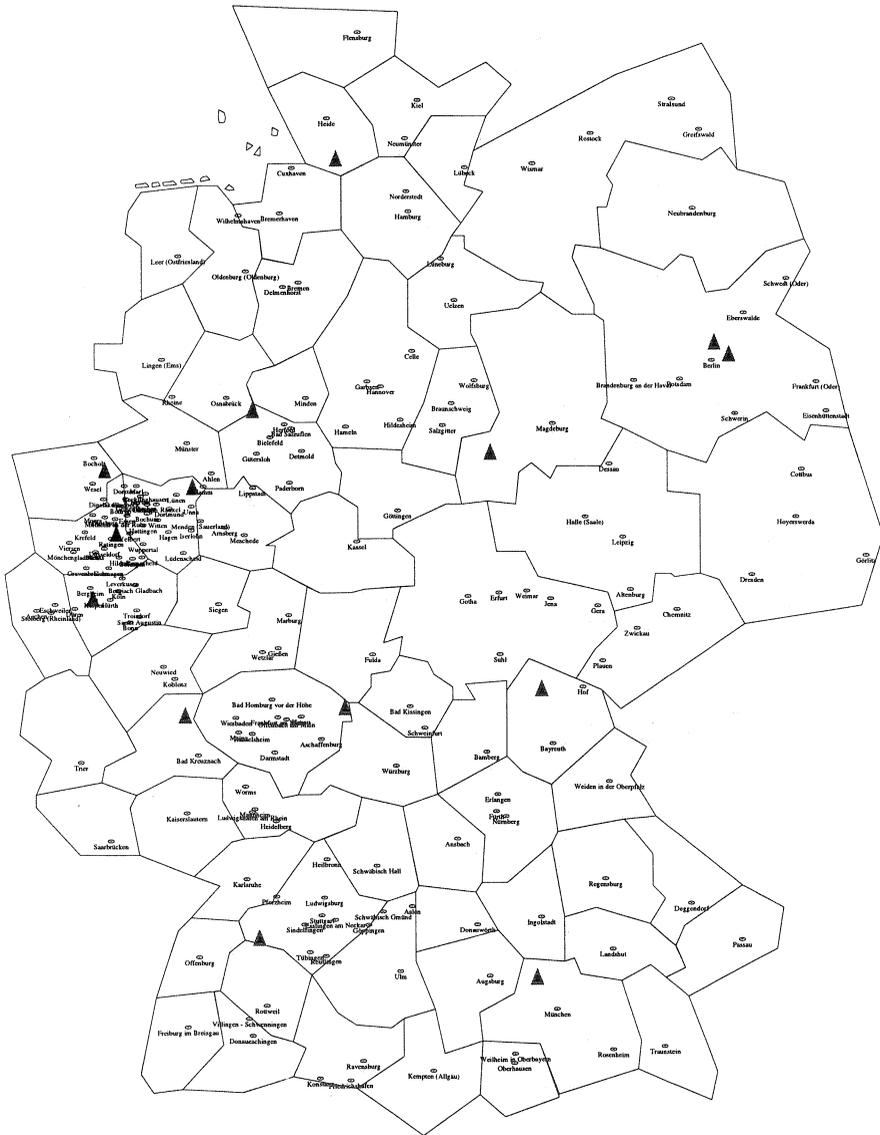


Abbildung 5.6: Potentielle Lokationen SZ16 – max. Anschlusskapazität 16



---

## Topologieentwurfsproblem

**D**er Topologieentwurf eines Telekommunikationsnetzes umfaßt die Entscheidungen über die geographische Lage von Knoten und Anzahl und Struktur der Verbindungen. Vorschläge bzgl. der Bestimmung von Knotenorten wurden im Kap. 5 angegeben (s. auch Abs. 7.2.1). Die Verbindungen befinden sich sowohl zwischen den zur Kommunikation erforderlichen Netzknoten als auch zwischen den Endteilnehmern und diesen Netzknoten.

In diesem Kapitel wird das in dieser Arbeit untersuchte Topologieentwurfsproblem spezifiziert, das Eigenschaften eines nichtlinearen kombinatorischen Optimierungsproblems besitzt. Die mathematische Problemformulierung bildet die Grundlage für die in Kap. 7, 8 und 9 beschriebenen Lösungsverfahren.

### 6.1 Kombinatorisches Optimierungsproblem

Unter einem kombinatorischen Optimierungsproblem versteht man ein Minimierungs- bzw. ein Maximierungsproblem, das durch die Menge der Probleminstanzen spezifiziert wird. Eine Probleminstanz wird durch ein Paar  $(\mathcal{S}, \Psi)$  beschrieben, wobei  $\mathcal{S}$  den Lösungsraum des Problems und  $\Psi$  die Kostenfunktion bzw. die Abbildung  $\Psi : \mathcal{S} \rightarrow \mathbb{R}$  angibt. Liegt ein Minimierungsproblem vor, wird eine Lösung  $\Lambda_{opt} \in \mathcal{S}$  mit der Eigenschaft  $\Psi(\Lambda_{opt}) \leq \Psi(\Lambda)$  für alle  $\Lambda \in \mathcal{S}$  gesucht. Entsprechend für ein Maximierungsproblem gilt:  $\Psi(\Lambda_{opt}) \geq \Psi(\Lambda)$  für alle  $\Lambda \in \mathcal{S}$ . Nach dieser Definition stellt  $\Lambda_{opt}$  eine global optimale Lösung, auch Optimum genannt, dar.

Man kann anhand des Konvergenzkriteriums die zum Auffinden vom Optimum entworfenen Lösungsmethoden in drei Klassen unterteilen. Die exakten Verfahren finden das Optimum in einer endlichen Zahl deterministisch vorgegebener Schritte. Solche Verfahren sind daher nur bei relativ kleinen oder einfachen Problemstrukturen, wie der linearen Programmierung, einsetzbar. Die heuristischen Optimierungsverfahren kommen ohne genaue Analyse der Ordnungsstrukturen des Lösungsraumes aus. Sie vollziehen ihre Schritte

nach willkürlichen, plausibel erscheinenden Regeln und können aus diesem Grund auch nicht gewährleisten, daß das Optimum erreicht wird. Ein Mittelweg zwischen diesen beiden Extremen bilden Näherungsmethoden, die sich nach deterministischen oder probabilistischen Regeln an das Optimum herantasten. Sie finden das Optimum unter Umständen erst bei einer Schrittzahl gegen Unendlich. In dieser Arbeit werden unter heuristischen Verfahren sowohl heuristische als auch Näherungsverfahren verstanden [11, 38].

## 6.2 Beschreibung des Topologieoptimierungsproblems

Zur Beschreibung und Modellierung des Topologieoptimierungsproblems wird ein hierarchisches Netz betrachtet. Auf der niedrigsten Hierarchiestufe (Stufe 1) sind die Verkehrsquellen und -senken (NT<sup>1</sup>-Knoten) angesiedelt. Diese können Teilnehmer oder Gruppen von Teilnehmern sein. Es ist in der hierarchischen Struktur der in dieser Arbeit zu untersuchenden Netze eine Multiplexer- bzw. Konzentratorstufe (MUX<sup>2</sup>-Knoten) vorgesehen (Stufe 2). Die Stufe 2 besitzt o.B.d.A. keine Vermittlungseigenschaften. Unter Vermittlungseigenschaften eines Netzknotens wird die Fähigkeit einer Umleitung des ankommenden Verkehrs aufgrund der Wegewahlstrategie verstanden. Die Vermittlungsebene ist flach konzipiert worden (Stufe 3). Diese Teilebene besteht aus gleichberechtigten Vermittlungsanlagen (SW<sup>3</sup>-Knoten), die den gesammelten Verkehr von Endteilnehmern über Multiplexer und Konzentratoren auf direktem Weg zu den Senken des Verkehrs zugeordneten Vermittlungsknoten weiterleiten. Auf der Stufe 3 der Netzhierarchie existieren Orte, an denen der Verkehr an fremde Netze für nicht im Netz vorhandene Senken übergeben bzw. fremder Verkehr von nicht im Netz befindlichen Quellen eingespeist wird. Diese Orte werden in dieser Arbeit Übergabepunkte (*Point Of Interconnect, POI*) genannt.

Unter Topologieentwurf eines Telekommunikationsnetzes wird in dieser Arbeit die Bestimmung der Anzahl und Lage der Netzknoten auf den Hierarchiestufen 2 und 3 und die Struktur und Anzahl aller im Netz befindlichen Verbindungen verstanden.

Die Mindestanzahl der benötigten Netzknoten eines bestimmten Typs ist von der Anschlußkapazität bzw. Vermittlungskapazität und der Knotenan-

---

<sup>1</sup> *Network Termination*

<sup>2</sup> *Multiplexer*

<sup>3</sup> *Switch*

zahl der direkt darunterliegenden Schicht abhängig. Die optimale Anzahl der Netzknoten ist von der Zielfunktion und der Kostenstruktur der Verbindungen abhängig.

Zur Bestimmung der geographischen Lage der Netzknoten — die Lage der Quellen und Senken des Verkehrs wird vorgegeben und ist nicht modifizierbar — könnten folgende Fälle vorliegen:

- **Fall 1:** Es gibt keine Einschränkung bzgl. der Lage der Knoten, d.h. sie könnten überall platziert werden. Hierfür wurden verschiedene Algorithmen entwickelt, die die optimale Lage der Knoten ermitteln. Die Knoten können in Zentren des Verkehrs platziert werden, oder ihre Lage kann so bestimmt werden, daß die Gesamtlänge der verwendeten Verbindungen bei einer sternförmigen Struktur von Teilnetzen minimal wird.
- **Fall 2:** Es darf nur aus einer Menge der möglichen Netzknotenorte gewählt werden. Dieser Fall bildet die realitätsnahe Rahmenbedingung der Netzplanung in der Praxis ab, da Eigentumsrechte oder Firmensitze bzw. Erreichbarkeit der Knoten, z.B. zur Wartung, eine große Rolle spielen.
- **Fall 3:** Die Orte der Netzknotenplatzierung sind fest vorgegeben. In diesem Fall existiert keine Entscheidungsvariable bzgl. der Lage der Netzknoten, die innerhalb des Optimierungsalgorithmus bestimmt werden muß.
- **Fall 4:** Eine Kombination der obigen Fälle, die mittels einer geeigneten Kombination der Algorithmen der Fälle 1 und 2 gehandhabt werden kann.

Für die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse wurde der allgemeine Fall 1 zugrunde gelegt. Die Algorithmen können mit leichter Modifikation für die anderen Fälle eingesetzt werden.

Die in dieser Arbeit gewählte Charakteristik zur Bewertung der Netze sind die Gesamtkosten, die sich aus den Kosten der Knoten und Verbindungen zusammensetzt. Ein optimales Netz ist dann ein Netz mit minimalen Kosten. Im folgenden wird auf einige und für diese Arbeit wichtige Aspekte der Topologieoptimierung eingegangen.

### 6.2.1 Festlegung der Zielfunktion

Eine Zielfunktion reflektiert die Gesichtspunkte, nach denen das Netz entworfen und optimiert werden soll. Die Zielfunktion kann z.B. die Kosten eines Netzes, die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit, die Gesamtlänge der Verbindungen, die Gesamtanzahl der Knoten im Netz, usw. oder aber auch ihre Kombinationen repräsentieren bzw. modellieren.

- Ist keine Zielfunktion definiert, dann sprechen wir von einem gültigen Netz, falls alle anderen Nebenbedingungen, die die technische Funktionalität des Netzes sicherstellen, erfüllt sind. Dieser Fall tritt häufig bei der konventionellen Netzplanung auf, wobei die Netzplanung und die Kostenberechnung typisch in Verantwortung verschiedener Abteilungen liegt. Da diese Vorgehensweise keiner Optimierung bedarf<sup>4</sup>, wird sie in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.
- Da die Gesamtkosten eines Netzes die entscheidende Rolle bei der Bewilligung und letztendlich auch bei der Realisierung des Netzes spielen, sind sie Hauptbestandteil der in dieser Arbeit verwandten Zielfunktion. Wie im Kap. 4 beschrieben, wurde durch die Entwicklung verschiedener Kostenfunktionen die Möglichkeit geschaffen, unterschiedliche Gesichtspunkte der Optimierung eines Netzes realitätsnah abzubilden und zu berücksichtigen. Der Kostenfunktion wurde folgendes zugrunde gelegt: für die Verbindungen wurden die von der DEUTSCHEN TELEKOM AG veröffentlichten Tarife benutzt, und für die Knoten wurden herstellerunabhängige Annahmen gemacht (s. App. C).

### 6.2.2 Festlegung der Wegewahlstrategie

Unter Wegewahlstrategie versteht man die Menge von Regeln und Vorschriften, die die Übermittlung des Verkehrs von der Quelle zur Senke festlegen, d.h. auf welchen Pfaden geleitet werden darf und in welcher Reihenfolge diese Pfade bei der Übermittlung benutzt werden sollen (s. auch Abs. 3.3.2 und 12.2).

Allgemein wird zwischen hierarchischen und nicht-hierarchischen Wegewahlstrategien unterschieden. Darüber hinaus kann man die einzelnen Strategien wie folgt spezifizieren:

- Direkte Wegewahl

---

<sup>4</sup>Darüber hinaus ist diese Vorgehensweise wirtschaftlich nicht wettbewerbsfähig.

- Alternative Wegewahl
  - Statische Wegewahl: der zur Auswahl stehende Pfad wird fest in einer Wegewahltafel vorgegeben.
  - Dynamische Wegewahl: die möglichen Pfade in der Wegewahltafel ändern sich mit der Zeit und der Netzauslastung.

### 6.2.3 Festlegung des Zielnetzes

Unter dem Zielnetz ist das zu entwerfende Netz zu verstehen. Man kann zwischen einem Universalnetz und einem dienstspezifischen Netz unterscheiden. Das Zielnetz definiert dementsprechend die im Netz verwendete Technologiestruktur, sowohl aus der Sicht der Vermittlung, wie z.B. wieviele Vermittlungsknotenklassen vorhanden sind, als auch aus der Sicht der Übertragungstechnik, wie z.B. ATM. Da der Trend aus Wirtschaftlichkeitsgründen von den hierarchischen Netzen zu den quasi flachen Netzen geht, wurde bei den hier untersuchten Netzen nur eine Vermittlungsknotenklasse und -schicht berücksichtigt. Dies bedeutet aber keine Einschränkung für die vorgestellten Verfahren, da durch Festlegung der Wegewahlstrategie beliebige Hierarchiestufen abgebildet werden können.

### 6.2.4 Festlegung der zu realisierenden Dienste

Der zu realisierende Dienst beeinflusst rückwirkend die Phase der Verkehrsprognose, da verschiedene Dienste verschiedene Verkehrsmerkmale zeigen. Man kann z.B. zwischen Diensten wie folgt unterscheiden:

1. Telefondienst (analog oder digital, ortsgebunden oder mobil),
2. ISDN (Daten + Telefondienst) und
3. B-ISDN (Sprache, Daten und Video).

### 6.2.5 Festlegung der Planungsmodelle

Hierbei wird die Methodik definiert, mit der das Netz zu planen ist. Man kann zwischen folgenden Methoden unterscheiden:

1. auf mathematischer Programmierung basierte Methoden,
2. heuristische Methoden,
3. zufallsgesteuerte Methoden und
4. Kombinationen von 1., 2. und 3.

### 6.3 Mathematische Problemformulierung

Die mathematische Beschreibung des Topologieentwurfsproblems bedarf der Einführung der folgenden Notation.

#### Notation:

$I$ :	Indexmenge von NT-Knoten;
$J$ :	Indexmenge von MUX-Knoten;
$K$ :	Indexmenge von SW-Knoten;
$P$ :	Indexmenge von POI-Knoten;
$N^{\text{NT}}$ :	Anzahl der NT-Knoten;
$N^{\text{POI}}$ :	Anzahl der POI-Knoten;
$N$ :	$I \cup J \cup K \cup P$ ;
$N_j^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}}$ :	Anzahl der NT-Knoten angeschlossen an MUX-Knoten $j$ ;
$N_k^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}}$ :	Anzahl der MUX-Knoten angeschlossen an SW-Knoten $k$ ;
$N_{\text{max}}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}}$ :	maximale Anzahl der an einen MUX-Knoten anschließbaren NT-Knoten;
$N_{\text{max}}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}}$ :	maximale Anzahl der an einen SW-Knoten anschließbaren MUX-Knoten;
$A_j^{\text{MUX}}$ :	Anschlußbereich des MUX-Knotens $j$ ;
$A_k^{\text{SW}}$ :	Anschlußbereich des SW-Knotens $k$ ;
$\Pi^{\text{NT}}$ :	$= \{p_{i \leftrightarrow i'}^{\text{NT}}   i, i' \in I\}$ ; Menge aller Verkehrsbeziehungen zwischen den NT-Knoten;
$\Pi^{\text{MUX}}$ :	$= \{p_{j \leftrightarrow j'}^{\text{MUX}}   j, j' \in J\}$ ; Menge aller Verkehrsbeziehungen zwischen den MUX-Knoten;
$\Pi^{\text{SW}}$ :	$= \{p_{k \leftrightarrow k'}^{\text{SW}}   k, k' \in K\}$ ; Menge aller Verkehrsbeziehungen zwischen den SW-Knoten;
$V_i^{\text{NT}}$ :	Knotenverkehr des NT-Knotens $i$ ;
$V_j^{\text{MUX}}$ :	Knotenverkehr des MUX-Knotens $j$ ;
$V_k^{\text{SW}}$ :	Knotenverkehr des SW-Knotens $k$ ;
$V_{\text{max}}^{\text{NT}}$ :	maximaler Knotenverkehr, der an einem NT-Knoten existieren kann;

- $V_{\max}^{\text{MUX}}$  : maximaler Knotenverkehr, der von einem MUX-Knoten verarbeitet werden kann;
- $V_{\max}^{\text{SW}}$  : maximaler Knotenverkehr, der von einem SW-Knoten vermittelt werden kann;
- $\rho_{\pi}$  : Route zur Unterstützung der Verkehrsbeziehung  $\pi$ ;
- $R$  : Menge aller Routen im Netz,  $\bigcup_{\pi \in \Pi_{\text{NT}}} \rho_{\pi}$ ;
- $l_{mm'}$  : Länge einer Verbindung zwischen den Knoten  $m$  und  $m'$ ;
- $\tau$  : mögliche Verbindungstypen  $\tau \in T = \{ \text{SFV-64k}; \text{SFV-2M}; \text{SFV-34M}; \text{SFV-155M} \}$ ;
- $|\tau|$  :  $|\tau| \in |T| = \{1, 32, 544, 2240\}$  gibt die Anzahl der 64kbit/s Kanäle für jeden Verbindungstyp an;
- $C_m^{\sigma}$  : Kosten des  $m$ -ten Knotens vom Typ  $\sigma = \{\text{NT}, \text{MUX}, \text{SW}, \text{POI}\}$ ;
- $C_{mm'}$  : Verbindungskosten zwischen den Knoten  $m$  und  $m'$ ;
- $\Upsilon(\tau, l_{mm'})$  : Kostenstruktur einer Verbindung als Funktion des Verbindungstyps  $\tau$  und der Verbindungslänge  $l_{mm'}$ ;
- $F_{mm'}$  : Verkehrsfluß auf der Verbindung  $mm'$  mit  $m, m' \in \{I, J, K, P\}$ ;
- $Q_{mm'}$  : Kapazität der Verbindung  $mm'$  mit  $m, m' \in \{I, J, K, P\}$ ;
- $\xi_{mm'}$  : Blockierwahrscheinlichkeit der Verbindung  $mm'$  mit  $m, m' \in \{I, J, K, P\}$ ;
- $\theta$  : Anzahl der benötigten Kanäle, um bei einem gegebenen Fluß  $F_{mm'}$  die Blockierwahrscheinlichkeit  $\xi_{mm'}$  gewährleisten zu können.

Die Entscheidungsvariablen sind:

- $x_j^{\text{MUX}}, x_k^{\text{SW}}$  : x-Koordinaten von MUX-Knoten  $j$  und SW-Knoten  $k$ ,  $\forall j \in J$  and  $\forall k \in K$ ;
- $y_j^{\text{MUX}}, y_k^{\text{SW}}$  : y-Koordinaten von MUX-Knoten  $j$  und SW-Knoten  $k$ ,  $\forall j \in J$  and  $\forall k \in K$ ;
- $N^{\text{MUX}}$  : Anzahl der MUX-Knoten;
- $N^{\text{SW}}$  : Anzahl der SW-Knoten;
- $L_{ij}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}}$  : binäre Variable mit dem Wert Eins, wenn eine Verbindung zwischen dem NT-Knoten  $i$  und dem MUX-Knoten  $j$   $\forall i \in I$  and  $\forall j \in J$  installiert ist, und sonst Null;

- $L_{jk}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}}$  : binäre Variable mit dem Wert Eins, wenn eine Verbindung zwischen dem MUX-Knoten  $j$  und dem SW-Knoten  $k \forall j \in J$  und  $\forall k \in K$  installiert ist, und sonst Null;
- $L_{kk'}^{\text{SW} \rightarrow \text{SW}}$  : binäre Variable mit dem Wert Eins, wenn eine Verbindung zwischen den  $k$ -ten und  $k'$ -ten SW-Knoten  $\forall k, k' \in K$  installiert ist, und sonst Null;
- $L_{kp}^{\text{SW} \rightarrow \text{POI}}$  : binäre Variable mit dem Wert Eins, wenn eine Verbindung zwischen den  $k$ -ten SW-Knoten und  $p$ -ten POI-Knoten  $\forall k \in K$  und  $\forall p \in P$  installiert ist, und sonst Null;
- $f_{mm'\pi}$  : Verkehrsfluß auf der Verbindung zwischen den Knoten  $m$  und  $m'$  verursacht durch die Verkehrsbeziehung  $\pi \in \Pi^{\text{NT}}$  und  $((\forall m \in I \wedge \forall m' \in J) \vee (\forall m \in J \wedge \forall m' \in K) \vee (\forall m \in K \wedge \forall m' \in K) \vee (\forall m \in K \wedge \forall p \in P))$ ;
- $\nu_{mm'}^\tau$  : Anzahl der Verbindungen vom Typ  $\tau$  zwischen den Knoten  $m$  und  $m'$ ;
- $X_{mm'}^{\rho\pi}$  : binäre Variable mit dem Wert Eins, wenn die Verbindung zwischen den Knoten  $m$  und  $m'$  zur Route  $\rho_\pi$  gehört, und sonst Null.

**Zielfunktion:**

$$\Psi' = \sum_{\forall m \in I} C_m^{\text{NT}} + \sum_{\forall m \in P} C_m^{\text{POI}} + \min\{\Psi\} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} \Psi = & \sum_{\forall m \in I} \sum_{\forall m' \in J} C_{mm'} \cdot L_{mm'}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}} + \sum_{\forall m \in J} \sum_{\forall m' \in K} C_{mm'} \cdot L_{mm'}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}} + \\ & \sum_{\forall m \in K} \sum_{\forall m' \in K} C_{mm'} \cdot L_{mm'}^{\text{SW} \rightarrow \text{SW}} + \sum_{\forall m \in K} \sum_{\forall m' \in P} C_{mm'} \cdot L_{mm'}^{\text{SW} \rightarrow \text{POI}} + \\ & \sum_{\forall m \in J} C_m^{\text{MUX}} + \sum_{\forall m \in K} C_m^{\text{SW}} \end{aligned} \quad (6.2)$$

**Bedingungen:**

$$F_{mm'} = \begin{cases} \sum_{\forall \pi \in \Pi^{\text{NT}}} f_{mm'\pi} \cdot L_{mm'}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}} \cdot X_{mm'}^{\rho_\pi} & \forall m \in I, \forall m' \in J \\ \sum_{\forall \pi \in \Pi^{\text{NT}}} f_{mm'\pi} \cdot L_{mm'}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}} \cdot X_{mm'}^{\rho_\pi} & \forall m \in J, \forall m' \in K \\ \sum_{\forall \pi \in \Pi^{\text{NT}}} f_{mm'\pi} \cdot L_{mm'}^{\text{SW} \rightarrow \text{SW}} \cdot X_{mm'}^{\rho_\pi} & \forall m \in K, \forall m' \in K \\ \sum_{\forall \pi \in \Pi^{\text{NT}}} f_{mm'\pi} \cdot L_{mm'}^{\text{SW} \rightarrow \text{POI}} \cdot X_{mm'}^{\rho_\pi} & \forall m \in K, \forall m' \in P \end{cases} \quad (6.3)$$

$$\sum_{\forall i \in I} L_{ij}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}} = N_j^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}} \leq N_{\max}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}} \quad \forall j \in J \quad (6.4)$$

$$\sum_{\forall j \in J} L_{jk}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}} = N_k^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}} \leq N_{\max}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}} \quad \forall k \in K \quad (6.5)$$

$$\sum_{\forall i \in I} L_{ij}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}} \cdot F_{ij} = V_j^{\text{MUX}} \leq V_{\max}^{\text{MUX}} \quad \forall j \in J \quad (6.6)$$

$$\sum_{\forall j \in J} L_{jk}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}} \cdot F_{jk} = V_k^{\text{SW}} \leq V_{\max}^{\text{SW}} \quad \forall k \in K \quad (6.7)$$

$$\xi_{mm'} = \frac{(F_{mm'})^\theta}{\sum_{z=0}^{\theta} \frac{(F_{mm'})^z}{z!}} \leq 0.1\% \quad [*] \quad (6.8)$$

$$C_{mm'} = \min_{\forall \tau} \{ \nu_{mm'}^\tau \cdot \Upsilon(\tau, l_{mm'}) \} \quad [*] \quad (6.9)$$

$$\nu_{mm'}^\tau = \left\lceil \frac{\theta}{|\tau|} \right\rceil \quad [*] \quad (6.10)$$

$$l_{mm'} = \sqrt{(x_m - x_{m'})^2 + (y_m - y_{m'})^2} \quad [*] \quad (6.11)$$

$$Q_{mm'} = \nu_{mm'}^\tau \cdot |\tau| \cdot 64 \text{ kbit/s} \quad [*] \quad (6.12)$$

$$F_{mm'} \leq Q_{mm'} \quad [*] \quad (6.13)$$

$$L_{mm'}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}} = \{0, 1\} \quad \forall m \in I, \forall m' \in J \quad (6.14)$$

$$L_{mm'}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}} = \{0, 1\} \quad \forall m \in J, \forall m' \in K \quad (6.15)$$

$$L_{mm'}^{\text{SW} \rightarrow \text{SW}} = \{0, 1\} \quad \forall m \in K, \forall m' \in K \quad (6.16)$$

$$L_{mm'}^{\text{SW} \rightarrow \text{POI}} = \{0, 1\} \quad \forall m \in K, \forall m' \in P \quad (6.17)$$

$$X_{mm'}^{\rho\pi} = \{0, 1\} \quad \forall \rho\pi \in R, [*] \quad (6.18)$$

$$f_{mm'\pi} \geq 0 \quad \forall \pi \in \Pi^{\text{NT}}, [*] \quad (6.19)$$

$$\nu_{mm'}^\tau \geq 0 \quad \forall \tau \in T, [*] \quad (6.20)$$

mit  $[*] : \left\{ \begin{array}{l} (\forall m \in I \wedge \forall m' \in J) \vee (\forall m \in J \wedge \forall m' \in K) \vee \\ (\forall m \in K \wedge \forall m' \in K) \vee (\forall m \in K \wedge \forall m' \in P) \end{array} \right.$

## 6.4 Komplexität des Topologieentwurfsproblems

Alle vorstellbaren Probleme können gemäß der Arbeiten des britischen Mathematikers A. M. TURING in zwei Klassen, nämlich die unlösbaren und die lösbaren Probleme, unterteilt werden. Die Klasse der unlösbaren Probleme erlaubt keine formale Beschreibung mittels Algorithmen. Instanzen der unlösbaren Probleme könnten z.B. mittels der Methode des scharfen Hinsehens oder des Zufalls gelöst werden, aber eine allgemeine Methode zu ihrer Lösung kann nicht angegeben werden. Ein klassisches Beispiel für Probleme dieser Art ist die Vorhersage, ob eine einzelne Turingmaschine nach dem Start ihre Berechnungen jemals endet und hält. Alle anderen Probleme gehören dann der Klasse der lösbaren Probleme an, wie das Problem des optimalen Topologieentwurfs von Telekommunikationsnetzen [38, 11].

Eine generelle Lösungsmethode (ein Algorithmus) ist eine genau formulierte Prozedur, bzw. die Menge aller Instruktionen, die in gleicher Weise auf alle Instanzen des Problems anwendbar sind. Die Effizienz der Algorithmen kann anhand ihrer Zeitkomplexitätsordnung beschrieben werden. Man unterscheidet zwischen deterministischen und nichtdeterministischen Algorithmen. Unter deterministisch versteht man, daß zu jedem Zeitpunkt, unabhängig vom Zustand des Algorithmus, nur eine Teilaufgabe als Nächstes bevorsteht. Ein Algorithmus wird als nichtdeterministisch bezeichnet, wenn er in der Lage ist, in einem Zustand mit der Wahlmöglichkeit zwischen mehreren Varianten die Richtige zu erraten. Diese Definitionen erlauben die lösbaren Probleme weiterhin in zwei Klassen zu unterteilen. Von der Komplexitätsklasse ( $P$ , *polynomial*) sind alle Probleme, die mit Hilfe deterministischer Algorithmen in polynomialer Zeit gelöst werden können. Der Komplexitätsklasse ( $NP$ , *nondeterministic polynomial*) gehören alle Probleme an, die mit Hilfe nichtdeterministischer Algorithmen in polynomialer Zeit gelöst werden können bzw. mit deterministischen Algorithmen eines exponentiellen Zeitaufwands bedürfen (Es gilt:  $P \subset NP$ ). Alle Probleme der Klasse  $NP$ , die die folgende Eigenschaft teilen, werden  $NP$ -vollständige Probleme genannt: Falls irgendeines der  $NP$ -vollständigen Probleme in einer polynomialen Zeit gelöst werden kann, so gilt das für alle Probleme der Klasse  $NP$ . Dies bedeutet, daß alle Probleme der Klasse  $NP$  mittels Algorithmen mit einer polynomialen Zeitkomplexität auf  $NP$ -vollständige Probleme reduziert werden können. Es ist bis jetzt trotz beträchtlicher Anstrengungen niemandem gelungen, für  $NP$ -vollständige Probleme einen effizienten deterministischen Algorithmus zu finden [29, 45].

Durch eine Reduktion des Topologieoptimierungsproblems auf ein bekanntes NP-vollständiges Problem soll der Beweis für seine NP-Vollständigkeit erbracht werden. Es sollen folgende Vereinfachungen getroffen werden:

- Reduktion der Anzahl von SW-Knoten auf  $N^{\text{SW}} = 1$ ,
- Ein NT-Knoten darf auch an einen SW-Knoten angeschlossen werden,
- Die potentiellen Lagen von MUX-Knoten sind vorgegeben.

Dieses reduzierte und NP-vollständige Problem ist in der Literatur als Konzentratorenproblem (*star-star concentrator problem*) bekannt [41]. Darüber hinaus lassen die bedingten Zuordnungsprobleme zwischen NT- und MUX-Knoten bzw. zwischen MUX- und SW-Knoten die Komplexität und Schwierigkeit des Topologieoptimierungsproblems erahnen. Die Zeitkomplexität eines bedingten Zuordnungsproblems ist zum Ausdruck  $k^{n^2}$  proportional, wobei  $k$  die Anzahl der Konzentratoren (z.B.  $N^{\text{MUX}}$ ) und  $n$  die Anzahl der Knoten angibt, die zu den Konzentratoren mit beschränkter Kapazität angeschlossen werden müssen (z.B.  $N^{\text{NT}}$ ).



---

## Mehrstufiger Netzentwurf

Die Komplexität des Topologieoptimierungsproblems, ausgedrückt durch die Anzahl der gesuchten Variablen und einschränkenden Bedingungen (s. Abs. 6.3), schließt jedes exakte Lösungsverfahren aus. Sie erfordert effiziente heuristische Verfahren, die sich durch unkonventionelle und schnelle Suche im Lösungsraum kennzeichnen.

Zur Lösung des Topologieoptimierungsproblems wurden in dieser Arbeit zwei Lösungsstrategien untersucht. Die erste Lösungsstrategie basiert auf der Entwicklung effizienter Suchverfahren, wie die stochastischen Algorithmen (s. Kap. 8 und 9), die zufallsgesteuert den Lösungsraum nach Optima durchsuchen. Die andere diesem Kapitel zugrundeliegende Lösungsstrategie lehnt an die in der Praxis verwandte Planungsmethodik an und ermöglicht den Lösungsraum in Teilräume zu zerlegen, in denen man mit Hilfe der bekannten Verfahren effizient suchen kann.

In diesem Kapitel wird der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte mehrstufige Topologieentwurfalgorithmus (*Multi-step Topology Design Algorithm, MTDA*) vorgestellt, der auf die Zerlegung des Topologieentwurfproblems in Teilprobleme beruht. Dieser Algorithmus ist durch die inhärente Modularität und das flexible Anwendungsspektrum gekennzeichnet.

### 7.1 Mehrstufiger Topologieentwurfalgorithmus

Der Mehrstufige Topologieentwurfalgorithmus zerlegt das in Abs. 6.3 formulierte Problem in Teilprobleme, die nacheinander mittels effizienter Verfahren gelöst werden. Diese Verfahren operieren auf einer Teilmenge der gesuchten Variablen und erzielen dabei optimale Teillösungen. Die in jeder Stufe des Topologieentwurfs erzielten Teillösungen dienen i.d.R. als Eingabedaten für die nächste Stufe. Somit ist es möglich, ein Netz Stufe für Stufe zu entwerfen. Der Erfolg dieser Methode hängt vom Grad der Zerlegbarkeit eines Problems in voneinander unabhängige Probleme und der Qualität der zur Lösung der Teilprobleme verwandten Verfahren ab.

Die dieser Arbeit zugrundeliegende Netzstruktur erlaubt die Unterscheidung zwischen den folgenden Teilproblemen:

1. Entwurf von Teilnetzen zwischen NT- und MUX-Knoten,
2. Entwurf von Teilnetzen zwischen MUX- und SW-Knoten und
3. Entwurf eines Backbone-Netzes zwischen SW-Knoten.

## 7.2 Teilnetze zwischen NT- und MUX-Knoten

Dieses Teilproblem läßt sich in drei nacheinander zu lösende Teilprobleme zerlegen: Bestimmung der Lage von MUX-Knoten, Zuordnung von NT- zu MUX-Knoten und Bestimmung der Struktur der Verbindungen.

### 7.2.1 Bestimmung von MUX-Lokationen

Um die potentiellen Lagen der Multiplexer, Konzentratoren und Vermittlungsanlagen für flächenmäßig große Netze zu bestimmen, ist es zweckmäßig sie in Verkehrsschwerpunkte zu positionieren. Hierdurch ist es möglich Leitungskosten zu sparen, da man Verkehr nahe zur Verkehrsquelle sammelt und möglichst nah zur Senke abgibt. Im folgenden werden die von MTDA für diese Teilaufgabe vorgesehenen Algorithmen am Beispiel von MUX-Knoten erläutert.

### COT-Algorithmus

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der geographischen Lage von MUX-Knoten ist durch den COT-Algorithmus (*Center Of Traffic*) gegeben. Der Algorithmus basiert auf dem Prinzip der Schwerpunktberechnung [55]. Durch die aufeinanderfolgende Zerlegung des von NT-Knoten aufgespannten Gebietes ist es möglich mehrere Verkehrsschwerpunkte zu bestimmen. Der COT-Algorithmus benötigt die folgenden Eingabedaten (s. Abb. 7.1(a)):

- die Koordinaten von NT-Knoten, d.h.:

$$\Xi^{NT} = ((x_1^{NT}, y_1^{NT}), \dots, (x_{N^{NT}}^{NT}, y_{N^{NT}}^{NT})),$$

- die Verkehrsmenge an NT-Knoten  $V_i^{NT} = \sum_{\forall i' \in I} p_{i \leftrightarrow i'}^{NT} \quad \forall i \in I$ , und
- die Anzahl der benötigten Verkehrsschwerpunkte, wobei sich die erforderliche Anzahl durch den Ausdruck  $\lceil \frac{N^{NT}}{N_{\max}^{NT \rightarrow \text{MUX}}} \rceil$  berechnen läßt.

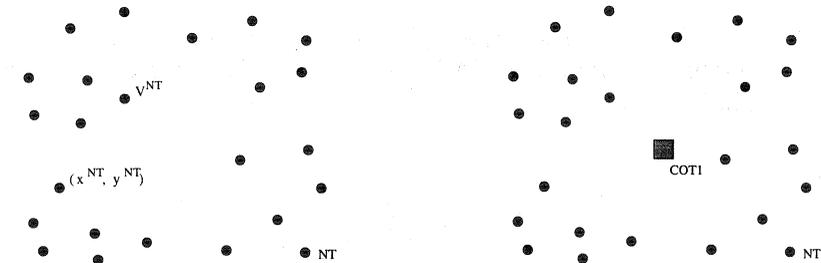
Die wesentlichen Schritte des COT-Algorithmus sind:

1. Mit Hilfe der Gleichungen (7.1) und (7.2) werden die x- und y-Koordinaten des ersten COT, nämlich COT1 ermittelt (siehe auch Abb. 7.1(b)):

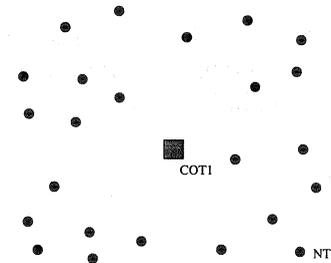
$$x_1^{\text{MUX}} = \frac{[\sum_{i \in I} x_i^{\text{NT}} \cdot V_i^{\text{NT}}]}{\sum_{i \in I} V_i^{\text{NT}}}, \quad (7.1)$$

$$y_1^{\text{MUX}} = \frac{[\sum_{i \in I} y_i^{\text{NT}} \cdot V_i^{\text{NT}}]}{\sum_{i \in I} V_i^{\text{NT}}}. \quad (7.2)$$

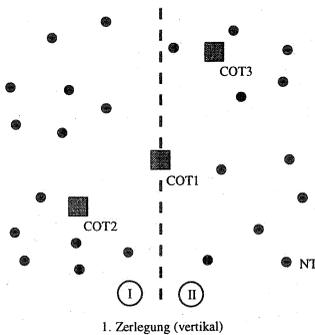
2. Vertikalzerlegungsvorgang: Um die Positionen für zwei COTs festzulegen, muß man zuerst eine Hilfslinie vertikal durch COT1 zeichnen, Abb. 7.1(b). Dann berechnet man auf der linken und rechten Seite der Hilfslinie (Gebiet I und II) mit den Gleichungen (7.1) und (7.2) jeweils für die beiden Gebiete neue COTs, nämlich COT2 und COT3 (vgl. Abb. 7.1(c)). Dabei wurde der Verkehrsschwerpunkt COT1 durch COT2 und COT3 ersetzt.
3. Horizontalzerlegungsvorgang: Um vier COTs für die betrachteten NTs festzulegen, muß man zuerst zwei Hilfslinien horizontal durch COT2 und COT3 zeichnen. Mit den beiden horizontalen Linien und der vertikalen Linie werden vier Gebiete (Gebiet I, II, III, IV) gebildet. Wieder werden durch Benutzung der Gleichungen (7.1) und (7.2) die COTs für die vier Gebiete bestimmt, nämlich COT4, COT5, COT6 und COT7 (siehe auch Abb. 7.1(d)).
4. Durch weitere abwechselnde Vertikal- und Horizontalzerlegungen von Gebieten d.h. die Schritte 3 und 4, berechnet man weitere COT-Positionen. Eine abwechselnde Zerlegung in Vertikal- und Horizontalrichtung ist notwendig, um die Abhängigkeit von der geographischen Grenze auszuschließen.
5. Aus der ermittelten Anzahl der potentiellen Lagen der Knoten kann jetzt unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen, wie Geräteeigenschaften und Kosten, die gewünschte Knotenanzahl ausgewählt werden.



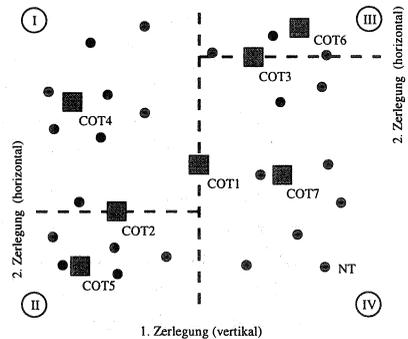
(a) Koordinaten der Knoten und ihr Gesamtverkehr sind gegeben.



(b) Bestimmung von COT1



(c) Bestimmung von COT2 und COT3



(d) Bestimmung von COT4, COT5, COT6 und COT7

Abbildung 7.1: Schematische Darstellung des COT-Algorithmus zur Bestimmung von Verkehrsschwerpunkten

## RS-Algorithmus

Die Netzknoten sind sowohl in ihren Anschlußmöglichkeiten als auch in der von ihnen behandelbaren Verkehrsmenge begrenzt (s. Gln. (7.3) und

(7.4). Der RS-Algorithmus (*Rolling Snowball, RS*) basiert wie der COT-Algorithmus auf dem Prinzip der Schwerpunktbestimmung und berücksichtigt dabei zur Bestimmung der möglichen Lagen von Knoten die einschränkenden Bedingungen:

$$N_j^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}} \leq N_{\max}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}}, \quad \forall j \in J, \quad (7.3)$$

$$V_j^{\text{MUX}} \leq V_{\max}^{\text{MUX}}, \quad \forall j \in J. \quad (7.4)$$

Der RS-Algorithmus benötigt analog zum COT-Algorithmus als Eingabedaten die Koordinaten von NT-Knoten und die Verkehrsmenge an NT-Knoten. Zusätzlich wird die max. Anschluß- und Verkehrskapazität von MUX-Knoten, d.h.  $N^{\text{MUX}}$  und  $V^{\text{MUX}}$  in die Berechnung miteinbezogen. Der RS-Algorithmus läßt sich wie folgt zusammenfassen:

1. Jeder NT-Knoten besitzt zuerst seinen eigenen Anschlußbereich, der im Laufe des Algorithmus mit anderen Anschlußbereichen vereinigt wird<sup>1</sup>.
2. Zwei nächstbenachbarte Anschlußbereiche  $i$  und  $i'$  werden durch einen neuen  $\bar{i}$  im Schwerpunkt der beiden ersetzt, wenn die Bedingungen (7.1) oder (7.2) nicht verletzt werden:

$$x_i^{\text{MUX}} = \frac{x_i^{\text{NT}} \cdot V_i^{\text{NT}} + x_{i'}^{\text{NT}} \cdot V_{i'}^{\text{NT}}}{V_i^{\text{NT}} + V_{i'}^{\text{NT}}}, \quad (7.5)$$

$$y_i^{\text{MUX}} = \frac{y_i^{\text{NT}} \cdot V_i^{\text{NT}} + y_{i'}^{\text{NT}} \cdot V_{i'}^{\text{NT}}}{V_i^{\text{NT}} + V_{i'}^{\text{NT}}}. \quad (7.6)$$

3. Schritt 2. wird solange wiederholt, bis die gewünschte Anzahl von MUX-Orten gefunden worden ist.

## TA-Algorithmus

Das breite Anwendungsspektrum der zufallsgesteuerten Algorithmen erlaubt, sie auch für die effiziente Lösung von Teilproblemen, wie das MUX-Plazierungsproblem, einzusetzen. Der TA-Algorithmus (*Threshold Accepting, TA*) basiert auf dem Prinzip des „Simulierten Ausglühens“ mit Schwellenakzeptanzstrategie (s. Abs. 8.6.2) und wurde im mehrstufigen Algorithmus

<sup>1</sup>Der RS-Algorithmus wird rollender Schneeball (*rolling snowball*) genannt, da er die Anschlußbereiche vereinigt und somit immer größer werden läßt.

mus MTDA zur Bestimmung der Lage von Knoten eingesetzt. Die wesentlichen Schritte des TA-Algorithmus sind:

1. die gegebene Anzahl<sup>2</sup> von MUX-Knoten wird zufällig im Planungsbe-  
reich plaziert.
2. Die NT-Knoten werden mit einem zufällig gewählten MUX-Knoten  $j$   
verbunden, wenn die Bedingung (7.3) noch erfüllt bleibt.
3. Neue Lösungen entstehen durch die geographische Verschiebung der  
MUX-Knoten und durch die Änderung der Zugehörigkeit der NT-  
Knoten zu den MUX-Knoten.
4. Das Kriterium für die Bewertung der Lösungen ist die Summe der  
mit Knotenverkehr gewichteten Distanzen zwischen den MUX-Knoten  
und den dazugehörigen NT-Knoten. Eine neue Lösung wird akzeptiert,  
wenn diese Summe unterhalb der Schwelle liegt.
5. die Schwelle wird mit der Zeit herabgesetzt, so daß sich eine durch  
eine minimale und gewichtete Distanzsumme gekennzeichnete Kon-  
figuration herauskristallisiert.

### 7.2.2 Zuordnung von NT- zu MUX-Knoten

Unter Zuordnung von Knoten versteht man eine Aufteilung der Knoten eines bestimmten Typs in Gruppen, die einem Knoten höherer Hierarchie zugeordnet werden und sich in seinem Anschlußbereich befinden. Sind diese Knoten höherer Hierarchie von der Kapazität nicht begrenzt, so besteht die optimale Lösung in der Zuordnung der Knoten niedrigerer Hierarchie zu den nächstliegenden Knoten der darüberliegenden Hierarchie. In den meisten Fällen, wie auch in den Untersuchungen dieser Arbeit, sind die Knoten in ihrer Kapazität begrenzt. Diese Einschränkung bedingt die Zugehörigkeit dieses Problems zu der Klasse der schwierigen Probleme [41].

Zwei der oben dargestellten Algorithmen, d.h. der RS- und TA-Algorithmus, bestimmen zusätzlich zu den Knotenorten auch implizit die Zuordnung von Knoten zu den Knoten höherer Hierarchie. MTDA verwendet sie als kombinierte Verfahren zur Bestimmung von MUX-Orten und zur Zuordnung von NT- zu den MUX-Knoten.

Sind die MUX-Orten schon gegeben, so kann man den TA-Algorithmus ohne Benutzung des Knotenverschiebungsoperators verwenden. So ist sicher-

---

<sup>2</sup>Die erforderliche Anzahl der MUX-Knoten kann aus der Beziehung  $\lceil \frac{N^{NT}}{N_{\max}^{NT \rightarrow MUX}} \rceil$  be-  
rechnet werden.

gestellt, daß die Knoten sich während eines Optimierungsprozesses nicht bewegen. Ein anderes und in der Praxis oft angewandtes Verfahren ist der heuristische *Greedy*-Algorithmus. Dabei werden die NT-Knoten den nächstgelegenen MUX-Knoten zugeordnet, solange die MUX-Kapazität nicht überschritten wird. Ist die Zuordnung eines NT-Knotens aufgrund der MUX-Kapazitätüberschreitung nicht möglich, so wird der nächste MUX-Knoten mit freier Kapazität gewählt. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis alle NT-Knoten zu MUX-Knoten zugeordnet worden sind [33].

Nach der Zuordnung der NT-Knoten zu den MUX-Knoten ist es möglich den MUX-Knotenverkehr bzw. die Verkehrsbeziehungen zwischen den MUX-Knoten zu ermitteln:

$$V_j^{\text{MUX}} = \sum_{i \in A_j^{\text{MUX}}} V_i^{\text{NT}}, \quad \forall j \in J, \quad (7.7)$$

$$p_{j \leftrightarrow j'}^{\text{MUX}} = \sum_{\substack{i' \in A_{j'}^{\text{MUX}} \\ i \in A_j^{\text{MUX}}}} p_{i \leftrightarrow i'}^{\text{NT}}, \quad \forall j, j' \in J. \quad (7.8)$$

### 7.2.3 Bestimmung der Struktur von NT-MUX-Verbindungen

Die Struktur von NT-MUX-Verbindungen repräsentiert sich durch die Topologie der Teilnetze bestehend aus NT- und MUX-Knoten. Zur Bestimmung der Topologie dieser Teilnetze sind je nach Anforderung verschiedene Topologien denkbar. Sind die Verbindungskosten proportional zur Verbindungslänge und deshalb teuer, so ist eine Topologie mit minimaler Verbindungslänge, wie der minimale Spannbaum, günstig. Spielt dagegen die Antwortzeit der Ende-zu-Ende-Verbindungen eine Rolle, so ist die Anzahl der auf einem Übertragungspfad liegenden Knoten zu reduzieren, wie es bei einer sternförmigen Topologie der Fall ist. Bei Kanalvermittelten Netzen wird die Topologie hauptsächlich durch die Kostenstruktur der Verbindungen bestimmt.

Im MTDA ist der flexible HS-Algorithmus (*Hybrid Spanning tree*) integriert worden, der zwischen den Knoten eines Anschlußbereiches einen Baum aufspannen kann [35]. Mit Hilfe eines Parameters, in dieser Arbeit Baumgrad genannt, ist es möglich, die Topologie des Baumes von der reinen sternförmigen Struktur bis zum minimalen Spannbaum zu variieren. Im folgenden wird die Vorgehensweise des Algorithmus kurz erläutert.

## HS-Algorithmus

Der HS-Algorithmus (*Hybrid Spanning tree, HS*) basiert auf den Algorithmen „Minimaler Spannbaum“ von PRIM [46] und „der kürzeste Pfad“ von DIJKSTRA [48]. Dieser Algorithmus ermöglicht, die Gesamtlänge der Verbindungen in einem Teilnetz und die Summe der Ende-zu-Ende-Pfadlängen mit Hilfe eines Parameters  $\alpha$  zu modifizieren. Analog zum Algorithmus „Minimaler Spannbaum“ werden Knoten nacheinander über den nächsten im Teilnetz befindlichen Knoten ins Teilnetz aufgenommen. Das Kriterium für die Wahl eines nächsten im Teilnetz befindlichen Knotens  $j$  über den der Knoten  $i$  ins Teilnetz aufgenommen werden soll, ist die Summe aus dem Abstand zwischen  $i$  und  $j$  und dem mit  $\alpha$  gewichteten Abstand zwischen  $j$  und dem Ursprung des Teilnetzes. Für  $\alpha = 0$  liegt ein minimaler Spannbaum vor, wobei die Gesamtlänge aller Verbindungen im Teilnetz minimal ist. Bei  $\alpha = 1$  werden die kürzesten Pfade zur Wurzel des Baumes berücksichtigt, wobei dann eine sternförmige Struktur resultiert.

### 7.3 Teilnetze zwischen MUX- und SW-Knoten

Zum Entwurf von Teilnetzen dieser Netzhierarchie werden die gewonnenen Ergebnisse aus der NT-MUX-Ebene benötigt. Hierzu zählen die MUX-Orten und der Verkehr an den MUX-Knoten. Gesucht sind die SW-Orten, der Verkehr an SW-Knoten und die Topologie der Teilnetze zwischen MUX- und SW-Knoten.

Die SW-Orten und ihre Anschlußbereiche lassen sich analog zu den MUX-Knoten mit Hilfe der oben beschriebenen Algorithmen COT-, RS-, TA- und *Greedy*-Algorithmus bestimmen:

$$\Xi^{\text{SW}} = ((x_1^{\text{SW}}, y_1^{\text{SW}}), \dots, (x_{N^{\text{SW}}}^{\text{SW}}, y_{N^{\text{SW}}}^{\text{SW}})). \quad (7.9)$$

Der Verkehr an den SW-Knoten kann analog zu den MUX-Knoten berechnet werden:

$$p_{k \leftrightarrow k'}^{\text{SW}} = \sum_{\substack{j' \in A_k^{\text{SW}} \\ j \in A_{k'}^{\text{SW}}}} p_{j \leftrightarrow j'}^{\text{MUX}}, \quad \forall k, k' \in K, \quad (7.10)$$

$$V_k^{\text{SW}} = \sum_{\forall k' \in K} p_{k \leftrightarrow k'}^{\text{SW}}, \quad \forall k \in K. \quad (7.11)$$

## 7.4 Backbone-Netz zwischen SW-Knoten

Diese Stufe des mehrstufigen Topologieentwurfs umfaßt die Bestimmung der Topologie des Backbone-Netzes. Die Topologie eines Backbone-Netzes ist zusätzlich zu den Kostenstrukturen der Knoten und Verbindungen i.d.R. strengeren Dienstgüteparametern, wie z.B. Verfügbarkeit und Sicherheit, unterworfen. Ein Beispiel für die Verfügbarkeit eines Netzes ist, daß für jede Verkehrsbeziehung zwei voneinander unabhängige Pfade im Backbone existieren.

Die einfachste Backbone-Topologie ist die Vollvermaschung, wobei jede Vermittlungsstelle mit jeder anderen Vermittlungsstelle eine direkte Verbindung hat. Ist die Anzahl der Knoten auf der Backbone-Ebene klein, so ist diese Topologie vertretbar. Für Netze mit größerer Knotenanzahl werden teilvermaschte Topologien verwandt, um die Verbindungen gut auszulasten und die Verbindungskosten zu reduzieren.

Zu Vergleichszwecken mit anderen Algorithmen verbindet der MTDA für jede Verkehrsbeziehung auf der Backbone-Ebene die Quelle und Senke direkt miteinander. Die Verbindung zu Netzübergangspunkten (POIs) wird unter den Kostengesichtspunkten über die geographisch nächsten Vermittlungsstellen vollzogen.



# Simuliertes Ausglühen

Der Algorithmus „Simuliertes Ausglühen“ (*Simulated Annealing, SA*) stellt eine zufallsgesteuerte Optimierungsstrategie dar und ist, wegen seiner allgemeinen Anwendbarkeit und der Fähigkeit, beliebig gute Lösungen erzielen zu können (globale Konvergenz), bekannt. Daher ist die Güte der Lösungen für ein kombinatorisches Problem in der Regel dem Rechenaufwand proportional. Das in diesem Kapitel verfolgte Ziel ist, die Möglichkeit der Abbildung der SA-Strategie auf das Topologieoptimierungsproblem zu untersuchen und zu analysieren. Darüber hinaus soll der SA-Algorithmus dahingehend optimiert werden, daß problemspezifisch maximale Effizienz und beste Einstellung der Parameter gewährleistet ist.

## 8.1 Physikalischer Hintergrund

Die heuristische Optimierungsstrategie „Simuliertes Ausglühen“ beruht auf einer Beobachtung aus der Festkörperphysik. Die physikalischen Gesetze der Wärmelehre besagen, daß die Festkörper bei tiefen Temperaturen eine reine Kristallstruktur haben sollten. In Wirklichkeit haben Festkörper aber eine Vielzahl von Defekten, Verunreinigungen oder sogar eine regellose Anordnung von Atomen, wie bei den Gläsern. Solche Abweichungen von der idealen Kristallstruktur kann man durch sorgfältiges Ausglühen verringern. Man erhitzt den Festkörper viele Stunden und läßt ihn dann langsam abkühlen. Das aus einer riesigen Anzahl von Atomen bestehende System mit einer entsprechenden Vielzahl an Zuständen wird auf diese Weise durch Wärmebewegungen der Atome in einen Zustand minimaler innerer Energie gebracht.

Im Jahre 1953 entwickelten METROPOLIS et al. [15] einen Algorithmus, der die Basis für die heutige SA-Optimierungsstrategie darstellt. Mittels dieses Algorithmus, auch Metropolis Algorithmus genannt, wurde der Energieaustausch eines dem Kühlungsprozeß unterworfenen Vielteilchensystems bis zum Erreichen eines stabilen und „gefrorenen Zustands“ simuliert. KIRK-

PATRIK 1983 [37] und, unabhängig davon, ČERNÝ 1985 [36] haben gezeigt, wie man die Simulation von Atomen im Gleichgewicht bei einer Temperatur zur Lösung von schwierigen Optimierungsaufgaben einsetzen kann. In jedem Schritt des Algorithmus werden die Atome zufällig um einen kleinen Betrag verschoben, und die entstandene Gesamtenergiedifferenz des Systems  $\Delta E$  wird berechnet. Ist  $\Delta E \leq 0$ , wird dieser Zustand als neuer Zustand angenommen, da dieser Zustand eine niedrigere innere Energie aufweist. Ist  $\Delta E > 0$ , wird der neue Zustand mit einer Wahrscheinlichkeit  $P$  akzeptiert ( $P(\Delta E) = \exp(\frac{-\Delta E}{k_B T})$ ), die abhängig von der Temperatur  $T$  mit der Zeit entsprechend der zugrundeliegenden Kühlungsschemata abnimmt ( $k_B$ : Boltzmann Konstante).

## 8.2 Anwendung auf Topologieoptimierungsproblem

Durch Anwendung des Metropolis Algorithmus ist man in der Lage eine Folge von Lösungen eines kombinatorischen Problems, wie z.B. des Topologieoptimierungsproblems aus Abschnitt 6.3, zu generieren. Die Analogie zwischen dem System von Atomen und dem Topologieoptimierungsproblem basiert auf den folgenden Abbildungen: die Kostenfunktion  $\Psi$  übernimmt die Rolle der freien Energie des Systems (s. Tab. 8.1). Systemzustände gleichen gültigen Netzen, die alle angegebenen Entwurfsanforderungen, wie z.B. Einhaltung einer bestimmten Blockierung auf Verbindungen erfüllen. Die Wirkungsweise der Temperatur wird durch einen Steuerungsparameter realisiert. Der Steuerungsparameter besitzt die gleiche Einheit wie die Kosten eines Netzes. Erhitzung des Systems bis zu einer bestimmten Temperatur bedeutet Berücksichtigung teurerer Netze als mögliche neue Netze im Lösungsraum. Die Abkühlung des Systems entspricht der Verkleinerung des Steuerungsparameters. Bei jedem Wert des Steuerungsparameters soll solange simuliert werden, bis sich das System in einem stabilen und eingeschwungenen Gleichgewicht befindet. Ist der Steuerungsparameter sehr klein (System im „gefrorenen Zustand“), so ist die Lösung des Verfahrens, d.h. das optimale Ergebnisnetz, gefunden worden.

## 8.3 Modellierung der Netzkonfiguration

Für die Topologieoptimierung von Telekommunikationsnetzen operiert der SA-Algorithmus auf ein Netz bzw. eine Netzrepräsentation. Im Falle von

Tabelle 8.1: Äquivalenz der Terminologie aus der Wärmelehre und der Topologieoptimierung

Wärmelehresimulation	Topologieoptimierung
Systemzustände	gültige Netze
Energie	Kosten
Zustandsänderung	Übergang zu einem neuen Netz
Temperatur	Steuerungsparameter
„gefrorener Zustand“	optimales Ergebnisnetz

SA stellt die Graphendarstellung eine geeignete Netzrepräsentation dar (s. Abs. 2.2), wobei nur die im Rahmen der Optimierung relevanten Variablen in Form einer Netzkonfiguration berücksichtigt werden sollen. Eine Netzkonfiguration setzt sich aus folgenden Variablen zusammen:

- Netzknotenpositionen, d.h. der Vektor  $\Xi$  der Koordinatenpaare

$$\Xi^{\text{MUX}} = ((x_1^{\text{MUX}}, y_1^{\text{MUX}}), \dots, (x_{N^{\text{MUX}}}^{\text{MUX}}, y_{N^{\text{MUX}}}^{\text{MUX}})), \quad (8.1)$$

$$\Xi^{\text{SW}} = ((x_1^{\text{SW}}, y_1^{\text{SW}}), \dots, (x_{N^{\text{SW}}}^{\text{SW}}, y_{N^{\text{SW}}}^{\text{SW}})), \quad (8.2)$$

$$N^{\text{MUX}} = \left\lceil \frac{N^{\text{NT}}}{N_{\text{max}}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}}} \right\rceil + \alpha, \quad (8.3)$$

$$N^{\text{SW}} = \left\lceil \frac{N^{\text{MUX}}}{N_{\text{max}}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}}} \right\rceil + \beta, \quad (8.4)$$

$$x_i^{\text{MUX}}, y_i^{\text{MUX}} \in \mathbb{R}, \quad 1 < i < N^{\text{MUX}}, \quad (8.5)$$

$$x_i^{\text{SW}}, y_i^{\text{SW}} \in \mathbb{R}, \quad 1 < i < N^{\text{SW}}. \quad (8.6)$$

Die Anzahl der MUX-Knoten (SW-Knoten) im Netz  $N^{\text{MUX}}$  ( $N^{\text{SW}}$ ) läßt sich durch die Anzahl der Knoten auf der niedrigeren Hierarchieebene  $N^{\text{NT}}$  ( $N^{\text{MUX}}$ ) und die Anschlußkapazität  $N_{\text{max}}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}}$  ( $N_{\text{max}}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}}$ ) bestimmen (s. Gln. 8.3 und 8.4). Die Parameter  $\alpha \geq 0$  und  $\beta \geq 0$  geben jeweils die Zahl der zusätzlich zu installierenden Knoten MUX und SW über die minimal erforderliche Knotenanzahl an. Der Wert dieser Parameter ist von den Knoten- und Verbindungskosten in einem Netz abhängig und sollte gemäß des jeweiligen

Netztyps bestimmt werden. Für die im Rahmen dieser Arbeit entworfenen Experimente wurden die beiden Parameter gleich „Eins“ gesetzt.

- Die Existenz der Verbindungen im Netz, d.h. der Vektor der Verbindungen  $\Gamma$  zwischen den Knotenpaaren (NT, MUX), (MUX, SW) und (SW, SW):

$$\Gamma^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}} = (L_{11}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}}, \dots, L_{N^{\text{NT}} N^{\text{MUX}}}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}}) \quad (8.7)$$

$$\Gamma^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}} = (L_{11}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}}, \dots, L_{N^{\text{MUX}} N^{\text{SW}}}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}}) \quad (8.8)$$

$$\Gamma^{\text{SW} \rightarrow \text{SW}} = (L_{11}^{\text{SW} \rightarrow \text{SW}}, \dots, L_{N^{\text{SW}} N^{\text{SW}}}^{\text{SW} \rightarrow \text{SW}}) \quad (8.9)$$

$$L_{mm'}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}} = \{0, 1\} \quad \forall m \in I, \forall m' \in J \quad (8.10)$$

$$L_{mm'}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}} = \{0, 1\} \quad \forall m \in J, \forall m' \in K \quad (8.11)$$

$$L_{mm'}^{\text{SW} \rightarrow \text{SW}} = \{0, 1\} \quad \forall m, m' \in K \quad (8.12)$$

Die Existenz einer Verbindung  $L_{mm'}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}}$ ,  $L_{mm'}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}}$  bzw.  $L_{mm'}^{\text{SW} \rightarrow \text{SW}}$  wird binär dargestellt.

Durch Modifikation der obigen Vektorelemente wird der Lösungsraum festgelegt. Die im Abschnitt 8.8 beschriebenen Operatoren benutzen diese Netzkonfiguration, um von einer alten Netzlösung zu einer Nachbarnetzlösung zu gelangen.

## 8.4 Beschreibung des SA-Algorithmus

Zu Beginn der Optimierung wird ein Netz initialisiert. Initialisierung bedeutet, daß eine gültige Konfiguration der gesuchten Variablen (Netzkonfiguration) angenommen wird. Darüber hinaus werden geeignete Startwerte für den Steuerungsparameter und die Iterationslänge angenommen (siehe Abb. 8.1). Der Wert des Steuerungsparameters ist ein Maß für den Grad der Unordnung im System, auch Entropie genannt. Die Initialisierung eines Netzes mit dem Anfangssteuerungsparameter entspricht der Zulassung von teureren Netzen. Jeder Wert des Steuerungsparameters kennzeichnet eine Iterationsstufe im Laufe des Optimierungsprozesses. Das Kühlungsschema bestimmt, wie der Wert des Steuerungsparameters verkleinert wird. Jede Iterationsstufe besteht aus einem Zyklus der Netzkonfigurationsübergänge. Durch Perturbation der Konfigurationsvariablen wird aus einem alten Netz ein neues Netz erzeugt. Die Regel für eine Änderung und schließlich

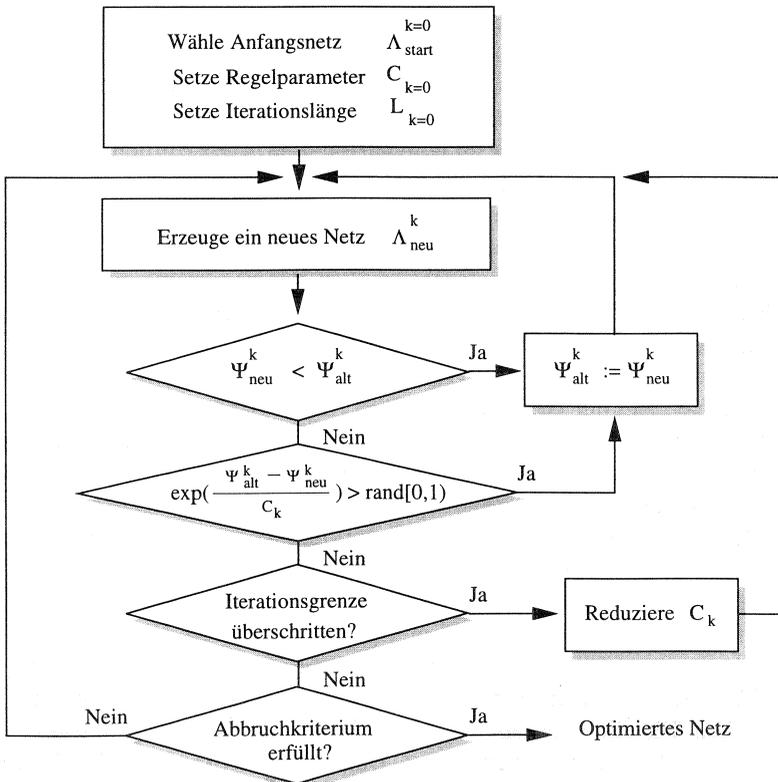


Abbildung 8.1: Ablauf von Topologieoptimierung mittels SA-Algorithmus

einen Übergang zu einer neuen Netzkonfiguration aus einer alten wird im Rahmen dieser Arbeit als Operator bezeichnet. Die Operatoren erlauben geeignete problemspezifische Änderungen zu erzeugen und dadurch günstigere Übergänge zu bevorzugen. Hiermit ist es möglich, die Iterationszeit des SA-Algorithmus zu reduzieren, wie im Abschnitt 8.8 durch Experimente gezeigt wird. Ein Übergang besteht also aus zwei Schritten: der erste Schritt ist die Erzeugung eines neuen Netzes aus einem alten Netz mittels Operatoren. Die Anwendung des Akzeptanzkriteriums stellt den zweiten Schritt dar [50, 2].

Hat ein Übergang stattgefunden, so ist die Qualität des neuen Netzes zu überprüfen. Die Qualität einer Netzlösung wird im Falle der Topologieoptimierung in dieser Arbeit mittels der Kostenfunktion ermittelt (s. Abs. 4 und 6). Ist das neue Netz billiger, so wird es als neue aktuelle Netzkonfiguration akzeptiert. Im Gegensatz zu konventionellen Algorithmen werden auch teurere Netzkonfigurationen gemäß Akzeptanzkriterien (s. Abs. 8.6) zugelassen. Die Länge einer Iterationsstufe gibt die maximale Anzahl dieser Zyklen an und wird in der  $k$ -ten Iterationsstufe mit  $L_k$  bezeichnet. Wie aus den Untersuchungen in Abs. 8.7 hervorgeht, stellen der Steuerungsparameterwert und die Iterationsstufenlänge zwei entscheidende Parameter in Bezug auf die Konvergenzgeschwindigkeit des SA-Algorithmus dar. Innerhalb eines Zyklus werden solange Operatoren eingesetzt, bis sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Bei der Realisierung eines Algorithmus werden Kompromisse eingegangen, wann man den Zyklus beenden soll, da ein langes Aufhalten innerhalb eines Zyklus den SA-Algorithmus für die Praxis ineffizient macht. Wird die Grenze  $L_k$  überschritten, so wird der Steuerungsparameterwert entsprechend dem Abkühlungsschema verkleinert und bei einem kleineren Steuerungsparameterwert mit den Netzkonfigurationsübergängen fortgesetzt. Ist das Abbruchkriterium erfüllt, so wird der Algorithmus terminiert. Die dann aktuelle Netzkonfiguration gilt als optimiertes Ergebnisnetz. Die Analogie zwischen der statistischen Physik und der Optimierung mittels eines SA-Algorithmus impliziert die Erweiterung der Ergebnisse aus der statistischen Physik auf den SA-Algorithmus. Im weiteren werden einige Erkenntnisse ohne Beweis angegeben. Der Leser wird auf die Fachliteratur, wie z.B. [67, 1], verwiesen.

- Gegeben sei das Topologieentwurfsproblem mit  $(\mathcal{S}, \Psi)$ . Nach einer genügend großen Zahl von Übergängen bei einer bestimmten Temperatur und Anwendung des Akzeptanzkriteriums nach (8.15) findet der SA-Algorithmus für das Topologieentwurfsproblem mit  $(\mathcal{S}, \Psi)$  eine Lösung  $\Lambda_i \in \mathcal{S}$  mit der Wahrscheinlichkeit:

$$\mathcal{P}_{c_k}\{\Lambda_i\} = \frac{1}{N_0(c_k)} \exp\left(-\frac{\Psi(\Lambda_i)}{c_k}\right), \quad (8.13)$$

Wobei  $N_0(c_k)$  eine Normalisierungskonstante ist:

$$N_0(c_k) = \sum_{\Lambda_j \in \mathcal{S}} \exp\left(-\frac{\Psi(\Lambda_j)}{c_k}\right). \quad (8.14)$$

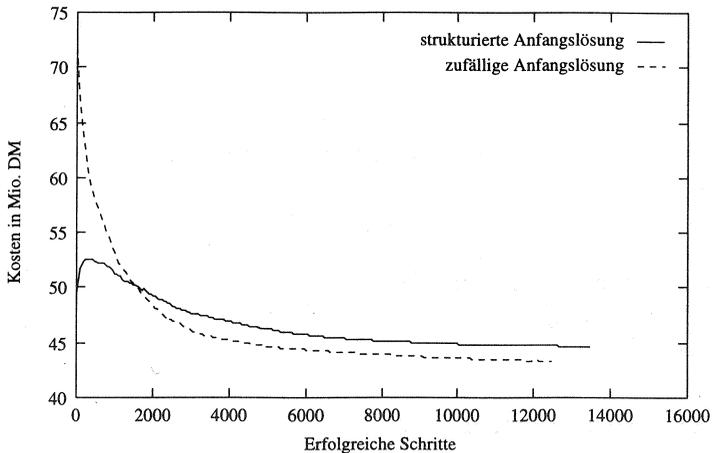


Abbildung 8.2: SA-Algorithmus und der Einfluß von Anfangsnetzlösungen

- Wird die Gleichung (8.13) bei jedem Wert des Steuerungsparameters erfüllt, so wird eine asymptotische Konvergenz des SA-Algorithmus zu der Menge der global optimalen Netze garantiert.
- die Wahrscheinlichkeit zum Auffinden eines optimalen Netzes steigt monoton mit der Reduzierung von Steuerungsparametern.

Im folgenden werden die einzelnen Phasen des SA-Algorithmus näher erläutert und auf die problembezogene Einstellung der Parameter eingegangen.

## 8.5 Initialisierungsphase

In der Initialisierungsphase des SA-Algorithmus werden eine Anfangsnetzkonfiguration, ein Anfangssteuerungsparameter und eine Anfangsiterationslänge festgelegt.

Die Anfangsnetzkonfiguration kann ein zufällig erzeugtes und gültiges Netz oder ein vorgegebenes Netz sein. Wird die Anfangsnetzkonfiguration zufällig erzeugt, so ergeben sich i.d.R. bessere Lösungen für kleine Steuerungsparameterwerte. Wie in Abbildung 8.2 dargestellt, kann eine strukturierte und nach konventionellen Methoden optimal entworfene Netzlösung noch weiter optimiert werden.

Der Anfangswert des Steuerungsparameters gibt den Zulassungsgrad für teurere Lösungen beim Start des Algorithmus an. Ist dieser Wert groß, so werden teurere Lösungen öfter akzeptiert. Bei einem kleinen Wert des Anfangssteuerungsparameters befindet sich das System in einem quasi gefrorenen Zustand, und teurere Netze werden selten akzeptiert. Diesen Sachverhalt zeigt die Abbildung 8.4.

Die Festlegung der Länge der Anfangsiterationsstufe bestimmt die Aufenthaltsdauer des Algorithmus bei dem Anfangswert des Steuerungsparameters. Diese Länge soll das Erreichen eines stabilen Gleichgewichts bei jeder Iterationsstufe ermöglichen, damit die globale Konvergenz des Algorithmus gewährleistet ist.

## 8.6 Akzeptanzkriterium

Eine charakteristische Eigenschaft des SA-Algorithmus ist, daß er neben der Annahme der kostenoptimalen Netze auch teurere Netze zu einem bestimmten Maß zuläßt. Bei hohen Werten des Steuerungsparameters  $c_k$  werden große Verschlechterungen der Netzkosten akzeptiert. Nimmt der Steuerungsparameterwert ab, so werden entsprechend immer kleinere Verschlechterungen zugelassen. Approximiert der Steuerungsparameterwert gegen Null, so werden keine Verschlechterungen mehr erlaubt. Diese Eigenschaft des SA-Algorithmus ermöglicht, im Unterschied zum Verfahren der lokalen Suche, die lokalen Suboptima zu verlassen.

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Akzeptanzkriterien sind das Metropolitkriterium und das Schwellenkriterium.

### 8.6.1 Metropolitkriterium

Es seien  $(\mathcal{S}, \Psi)$  eine Instanz des Topologieoptimierungsproblems und  $\Lambda_i$  und  $\Lambda_j$  zwei mögliche Lösungen mit den Kosten  $\Psi(\Lambda_i)$  und  $\Psi(\Lambda_j)$ . Durch das Akzeptanzkriterium wird bestimmt, ob das von  $\Lambda_i$  generierte Netz  $\Lambda_j$  angenommen wird. Die Wahrscheinlichkeit für die Annahme von  $\Lambda_j$  ist durch  $\mathcal{P}_{c_k}$  gegeben, wobei  $c_k$  den Wert des Steuerungsparameters in der  $k$ -ten Iterationsstufe angibt:

$$\mathcal{P}_{c_k} = \begin{cases} 1 & \text{wenn, } \Psi(\Lambda_j) \leq \Psi(\Lambda_i), \\ \exp \frac{\Psi(\Lambda_i) - \Psi(\Lambda_j)}{c_k} & \text{wenn, } \Psi(\Lambda_j) > \Psi(\Lambda_i). \end{cases} \quad (8.15)$$

Für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit  $\mathcal{P}_{c_k}$  im Falle der Verschlechterungen wurde eine Zufallszahl gleichverteilt aus dem Intervall  $[0, 1)$  gezogen und mit dem Wert aus  $\exp((\Psi(\Lambda_i) - \Psi(\Lambda_j))/c_k)$  verglichen. Durch Wiederholung dieser Stufe wird die thermische Bewegung der Atome eines Festkörpers in einem Heizbad bei einer Temperatur  $T$  simuliert. Die Wahrscheinlichkeit  $\mathcal{P}_{c_k}$  ermöglicht, daß das System mit der Zeit in ein System mit Boltzmannverteilung übergeht [37].

### 8.6.2 Schwellenkriterium

Das Schwellenkriterium (*Threshold Accepting, TA*) stellt eine andere Art der Akzeptanz teurerer Netzlösungen dar. Ist die neue Netzlösung billiger als die alte, so wird sie akzeptiert. Ist die neue Netzlösung teurer, wird sie nur dann akzeptiert, wenn sie unterhalb der Schwelle liegt:

$$\mathcal{P}_{c_k} = \begin{cases} 1 & \text{wenn, } \Psi(\Lambda_j) \leq \Psi(\Lambda_i), \\ \Psi(\Lambda_j) - \Psi(\Lambda_i) < c_k & \text{wenn, } \Psi(\Lambda_j) > \Psi(\Lambda_i). \end{cases} \quad (8.16)$$

Da die Schwelle hier dem Steuerungsparameter im Metropolis-kriterium entspricht, wurde  $c_k$  für ihre Bezeichnung angewandt.

In Abbildung 8.3 sind die beiden für die Topologieoptimierung untersuchten Akzeptanzkriterien gegenübergestellt. Das Schwellenkriterium liefert bei jeder Iterationsstufe bessere Lösungen als das Metropolis-kriterium. Die Qualität der durch die Anwendung der Kriterien resultierenden Endlösungen ist gleich.

## 8.7 Abkühlungsschemata

Die Abkühlungsschemata stellen die Strategien zur Verringerung des Steuerungsparameterwertes dar. Die Wahl eines geeigneten Abkühlungsschemas spielt für die Qualität der Netzergebnisse eine wichtige Rolle. Der für die Topologieoptimierung konzipierte SA-Algorithmus bedient sich der folgenden Abkühlungsschemata:

- $T_n = aT_{n-1}$ ,
- $T_n = a^n T_0$ ,
- $T_n = T_{n-1} / (1 + \frac{0.09531T_{n-1}}{3\delta})$ ,

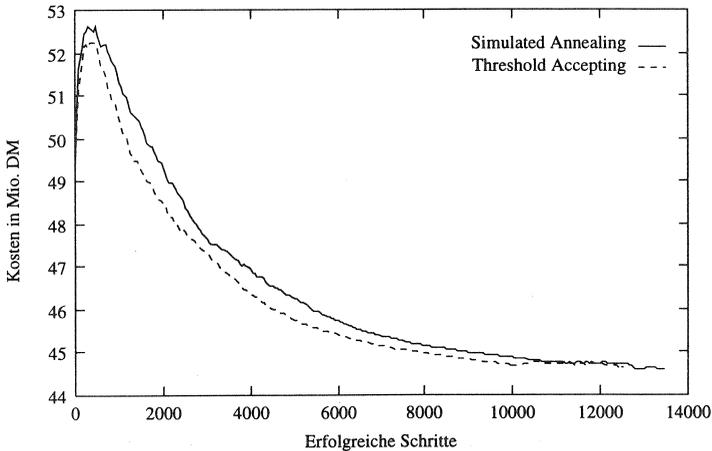


Abbildung 8.3: Verschiedene Akzeptanzstrategien

wobei der Parameter  $a$  die Abkühlgeschwindigkeit bzw. die Abnahmege-  
 schwindigkeit des Steuerungsparameterwertes angibt. Die typischen Werte  
 von  $a$  liegen in der Praxis zwischen 0,8 und 1. Der Parameter  $\delta$  gibt die  
 Standardabweichung der Kosten in jeder Iterationsstufe an.

Der Einfluß des Initialisierungswertes des Steuerungsparameters kann der  
 Abbildung 8.4 entnommen werden. Schnelle Abnahme des Steuerungspara-  
 meterwertes führt dazu, daß die lokalen Minima nicht überwunden wer-  
 den können. Ein großer Initialisierungswert verlangsamt die Konvergenzge-  
 schwindigkeit.

## 8.8 Operatoren

Der Übergang von einem alten Netz zu einem neuen Netz innerhalb eines  
 Zyklus einer Iterationsstufe geschieht mittels Perturbation der Netzkonfi-  
 gurationsvariablen. Die Regel bzw. die Vorschrift zu einer Änderung der  
 Netzkonfiguration wird in dieser Arbeit als Operator bezeichnet. Die für die  
 Topologieoptimierung entwickelten Operatoren sind  $\Omega^{\text{SA}} = \{\omega_1^{\text{SA}}, \omega_2^{\text{SA}}\}$ :

1. **Operator  $\omega_1^{\text{SA}}$ :** Bewegung der Netzknoten MUX und SW um einen zufälligen Betrag in eine zufällig gewählte Richtung.

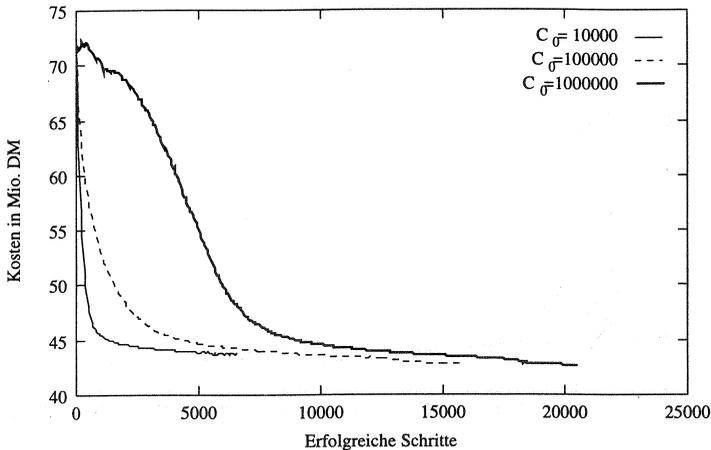


Abbildung 8.4: Einfluß des Initialisierungswertes des Steuerungsparameters

2. **Operator  $\omega_2^{SA}$ :** Wegnahme, Verschiebung und Installation von Verbindungen bzw. verketteten Verbindungen (*multi-drop*) zwischen den Knoten NT, MUX und SW.

Aufgrund der Ähnlichkeit in der Beschreibung der Arbeitsweise von SA-Operatoren zu Operatoren von Genetischen Algorithmen wird hier auf eine granulare Darstellung der Operatoren verzichtet und auf Abschnitt 9.7 verwiesen. Ein wichtiges Kriterium zum Entwurf von SA-Operatoren war der mit ihnen verbundene minimale Rechenaufwand insbesondere bei der Bewertung von Netzen. Die Änderungen durch die Operatoren sollten so konzipiert sein, daß nur eine lokale Verkehrsaufteilung auf den betroffenen Übertragungstrecken und ihre Dimensionierung notwendig sind, weil die erneute Berechnung der Wegewahl und Dimensionierung für große Netze den Rechenaufwand erhöht und die Effizienz des Algorithmus reduziert.

Um die Aufenthaltszeit bei jeder Iterationsstufe zu verkürzen bzw. die Konvergenz zu beschleunigen, wurden die zwei nicht-granular konzipierten Operatoren  $\omega_1^{SA}$  und  $\omega_2^{SA}$  auf die Netzkonfigurationen angewandt. Um die Wirkungsweise der Operatoren zu testen, wurde ihre Auftretswahrscheinlichkeit, wie in Abbildung 8.5 dargestellt, modifiziert. Die Untersuchungen zeigen, daß die geeignete Wichtung der Operatoren eine Schlüsselrolle für den Erfolg des SA-Algorithmus spielt.

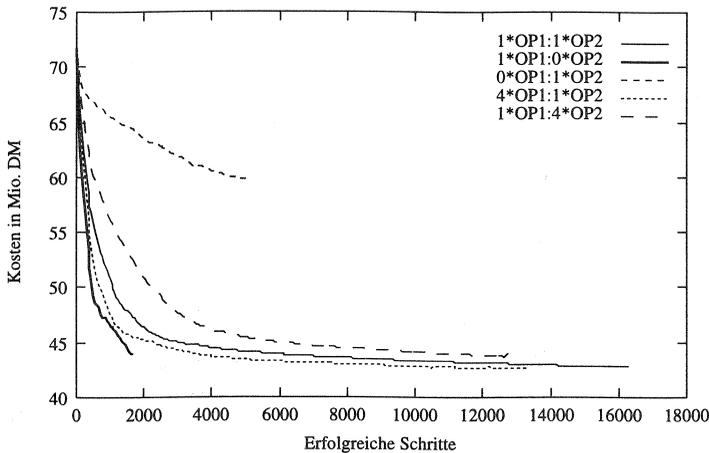


Abbildung 8.5: Geeignete Wahl der Operatorwichtungen erhöht die Konvergenzgeschwindigkeit und verbessert die Lösungsqualität

## 8.9 Abbruchkriterium

Man unterscheidet zwischen zwei Abbruchkriterien. Der erste Abbruch des SA-Algorithmus wird durch die Vorgabe der Länge jeder Iterationsstufe bzw. Anzahl der Übergänge bei jedem Wert des Steuerungsparameters bestimmt. Diese Länge soll theoretisch so gewählt werden, daß sich das System im Gleichgewichtszustand befindet (s. Gln. 8.13). In der Praxis muß man Kompromisse schließen, damit der SA-Algorithmus in akzeptabler Zeit terminiert. Das zweite Abbruchkriterium betrifft den gesamten SA-Algorithmus. Die vorgesehenen Abbruchmöglichkeiten richten sich nach der

- Qualität des Ergebnisnetzes,
- Zeitschranken,
- Erfolgsrate bzw. der Zahl zugelassener Iterationsschritte.

## 8.10 Beispielszenario SA

Zur Veranschaulichung des auf SA basierten Topologieentwurfsalgorithmus wird in diesem Abschnitt der Optimierungsprozeß anhand von exempla-

risch angegebenen Netzbildern vorgestellt. Zur Topologieoptimierung wurde ein Netz mit 200 NT-Knoten ( $N^{NT} = 200$ ) betrachtet. Zwischen den NT-Knoten als Verkehrsquellen und -senken existiert eine homogene Verkehrsbeziehung  $p_{i \leftrightarrow i'}^{NT} = 0.01$  Erlang  $\forall i, i' \in I$  (s. Abs. 6.3). Die Anschlußkapazität der zu bestimmenden MUX- und SW-Knoten wurde jeweils zu 32 und 10 gesetzt ( $N_{\max}^{NT \rightarrow MUX} = 32, N_{\max}^{MUX \rightarrow SW} = 10$ ). Die Linkblockierung von 0,1 % ( $\xi = 0,001$ ) soll auf allen Verbindungen im Netz eingehalten werden.

In der Abbildung 8.6(a) wird die Netztopologie zu Beginn der Optimierung dargestellt. Diese Netztopologie wurde zufällig erzeugt, d.h. die benötigten 7 MUX-Knoten ( $N^{MUX} = 7$ ) und 1 SW-Knoten ( $N^{SW} = 1$ ) werden zufällig in den von NT-Knoten aufgespannten Bereich plaziert. Danach werden die Knoten der benachbarten Ebenen (NT-MUX, MUX-SW) und der Backboneebene zufällig miteinander verbunden. Die Abbildungen 8.6(b), 8.6(c) und 8.6(d) repräsentieren jeweils die Netztopologie für Steuerungsparameterwerte  $c_0 = 100$ ,  $c_{11} = 87,56$  und  $c_{948} = 0,001$ . Die ungeordnete und teure Netztopologie findet im Laufe des auf SA basierendem Topologieoptimierungsalgorithmus eine geordnete Struktur, die unter hier gewählten Annahmen eine kostenoptimale Netzlösung wiedergibt. Der Initialwert des Steuerungsparameters wurde zu  $c_0 = 100$  gesetzt. Der Optimierungsprozeß wurde durch die Festlegungen einer Schwelle für den Steuerungsparameterwert terminiert ( $c = 0,001$ ).

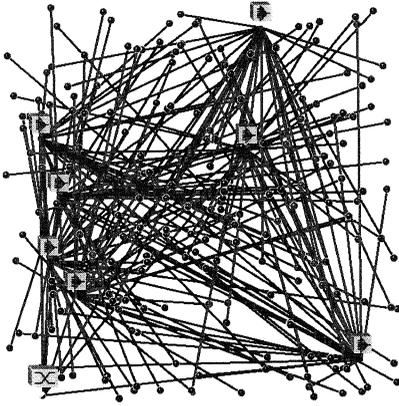
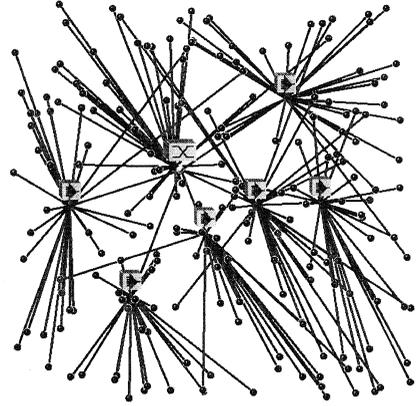
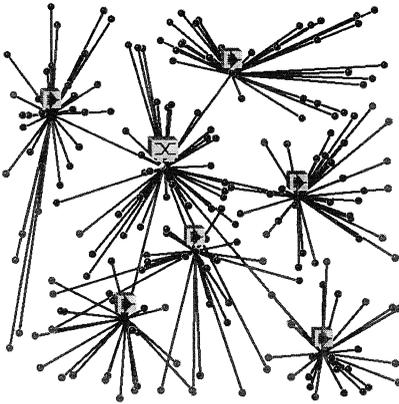
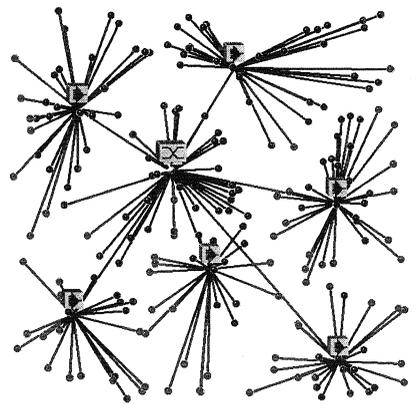
(a)  $\Psi_{\text{Initialnetz}} = 91.089.064 \text{ DM}$ (b)  $\Psi_0 = 55.308.425 \text{ DM}$ (c)  $\Psi_{11} = 49.419.266 \text{ DM}$ (d)  $\Psi_{948} = 48.105.125 \text{ DM}$ 

Abbildung 8.6: Optimierungsprozeß (a) Initial-Netztopologie; (b) optimierte Netztopologie bei  $c_0 = 100$ ; (c) optimierte Netztopologie bei  $c_{11} = 87,564$ ; (d) optimierte Netztopologie bei  $c_{948} = 0,001$

## Evolutionalgorithmen

Die Evolutionalgorithmen stellen eine weitere naturanaloge Optimierungsstrategie dar, die das Prinzip der Evolution in der Natur nachzuahmen versucht. Die Lebewesen in der Natur sind einer steten Veränderung unterworfen, die durch Wechselwirkungen zwischen einzelnen Arten und deren Anpassungsfähigkeit an ihre Umgebung vorangetrieben wird. Die Evolution ist offenbar in der Lage, durch Manipulation der Erbinformation und die damit verbundenen grundlegenden Steuerungsmechanismen selbst komplexeste Organismen und Lebensformen in relativ kurzen Zeiträumen an ihre Umwelt- und Lebensbedingungen anzupassen. Die Evolution findet in der iterativen Abfolge von Rekombination, Mutation und Selektion statt, wobei eine Tendenz zum Überleben der Stärkeren und „Besseren“ Individuen besteht<sup>1</sup>.

Der Versuch, das sehr erfolgreich in der Natur eingebettete Prinzip der Evolution für die Optimierungsaufgaben der technischen Systeme heranzuziehen, wurde erstmalig durch GOLDBERG[22], HOLLAND[28], RECHENBERG[43] und SCHWEFEL[47] eingeführt. Die Evolutionalgorithmen werden, abhängig von der Realisierung, in zwei Klassen aufgeteilt: die Genetischen Algorithmen (*Genetic Algorithms, GA*) durch HOLLAND und GOLDBERG und die Evolutionsstrategien (*Evolutionary Strategies, ES*) durch RECHENBERG und SCHWEFEL. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zwischen GA und ES ist, daß GA in der Regel mit binären Vektoren und verschiedenen Formen der Rekombinationschemata arbeitet, während ES mittels Vektoren mit reellen Werten und hauptsächlich Mutationsoperatoren realisiert wird. Für den Zweck dieser Arbeit ist diese Unterscheidung unerheblich, und deshalb werden die beiden Implementierungsvarianten unter dem Begriff Genetische Algorithmen (GA) zusammengefaßt.

---

<sup>1</sup>Die Evolution kann man also im Sinne einer Suchtechnik im durch die genetischen Informationsträger (Erbanlagen) aufgespannten Lösungsraum auffassen. Dabei werden diejenigen Erbanlagen gesucht, die ein Individuum oder eine Art befähigen, den Überlebenskampf zu gewinnen.

In diesem Kapitel werden die Genetischen Algorithmen für die Lösung der Topologieoptimierung von Telekommunikationsnetzen herangezogen. Es wird gezeigt, wie das Topologieoptimierungsproblem in eine von GA erfaßbare Form gebracht wird, und wie das Optimierungsverfahren der Natur – die Evolution – mittels problemspezifisch entworfener Operatoren und Selektionsstrategien imitiert wird [49, 51].

## 9.1 Biologischer Hintergrund

Betrachtet man die hochspezialisierten und angepaßten Lebensformen in der Natur, so erkennt man die verborgene Leistungsfähigkeit und das Potential der Evolution als Optimierungswerkzeug in der Natur<sup>2</sup>. Allgemein kann man ein Lebewesen als ein Phänotyp oder ein Genotyp betrachten. Dabei versteht man unter einem Genotyp die Summe aller in den Genen lokalisierten genetischen Information eines Organismus. Die Gene legen seinen gesamten Aufbau fest, wie Organe, Äußeres und bestimmte geistigen Fähigkeiten. Die Lebewesen beinhalten in jedem Zellkern die DNS (Desoxyribonukleinsäure), welche in codierter Form die vollständige Erbinformation (Genotyp) des Individuums enthält. Der Phänotyp ist das Erscheinungsbild eines Individuums. Der Phänotyp eines Menschen ist der Mensch selbst, wie er sich uns darstellt [26]. Im Prozeß der Evolution gibt ein Individuum seine genetische Information durch die Gene an seine Nachkommen weiter. Sind die Nachkommen an die Umweltbedingungen angepaßt, so haben sie größere Chancen – und dementsprechend auch ihre Erbinformation – in der nächsten Generation präsent zu sein. Die an die Umwelt schlecht angepaßten Individuen sterben langsam aus und somit treten ihre Erbinformationen weniger häufig in den nächsten Generationen auf. Die Evolution bedient sich der genetischen Operatoren, wie Mutation und Rekombination, um die Anpassung möglichst schnell voranzutreiben<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup>Als Beispiel sei auf die genetische Information des Menschen hingewiesen. Beschreibt man den Suchraum, den die Evolution zur Adaption der Individuen nach optimalen Lösungen durchsuchen muß, durch einen diskreten Raum, so ergibt sich nach RECHENBERG[43]  $4^{3.000.000.000}$  mögliche Kombinationen von im menschlichen Chromosom vorkommenden Nukleotidbasen (ca.  $3 \cdot 10^9$ ). Da sich die Evolution als Optimierungsverfahren in der Natur in so einem gigantischen Lösungsraum zurechtfindet, liegt der Schluß nahe, daß sie auch im technischen Bereich erfolgreich sein muß.

<sup>3</sup>In der Tat sind auch die Operatoren während der vier Milliarden Jahre dauernden Evolution des Lebens auf der Erde optimiert worden.

Die der Evolution unterliegenden Mechanismen sind noch nicht ganz erforscht. Die Beschreibung der Einzelheiten aus der Evolutionstheorie – obwohl faszinierend – ist für den Zweck dieser Arbeit nicht relevant. Der Leser wird auf die folgenden aus der Evolutionstheorie bekannten und für die Entwicklung der Genetischen Algorithmen relevanten Eigenschaften aufmerksam gemacht [12]:

- der Evolutionsprozeß wirkt auf codierte Repräsentation der Individuen (Chromosomen) statt auf die Individuen selbst.
- die natürliche Selektion sorgt für den Erhalt der Individuen mit optimalen und Erfolg erbringenden Chromosomen in den nächsten Generationen.
- die treibende Kraft der Evolution ist die Reproduktion der Individuen. Die Mutation und Rekombination der Chromosomen ermöglichen, daß sich die Chromosomen der Nachkommen und der Eltern unterscheiden.
- die biologische Evolution ist gedächtnislos. Die gesamte ihr zur Verfügung stehende Information setzt sich aus der Menge der Chromosomen der Population zusammen.

## 9.2 Beschreibung des GA-Algorithmus

Die Genetischen Algorithmen als zufallsgesteuerte Optimierungsalgorithmen werden dadurch charakterisiert, daß eine Anzahl  $N$  der potentiellen Lösungen (die Individuen  $\Lambda_i \in \mathcal{S}$ ) quasi gleichzeitig den Lösungsraum  $\mathcal{S}$  abtasten. Die  $k$ -te Population bzw. Generation der Individuen ist dann durch die Menge  $\mathbb{P}_k = \{\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_N\}$  beschrieben. Der Phänotyp eines Telekommunikationsnetzes wird zum Zwecke der Topologieoptimierung auf die wichtigsten gesuchten Größen des Netzes, d.h. den Genotypen des Netzes wie folgt transformiert:

$$\Lambda_i = \begin{cases} \Xi^{\text{MUX}} & = ((x_1^{\text{MUX}}, y_1^{\text{MUX}}), \dots, (x_{N^{\text{MUX}}}^{\text{MUX}}, y_{N^{\text{MUX}}}^{\text{MUX}})), \\ \Xi^{\text{SW}} & = ((x_1^{\text{SW}}, y_1^{\text{SW}}), \dots, (x_{N^{\text{SW}}}^{\text{SW}}, y_{N^{\text{SW}}}^{\text{SW}})), \\ N^{\text{MUX}} & = \left[ \frac{N^{\text{NT}}}{N_{\text{max}}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}}} \right] + \alpha, \\ N^{\text{SW}} & = \left[ \frac{N^{\text{MUX}}}{N_{\text{max}}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}}} \right] + \beta, \\ \Gamma^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}} & = (L_{11}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}}, \dots, L_{N^{\text{NT}} N^{\text{MUX}}}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}}), \\ \Gamma^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}} & = (L_{11}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}}, \dots, L_{N^{\text{MUX}} N^{\text{SW}}}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}}). \end{cases} \quad (9.1)$$

Der Genotyp  $\Lambda$  entspricht der für den SA-Algorithmus verwendeten Netzkonfiguration aus dem Abs. 8.3. Die Menge der Gene  $\mathbb{G} = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$  setzt sich aus den  $n$  codierten Variablen des Genotyps zusammen. Ein Gen wäre z.B. das Koordinatenpaar der  $i$ -ten Vermittlungsstelle  $(x_i^{\text{SW}}, y_i^{\text{SW}})$  mit einer aus reellen Zahlen zugeordneten Wertemenge für  $x_i^{\text{SW}}$  und  $y_i^{\text{SW}}$ . Faßt man die Gene in Gruppen zusammen, so spricht man von Chromosomen bzw. dem Chromosomensatz. Die Wertemengen der obigen Gene sind:

$$x_i^{\text{MUX}}, y_i^{\text{MUX}} \in \mathbb{R}, \quad 1 < i < N^{\text{MUX}}, \quad (9.2)$$

$$x_i^{\text{SW}}, y_i^{\text{SW}} \in \mathbb{R}, \quad 1 < i < N^{\text{SW}}, \quad (9.3)$$

$$L_{mm'}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}} = \{0, 1\} \quad \forall m \in I, \forall m' \in J, \quad (9.4)$$

$$L_{mm'}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}} = \{0, 1\} \quad \forall m \in J, \forall m' \in K, \quad (9.5)$$

$$L_{mm'}^{\text{SW} \rightarrow \text{SW}} = \{0, 1\} \quad \forall m, m' \in K. \quad (9.6)$$

Die konkrete Belegung eines Gens wird Allel genannt. Kennzeichnet man die Menge der Allele mit  $\mathbb{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_l\}$ , so kann man durch die Abbildung (9.7) jeder Genposition eindeutig ein Allel zuordnen.

$$\forall g_j \in \Lambda_i : \lambda : \mathbb{G} \mapsto \mathbb{A} \quad (9.7)$$

Eine Instanz läßt sich dann beschreiben durch:

$$\Lambda_i = (\lambda(g_1), \lambda(g_2), \dots, \lambda(g_n)) \quad (9.8)$$

Eine der wichtigsten Stufen der Anwendung der Genetischen Algorithmen auf ein bestimmtes Problem ist die Auswahl einer geeigneten Codierung. Entwirft man eine ungünstige Codierung, so wird die Leistungsfähigkeit des Algorithmus oder die Realisierbarkeit beeinträchtigt. Nachdem ein Netz in codierter Form vorliegt, wird die Anfangspopulation initiiert  $\mathbb{P}_1 = \{\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_n\}$  (s. Abb. 9.1).

Die Initiierung wird in der Regel durch zufällige Konkretisierung der Gene aus ihrer zulässigen Wertemenge vollzogen. Die Menge der genetischen Operatoren  $\Omega^{\text{GA}}$  bietet die Regeln für die Erzeugung der Nachkommen. Abhängig vom Operatortyp  $\omega_i^{\text{GA}} \in \Omega^{\text{GA}}$  werden die Eigenschaften der Elternnetze mehr oder weniger auf die Kindernetze übertragen. Wie in der Natur wirken die Operatoren auch auf die codierte Repräsentation der Netze und nicht auf die Netze selbst. Die Entwicklung effizienter Operatoren beeinflusst im großen Maße die Konvergenz und damit den Erfolg des Genetischen Algorithmus. Die Qualität der Netze in der zusammengesetzten

Population bestehend aus Eltern und Kindern – auch Genpool genannt – wird durch die Kostenfunktion  $\Psi$  (s. Abs. 6.3) bewertet. Eine neue Population  $\mathbb{G}_{i+1}$  wird von einer alten Population  $\mathbb{G}_i$ , abhängig von ihrer Qualität, durch Selektion der Netze gebildet. Je höher die Bewertung eines Netzes ist, desto größer ist die Chance in den nächsten Generationen beteiligt zu sein. Auf diesem Weg liefert die Selektion wie in der Natur den notwendigen Steuerungsmechanismus zum Überleben der besseren Netzlösungen. Dieser Zyklus wird solange aufrechterhalten, bis die Terminierungsbedingungen erfüllt sind. Eine Terminierungsbedingung ist z.B., daß die Generationenzahl eine vorgeschriebene Zahl überschritten hat oder, daß die Qualität der Netze in einer Generation eine vorgeschriebene Güte erreicht hat.

Im folgenden wird auf die einzelnen Stufen des Genetischen Algorithmus näher eingegangen. Dabei wird gezeigt, wie das Topologieoptimierungsproblem durch Auswahl geeigneter Codierung, Entwurf und Entwicklung von effizienten Operatoren und schließlich durch die Selektionsmechanismen in der Art und Weise gelöst werden kann, wie die Natur es seit vier Milliarden Jahren tut.

### 9.3 Codierungsmechanismus

Unter Codierung versteht man im Rahmen der Evolutionsalgorithmen eine bijektive Abbildung<sup>4</sup>  $\zeta : \mathcal{S} \mapsto \mathcal{G}$  des Lösungsraumes  $\mathcal{S}$  (Phänotypenraum) auf den Genotypenraum  $\mathcal{G}$ . Die Abbildung  $\zeta$  stellt eine Verbindungsbrücke zwischen dem zu lösenden Problem und dem Evolutionsalgorithmus dar. Die Konstruktion dieser Abbildung bestimmt den Erfolg der Evolutionsalgorithmen bei der Anwendung auf ein Problem. Dabei soll die codierte Repräsentation die gesuchten Größen und damit das Problem umfassen. Die Codierung und Decodierung soll mit möglichst minimalem Aufwand durchgeführt werden können. Die Unabhängigkeit der codierten Informationen muß im großen Maße gewährleistet sein, da die mit dem Chromosomensatz verbundene Semantik den Evolutionsalgorithmen verborgen bleibt.

---

<sup>4</sup>Die Bijektivität der Abbildung ist erforderlich, da mit der codierten Repräsentation der Lösungen die Möglichkeit der Abtastung jeder Lösung im Lösungsraum gegeben sein muß. Man spricht von einer nicht-injektiven, surjektiven Abbildung, wenn von mehreren Codes ein Element von  $\mathcal{S}$  erreicht werden kann [44].

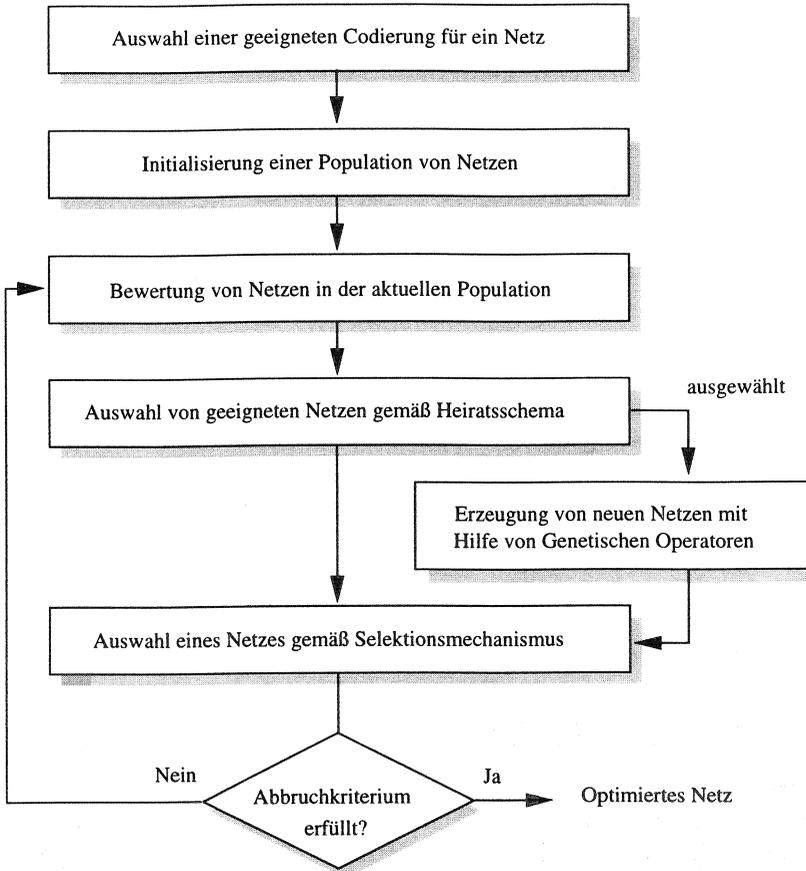


Abbildung 9.1: Beschreibung des Genetischen Algorithmus

### 9.3.1 Codierungsarten

Man kann abhängig von der Struktur der Lösungen eines Problems im voraus Entscheidungen bzgl. der Auswahl einer Codierungsart treffen. Die im Falle der Topologieoptimierung unter Berücksichtigung der Netzrepräsentation  $\Lambda$  (s. Gln. (9.1)) gegebenen Möglichkeiten sind:

- **Binäre Codierung:** Werden die Allele aller Gene  $\mathbb{G}$  aus der Menge  $\mathbb{A} = \{0, 1\}$  entnommen, so spricht man von einer binären Codierung. Die binären Chromosomensätze – auch Bitstrings genannt – sind kennzeichnend für die Implementierung der Genetischen Algorithmen nach HOLLAND. Man könnte z.B. die Existenz einer Verbindung zwischen den Knoten – eine Netzeigenschaft – binär codieren, wie z.B.  $\Gamma^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}} = (0; 1; 1; \dots; 1; 0; 0)$  (s. Gln. (9.1)). Eine ausschließlich binäre Codierung eines Telekommunikationsnetzes ist zwar möglich, aber nicht vertretbar, da nicht-binäre Netzeigenschaften vorhanden sind. Eine binäre Codierung im Falle des Topologieoptimierungsproblems würde den Aufwand für Codierung und Decodierung erhöhen und sich als Flaschenhals des Algorithmus insbesondere bei der Bewertung herausstellen.
- **Reelle Codierung:** Erweitert man die zugelassenen Werte für die Allele aller Gene  $\mathbb{G}$  auf die Menge der reellen Zahlen, d.h.  $\mathbb{A} = \{a | a \in \mathbb{R}\}$ , so spricht man von einer reellen Codierung. Ein Beispiel für reelle Codierung ist der Koordinaten Vektor  $\Xi^{\text{MUX}} = (2, 4; 5, 7; 300; 298, 40; \dots; 150; 100, 345)$  (s. auch Gln. (9.1)). Analog zu der rein binären Codierung des Topologieoptimierungsproblems würde sich eine rein reelle Codierung als ineffizient erweisen, da auch nicht-reelle Netzeigenschaften vorhanden sind.
- **Hybride Codierung:** umfaßt die Vorteile der homogenen Codierungen und vermeidet z.T. ihre Nachteile. So ist man in der Lage eine problemgerechte Codierung zu konstruieren, die angemessen die Problemeigenschaften wiedergibt. Dabei soll nicht unberücksichtigt bleiben, daß man entsprechend neue Operatoren entwerfen soll, die von den homogenen Codierungen nicht mehr verwandt werden können [13, 57].

Wird eine optimale Lösung zu einer Teilaufgabe des globalen Topologieoptimierungsproblems (s. Abs. 6.3) gesucht, wie z.B. Topologieentwurf des Backbonenetzes, so ist durchaus die Anwendung einer homogenen Codierung angebracht, wie z.B. in Abb. 9.3 dargestellte Codierung B.

### 9.3.2 Codierung eines Telekommunikationsnetzes

Im folgenden werden die zwei entwickelten Codierungen zur Anwendung der Evolutionsalgorithmen auf das Topologieoptimierungsproblem vorgestellt. Dabei erlaubt die erste Codierung (A) eine Anwendung der Evolutionstrategie und berücksichtigt das ganze Netz. Während die zweite Codierung (B)

mehr für den Einsatz durch Genetische Algorithmen geeignet ist und nur einen Teilaspekt des Topologieoptimierungsproblems wiedergibt.

### Codierung A

Für die Codierung des gesamten Netzes wurde eine hybride Codierung gewählt. Diese Codierung besteht aus einem Chromosomensatz, der sich aus sieben Chromosomen zusammensetzt (s. Abb. 9.2). Die Chromosomen 1 und 2 ergeben eine reelle Codierung des Koordinatenvektors  $\Xi^{\text{MUX}}$ . Die Länge dieser Chromosomen entspricht der max. Anzahl der Multiplexerknoten  $N^{\text{MUX}}$  im Netz. Jede Position der Chromosomen ist einem bestimmten MUX-Knoten zugeordnet. Analog hierzu codieren die Chromosomen 3 und 4 die Orte der Vermittlungsstellen im Netz, d.h. den Koordinatenvektor  $\Xi^{\text{SW}}$ , wobei die Länge des reellwertigen Feldes der Anzahl der SW-Knoten im Netz  $N^{\text{SW}}$  entspricht.

Um die Verbindungen zwischen den Knoten NT und MUX zu codieren, wird ein Feld von der Länge  $N^{\text{NT}}$  reserviert (Chromosom 5). Jede Position des Feldes entspricht einem NT-Knoten. Existiert z.B. eine Verbindung zwischen den NT-Knoten 6 und MUX-Knoten 3, so wird an sechster Stelle des Feldes die Zahl 3 eingetragen. Analog hierzu wird durch das Chromosom 6 die Verbindungen zwischen den MUX- und SW-Knoten im Netz codiert.

Schließlich codiert das Chromosom 7 die Verbindungen zwischen den Vermittlungsstellen im Backboneznetz gemäß der binären Codierung. Die Länge des hierfür benötigten Feldes ist:  $N^{\text{SW}} * N^{\text{SW}}$ . Es wird die Existenz einer Verbindung von jedem SW zu jedem SW binär codiert. Die Positionen 1 bis  $N^{\text{SW}}$  des Feldes sind dem ersten SW, die Position  $N^{\text{SW}} + 1$  bis  $2N^{\text{SW}}$  dem zweiten SW usw. zugeordnet.

### Codierung B

Um die Struktur der Verbindungen im Backboneznetz eines Telekommunikationsnetzes mit Hilfe der Genetischen Algorithmen zu optimieren, eignet sich die in Abbildung 9.3 dargestellte Codierung. Dabei stellen die Verkehrsbeziehungen zwischen den Knoten auf der Multiplexerebene die zu codierenden Netzeigenschaften dar. Jede Verkehrsbeziehung wird durch eine Kette von Knoten von der Quelle des Verkehrs (ein MUX-Knoten) zur Senke des Verkehrs (ein MUX-Knoten) über Vermittlungsknoten (SW-Knoten) angegeben und durch ein Chromosom repräsentiert. Die Länge eines Chro-

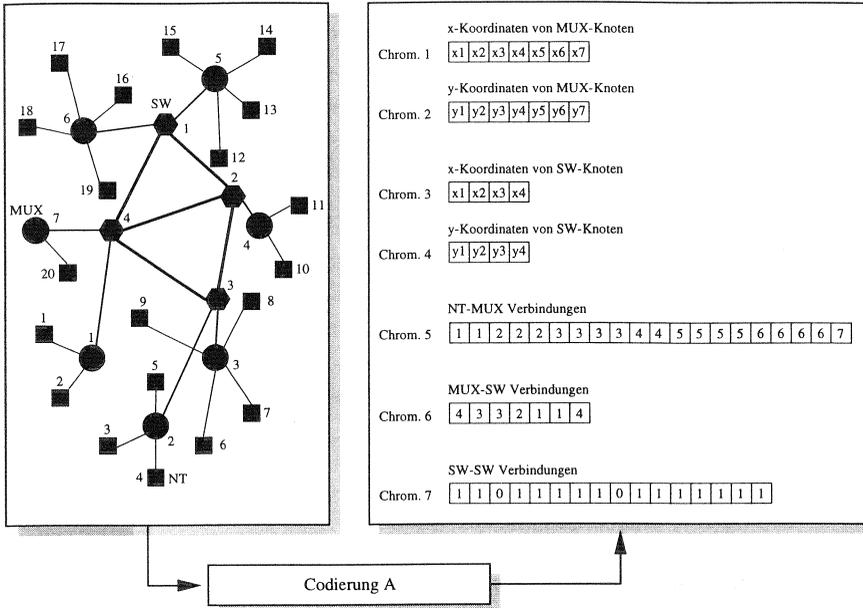


Abbildung 9.2: Schematische Darstellung von Codierung A

mosoms  $l_c = h + 2$  wird durch die Anzahl der Hops  $1 < h < h_{max}$  zwischen der Quelle und Senke des Verkehrs festgelegt ( $h_{max}$ : maximal mögliche Anzahl der Hops). Der Chromosomensatz entspricht dann den codierten Verkehrsbeziehungen zwischen den Multiplexern über die Vermittlungsknoten im Backbonenetz.

### 9.4 Initialisierungstechnik

In der Initialisierungsphase wird die erste Generation  $G_1$  der Lösungen des Problems zusammengesetzt. Im Falle des Topologieoptimierungsproblems werden die einzelnen Gene der Codierung mit durch Zufall gewählten Werten aus ihrer Wertemenge belegt. So wird die simulierte Evolution mit Netzen beginnen, die sich an ihre Umgebung, d.h. die Kostenfunktion noch nicht angepaßt haben. Man hofft dabei, daß die codierten Informationen, die zur Optimalität der Netze beitragen könnten, von Anfang an berücksichtigt wer-

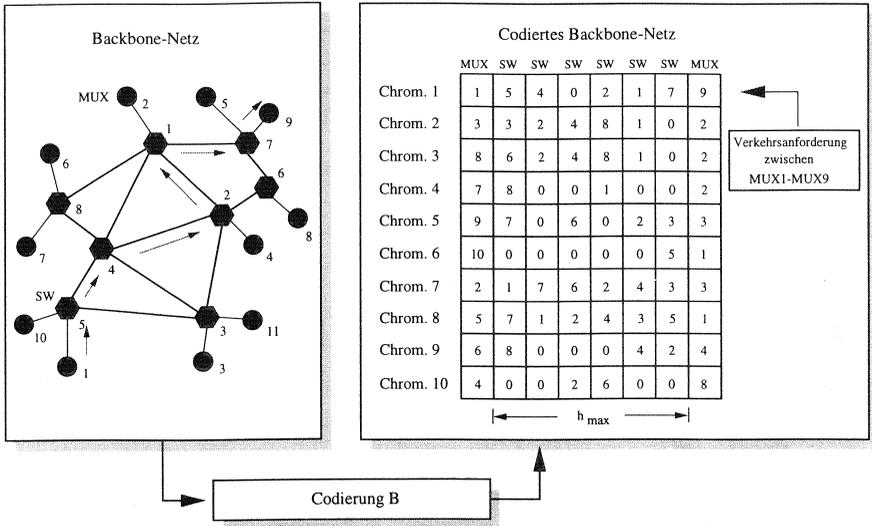


Abbildung 9.3: Schematische Darstellung von Codierung B

den. Hierdurch erreicht man, daß die Evolutionsbandbreite nicht zu schmal gewählt wird, was die Ursache für den Verlust genetischer Informationen und dementsprechenden Verlusten an Qualität der Lösungen des genetischen Algorithmus sein kann. Es ist zu berücksichtigen, daß die Qualität und Effizienz der zu entwickelnden Genetischen Operatoren, Heiratschemata und Selektionsmechanismen (s. Abs. 9.6, 9.7 und 9.8) der Verengung der Evolutionsbandbreite entgegen wirken kann.

Abbildung 9.4 zeigt Topologieoptimierungsprozesse nach Codierung A, deren erste Generation mit unterschiedlichen Zufallszahlen initialisiert worden sind. Die charakteristische Eigenschaft aller dargestellten Optimierungsprozesse ist die Konvergenz zum gleichen Endwert. Sind einige codierte Strukturen bekannt, die für den Erfolg der decodierten Netze sorgen, dann ist es ratsam die erste Generation bevorzugt mit dieser Struktur zu besetzen. So ist es möglich, die Konvergenz des Genetischen Algorithmus zu beschleunigen.

Der Genetische Algorithmus nach Codierung B initialisiert die erste Generation von  $2N$  codierten Netzen mit zufälligen Werten, wobei  $N$  die Popula-

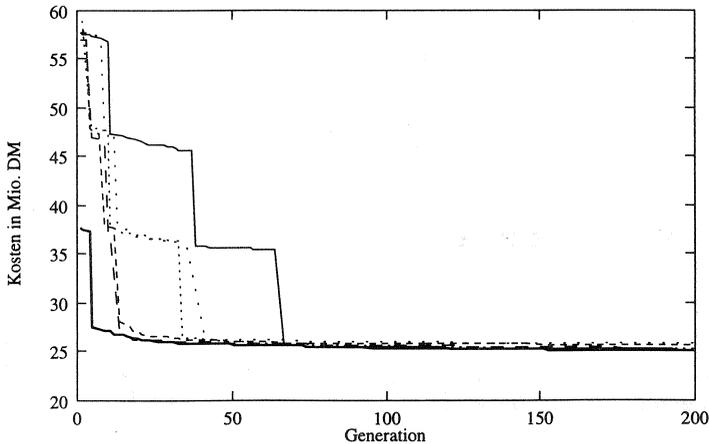


Abbildung 9.4: Topologieoptimierungsprozesse mit unterschiedlichen Initialisierungen

tionsgröße der Eltern angibt. In jeder Generation werden zwei Populationen aufbewahrt. Die erste Population (Elternpopulation) wird dann zur Reproduktion benutzt, und die neu erzeugten Netze ersetzen dann die zweite Population (Kinderpopulation) in der aktuellen Generation.

## 9.5 Bewertungsfunktion

Ähnlich wie die Codierung spannt auch die Bewertungsfunktion eine Brücke zwischen einem Genetischen Algorithmus und dem zu lösenden Problem. Die Rolle der Bewertungsfunktion bei der simulierten Evolution ist mit der Rolle der Umwelt eines Individuums in der Natur gleichzusetzen. Während die Wechselwirkungen der Individuen in der Natur ein Maß für ihre Eignung zur Existenz und Fortpflanzung angibt, wird durch die Bewertungsfunktion die Eignung eines Individuums bzw. eines Netzes für das Überleben in den nächsten Generationen festgelegt.

Die in Abschnitt 6.3 angegebene Kostenfunktion fungiert als die Bewertungsfunktion für das Topologieoptimierungsproblem. Es werden die Gesamtkosten des Netzes aus den Knotenkosten und Verbindungskosten ermittelt. Nachdem die Topologie eines Netzes vorliegt, d.h. nach Decodieren

eines Chromosomensatzes, werden die Verkehrsbeziehungen entsprechend der Wegewahlstrategie über das Netz geleitet. Sind die Verkehrsflüsse auf den Verbindungen bekannt, so kann man diesen Verbindungsstrecken gemäß der einzuhaltenden Blockierungen geeignete Leitungstypen zuordnen.

## 9.6 Heiratsschemata

Die nächste Stufe im Prozeß der simulierten Evolution wird mit Heiratsschemata bezeichnet. Darunter versteht man die Mechanismen für die Auswahl der „heiratswilligen“ Eltern, die dann durch Rekombinationsprozesse Nachkommen erzeugen. Beispiele für die Heiratsschemata sind:

- **Zufallsauswahl:** beschreibt einen Auswahlmechanismus, der die für die Fortpflanzung benötigten Individuen zufällig auswählt und ihre Bewertung nicht als Kriterium einbezieht. Dieser Mechanismus ist schnell, sorgt aber nicht für die Übertragung von guten Netzeigenschaften an die nächsten Generationen.
- **Eliteauswahl:** liegt vor, wenn nur die  $n$  Besten – die Elite – einer Elterngeneration für den Rekombinationsprozeß zugelassen werden. Die verborgene Gefahr bei der Eliteauswahl besteht darin, daß gute Netzeigenschaften in teuer bewerteten Netzen verloren gehen können.
- **Roulette-Wheel-Auswahl:** erlaubt alle Netze mit einer ihrer Bewertung proportionalen Wahrscheinlichkeit am Rekombinationsprozeß zu beteiligen. Mit diesem Mechanismus, der sich als eine Vereinigung der vorhin genannten Heiratsschemata auffassen läßt, wird für den Erhalt der guten Netzinformationen in jeder Generation gesorgt.

Der auf der Codierung A basierte Genetische Algorithmus benutzt eine modifizierte Zufallsauswahl als Heiratsschema, da die verwendeten Operatoren ausschließlich Mutationsoperatoren sind und nur ein Elternteil zur Reproduktion der Nachkommen benötigt wird.

Die zur Reproduktion nach Codierung B geeigneten Netze werden ausgewählt, indem die Netze in der aktuellen Generation (Elternpopulation + Kinderpopulation) entsprechend ihrer Bewertung sortiert werden. Die Netze der Elternpopulation sind dann Kandidaten für die Reproduktion.

## 9.7 Genetische Operatoren

Die gemäß eines Heiratsschemas ausgewählten Netze werden durch die Genetischen Operatoren manipuliert. Unter Genetischen Operatoren werden in dieser Arbeit spezielle Techniken zur Erzeugung von Nachkommen verstanden, die sich von ihren Eltern unterscheiden. Diese generelle Definition umfaßt jede erlaubte Veränderung der Allele eines Chromosomensatzes. Erbt ein Netz die Chromosomenabschnitte seiner Eltern, so spricht man von einem Prozeß der Rekombination. Ist dagegen von einem Elternteil durch Manipulation der Gene ein Nachkomme entstanden, wird dieser Prozeß Mutation genannt. Auf diese Weise kann man Operatoren grob in mutative und rekombinative kategorisieren. Im folgenden werden einige allgemeine und aus der simulierten Evolution bekannte Operatoren und die speziell für die Topologieoptimierung entwickelten Operatoren vorgestellt.

- **Punktmutation:** Werden die Allele eines Chromosomensatzes punktuell verändert, so liegt ein Punktmutationsoperator vor. Als Beispiel sei die Änderung der x-Koordinate des  $a$ -ten MUX-Knotens in Chromosom 1 der Codierung  $A$  (s. Abb. 9.2) erwähnt, wobei  $a$  aus dem Intervall  $[1, N^{\text{MUX}}]$  zu wählen ist.
- **Nicht-Punktmutation:** Sind statt punktuellen Änderungen eine kontinuierliche Folge von Allelenänderungen im Chromosomensatz zu beobachten, so spricht man von Nicht-Punktmutation. Als Beispiel sei die Änderung der x-Koordinaten mehrerer benachbarter MUX-Knoten in Chromosom 1 der Codierung  $A$  genannt.
- **Normalverteilte Mutation:** Gehorchen die Änderungen eines Allels einer Normalverteilung statt einer Gleichverteilung, so liegt normalverteilte Mutation vor. Dieser Mutationsoperator bevorzugt kleine Änderungen um das Allel und dämpft die großen Sprünge im Genotypenraum  $\mathcal{G}$ . Um eine Steuerung der Sprünge im Genotypenraum  $\mathcal{G}$  zu erlauben, wurde die Mutationsschrittweite eingeführt. Der Wert der Mutationsschrittweite entspricht dem Streuwert der die Mutation steuernden Normalverteilung und kann während der simulierten Evolution variiert werden. Wählt man am Anfang der simulierten Evolution eine große Mutationsschrittweite, so kann man den Grad der genetischen Vielfalt am Anfang erhöhen. Mit dem Fortlauf des Algorithmus, wenn die großen Änderungen störend wirken, wird die Mutationsschrittweite verkleinert. Der Übergang von der festen bzw. zeit-

weise festen Schrittweite zu einer adaptiven Schrittweitensteuerung<sup>5</sup> wird dadurch erreicht, daß man die Schrittweite von dem jeweiligen Erfolg oder Mißerfolg der Suche im Genotypenraum abhängig macht. Hiermit wird erreicht, möglichst schnell an das Optimum zu kommen. Dieser Mutationsoperator ist für die Evolutionsstrategien nach RECHENBERG und SCHWEFEL charakteristisch [26].

- **Einpunkt-Crossover:** Zur Klasse der rekombinativen Operatoren gehört der naturverwandte Operator Einpunkt-Crossover (*one-point-crossover*). Dabei werden im Gegensatz zu den mutativen Operatoren die beiden Elternteile benötigt. Es wird zufällig eine Stelle  $d$  auf den Chromosomen der Eltern markiert. Durch einen Kopiervorgang werden dann die Nachkommen erzeugt. Dabei erbt der erste Nachkomme den ersten Teil seines Chromosoms (bis zur  $d$ -ten Stelle) vom ersten Elternteil und den zweiten Teil seines Chromosoms (ab der  $(d+1)$ -ten Stelle) von dem anderen Elternteil. Da die rekombinativen Operatoren charakteristisch für die Genetischen Algorithmen sind, wird zur Veranschaulichung der Wirkungsweise dieses Operators die Codierung B in Abb. 9.3.2 verwendet. Dabei werden, wie in Abb. 9.5 dargestellt, die Chromosomen eines Elternteils bis zum  $d$ -ten Chromosom<sup>6</sup> ( $1 < d < l_c$ ) in den Chromosomensatz des ersten Nachkommens kopiert. Den Rest des Chromosomensatzes, d.h. die Chromosomen  $d+1$  bis  $l_c$ , erbt das Nachkommennetz von dem zweiten Elternteil. Analog hierzu könnte man ein zweites Nachkommennetz erzeugen, indem man die Reihenfolge der Erbung von Elternteilen vertauscht.
- **N-Punkt-Crossover:** Markiert man, statt einer Stelle  $d$ ,  $n$  zufällige Stellen  $(d_1, d_2, \dots, d_n)$  auf einem Chromosom, so liegt der Operator N-Punkt-Crossover (*n-point-crossover*) vor. Es ist theoretisch denkbar,  $2^n - 2$  von dem Elternpaar unterschiedliche Nachkommen zu erzeugen. So ist der Grad der Vermischung der Allele beider Elternteile in einem Nachkomme im Rahmen steuerbar.

<sup>5</sup>Eine Heuristik zur Anpassung der Mutationsschrittweite ist die berühmte 1/5-Erfolgsregel von RECHENBERG. Sie besagt: „Der Quotient aus den erfolgreichen Mutationen zu allen Mutationen sollte mindestens 1/5 betragen. Ist der Quotient größer als 1/5, so sollte die Streuung der Mutationen erhöht werden; ist der Quotient geringer, so sollte die Streuung verringert werden.“

<sup>6</sup>Die Wahl des Markierungspunktes am Anfang eines Chromosomen im Chromosomensatz ist bei dieser speziellen Codierung B notwendig, da sonst das Flußkonservationsgesetz im Netz verletzt wird, wenn nur Teile der Verkehrsbeziehungen als Netzeigenschaft vererbt werden.

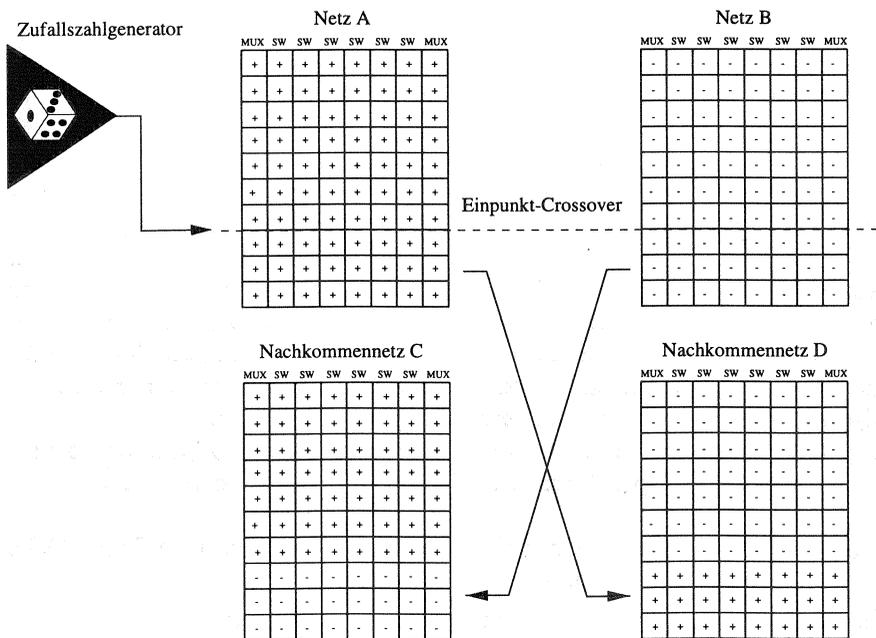


Abbildung 9.5: Schematische Darstellung von Einpunkt-Crossover

- Arithmetisches Crossover:** beschreibt einen Operator, der das  $i$ -te Gen eines Nachkommens durch die Bildung vom arithmetischen Mittel der  $i$ -ten Gene aller Elternchromosomen ermittelt. Ist die Beschaffenheit der Codierung derart, daß man eine gute Lösung durch das gesamte Elternchromosom erreichen kann, während kleine Abweichungen der Genwerte erlaubt sind, so ist der Operator „Arithmetisches Crossover“ eine gute Wahl.

Die Untersuchungen mit den aus der Literatur bekannten und oben vorgestellten Operatoren zeigten, daß für die Codierung A die mutativen Operatoren am besten geeignet sind. Außerdem wurde festgestellt, daß eine rein zufällige Änderung der Allele in einem Chromosomensatz, wenn nicht zu Ungültigkeit der resultierenden Netzlösungen führt, so in aller Regel jedoch ein schlechteres Netz als die Elternnetze liefert. Aus diesem Grund ist erforderlich, die mutativen Operatoren an der Struktur der Codierung

und Rahmenbedingungen des zu lösenden Problems zu orientieren. Die für die Topologieoptimierung eines Telekommunikationsnetzes entwickelten und auf die Codierung A wirkenden Operatoren werden in zwei Klassen kontextbezogene und problemorientierte Mutationsoperatoren eingeteilt. Die kontextbezogenen Mutationsoperatoren werden unter Berücksichtigung des Chromosom-Kontextes entworfen, wie z.B. die Kenntnis, daß eine Verschiebung eines Knotens mit Änderung zweier Genwerte – zuständig für die x- und y-Koordinaten eines Knotens – im Chromosomensatz verbunden ist. Die problemorientierten Operatoren werden unter Berücksichtigung der vorliegenden Problematik und Rahmenbedingungen entworfen, wie z.B. der Struktur der Bewertungsfunktion und ihrem Einfluß auf die Netztopologie. Sind z.B. lange Verbindungen teuer, so versucht ein problemorientierter Mutationsoperator die langen Verbindungen zu verkürzen.

Zur mathematischen Beschreibung der für das Topologieoptimierungsproblem entwickelten Operatoren wird die folgende Notation verwendet:

$\vec{r}_{\text{NODE},m}(p_i)$ :	Ortsvektor des $m$ -ten Knotens vom Typ NODE in der Population $p_i$ ;
$\Delta\vec{r}$ :	Differenz zweier Ortsvektoren;
ZV(GL, MIN, MAX):	gleichverteilte Zufallsvariable im Bereich zwischen MIN und MAX;
ZV(NORM, $m, \sigma$ ):	normalverteilte Zufallsvariable mit dem Mittelwert $m$ und der Streuung $\sigma$ ;
ZV(NEG, $m$ ):	negativ exponentielle Verteilung einer Zufallsvariablen mit dem Mittelwert $m$ im Bereich $[0, \infty)$ ;
ZV(DIS, $\{a, P(a)\}$ ):	diskrete Verteilung einer Zufallsvariablen mit den diskreten Werten $a_1, \dots, a_n$ und jeweiligen Auftrittswahrscheinlichkeiten $P(a_1), \dots, P(a_n)$ .

### 9.7.1 Kontextbezogene Mutationsoperatoren

Für die Klasse der kontextbezogenen Mutationsoperatoren wurden vier Operatoren entwickelt, die eine Verschiebung der Knoten auf der Koordinatenebene bewirken.

**Operator  $\omega_1^{\text{GA}}$ : Bewege MUX zufällig**

Der Operator  $\omega_1^{\text{GA}}$  verschiebt einen MUX-Knoten in eine zufällige Richtung um einen zufälligen Betrag. Die Vorschrift zur Verschiebung lautet (s. Abb. 9.6(a)):

1. Auswahl eines zufälligen MUX-Knotens  $j \in \{1, \dots, N^{\text{MUX}}\}$ ,
2. Auswahl einer zufälligen Richtung  $\varphi = \text{ZV}(\text{GL}, 0, 2\pi)$ ,
3. Bestimmung einer zufälligen Verschiebungslänge<sup>7</sup>  $\varrho = \text{ZV}(\text{GL}, 0, 50)$  und
4. Verschiebung des MUX-Knotens in Richtung  $\varphi$  um den Betrag  $\varrho$  zur neuen Position  $\vec{r}_{\text{MUX},j}(p_{i+1}) = \vec{r}_{\text{MUX},j}(p_i) + \Delta\vec{r}_{\text{MUX},j}$  mit  $\Delta\vec{r}_{\text{MUX},j} = (\varrho \cos(\varphi), \varrho \sin(\varphi))$ .

**Operator  $\omega_2^{\text{GA}}$ : Bewege n MUX zufällig**

Der Operator  $\omega_2^{\text{GA}}$  verschiebt, statt einem MUX-Knoten wie beim Operator  $\omega_1^{\text{GA}}$ , n MUX-Knoten zufällig auf der Koordinatenebene. Dieser Operator verstärkt den Effekt des Operators  $\omega_1^{\text{GA}}$  und eignet sich für den Anfang der Optimierung. Die Vorschrift für die Verschiebungen ist (s. Abb. 9.6(b)):

1. Auswahl eines zufälligen MUX-Knotens  $j \in \{1, \dots, N^{\text{MUX}}\}$ ,
2. Auswahl einer zufälligen Richtung  $\varphi = \text{ZV}(\text{GL}, 0, 2\pi)$ ,
3. Bestimmung einer zufälligen Verschiebungslänge  $\varrho = \text{ZV}(\text{GL}, 0, 50)$  und
4. Verschiebung des gewählten MUX-Knotens in Richtung  $\varphi$  um den Betrag  $\varrho$  zur neuen Position  $\vec{r}_{\text{MUX},j}(p_{i+1}) = \vec{r}_{\text{MUX},j}(p_i) + \Delta\vec{r}_{\text{MUX},j}$  mit  $\Delta\vec{r}_{\text{MUX},j} = (\varrho \cos(\varphi), \varrho \sin(\varphi))$ .
5. Falls MUX-Knoten schon n-mal verschoben worden sind, Operator terminieren; sonst gehe zu 1.

**Operator  $\omega_3^{\text{GA}}$ : Bewege SW zufällig**

Dieser Operator verschiebt eine Vermittlungsstelle (SW-Knoten) in eine zufällige Richtung um einen zufälligen Betrag (s. auch Operator  $\omega_1^{\text{GA}}$ ). Die Vorschrift zur Verschiebung lautet (s. Abb. 9.6(c)):

<sup>7</sup> Andere für den Zweck der Topologieoptimierung geeigneten Verteilungen sind die Normalverteilung, wie z.B.  $\text{ZV}(\text{NORM}, 0, 50)$  und die negativ exponentielle Verteilung, wie z.B.  $\text{ZV}(\text{NEG}, 50)$ .

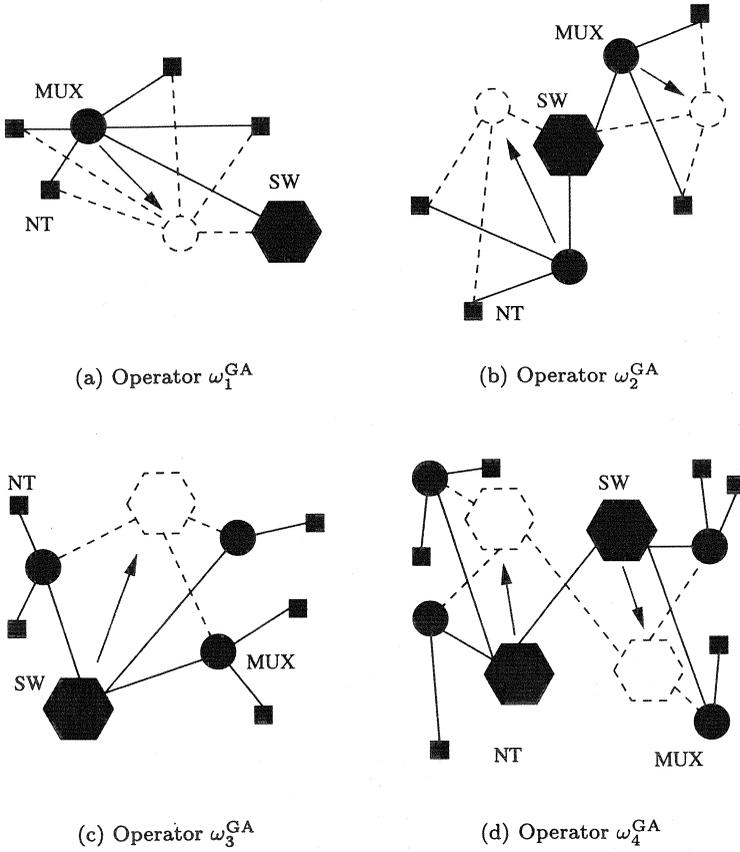


Abbildung 9.6: Graphische Beschreibung der kontextbezogenen Operatoren:  
 (a)  $\omega_1^{GA}$ : Bewege MUX zufällig; (b)  $\omega_2^{GA}$ : Bewege n MUX zufällig;  
 (c)  $\omega_3^{GA}$ : Bewege SW zufällig; (d)  $\omega_4^{GA}$ : Bewege n SW zufällig

1. Auswahl eines zufälligen SW-Knotens  $k \in \{1, \dots, N^{SW}\}$ ,
2. Auswahl einer zufälligen Richtung  $\varphi = ZV(GL, 0, 2\pi)$ ,

3. Bestimmung einer zufälligen Verschiebungslänge  $\varrho = ZV(\text{GL}, 0, 50)$  und
4. Verschiebung des SW-Knotens in Richtung  $\varphi$  um den Betrag  $\varrho$  zur neuen Position  $\vec{r}_{\text{SW},k}(p_{i+1}) = \vec{r}_{\text{SW},k}(p_i) + \Delta\vec{r}_{\text{SW},k}$  mit  $\Delta\vec{r}_{\text{SW},k} = (\varrho \cos(\varphi), \varrho \sin(\varphi))$ .

### Operator $\omega_4^{\text{GA}}$ : Bewege n SW zufällig

Zur n-fachen Verschiebung von SW-Knoten auf der Vermittlungsebene ist der Operator  $\omega_4^{\text{GA}}$  entworfen worden. Analog zum Operator  $\omega_2^{\text{GA}}$  würde dieser Operator eine Verstärkung der einfachen Variante (Operator  $\omega_3^{\text{GA}}$ ) bewirken. Die Vorschrift zur Verschiebung lautet (s. Abb. 9.6(d)):

1. Auswahl eines zufälligen SW-Knotens  $k \in \{1, \dots, N^{\text{SW}}\}$ ,
2. Auswahl einer zufälligen Richtung  $\varphi = ZV(\text{GL}, 0, 2\pi)$ ,
3. Bestimmung einer zufälligen Verschiebungslänge  $\varrho = ZV(\text{GL}, 0, 50)$  und
4. Verschiebung des SW-Knotens in Richtung  $\varphi$  um den Betrag  $\varrho$  zur neuen Position  $\vec{r}_{\text{SW},k}(p_{i+1}) = \vec{r}_{\text{SW},k}(p_i) + \Delta\vec{r}_{\text{SW},k}$  mit  $\Delta\vec{r}_{\text{SW},k} = (\varrho \cos(\varphi), \varrho \sin(\varphi))$ .
5. Falls SW-Knoten schon n-mal verschoben worden sind, Operator terminieren; sonst gehe zu 1.

### 9.7.2 Problemorientierte Mutationsoperatoren

Im Gegensatz zu den kontextbezogenen Operatoren sind die problemorientierten Mutationsoperatoren mit mehr Rechenaufwand verbunden. Sie sind aber durch größere Erfolgswahrscheinlichkeit gekennzeichnet. Im folgenden werden die für das Topologieoptimierungsproblem entwickelten problemorientierten Mutationsoperatoren vorgestellt:

#### Operator $\omega_5^{\text{GA}}$ : Bewege MUX-SW verbunden zufällig

Verschiebt man einen MUX-Knoten zusammen mit dem SW-Knoten, an dem der MUX-Knoten angeschlossen ist, so bleibt die Länge der Verbindung zwischen den MUX- und SW-Knoten konstant. Dies ist besonderes dann erwünscht, wenn sich nach anfänglichen Schwingungen eine kostenoptimale Länge eingestellt hat. Die Vorschrift für die Verschiebung lautet (s. Abb. 9.7(a)):

1. Auswahl eines zufälligen SW-Knotens  $k \in \{1, \dots, N^{\text{SW}}\}$  und eines mit ihm verbundenen MUX-Knotens  $j \in \{1, \dots, N^{\text{MUX}}\}$ ,
2. Auswahl einer zufälligen Richtung  $\varphi = \text{ZV}(\text{GL}, 0, 2\pi)$ ,
3. Bestimmung einer zufälligen Verschiebungslänge  $\varrho = \text{ZV}(\text{GL}, 0, 50)$  und
4. Verschiebung des SW- und MUX-Knotens in Richtung  $\varphi$  um den Betrag  $\varrho$  zu den neuen Orten  $\vec{r}_{\text{SW},k}(p_{i+1}) = \vec{r}_{\text{SW},k}(p_i) + \Delta\vec{r}_{\text{SW},k}$  und  $\vec{r}_{\text{MUX},j}(p_{i+1}) = \vec{r}_{\text{MUX},j}(p_i) + \Delta\vec{r}_{\text{MUX},j}$  mit  $\Delta\vec{r}_{\text{SW},k} = \Delta\vec{r}_{\text{MUX},j} = (\varrho \cos(\varphi), \varrho \sin(\varphi))$ .

### Operator $\omega_6^{\text{GA}}$ : Verbinde NT neu zufällig

Dieser Operator erlaubt die Zuordnung der Quellen und der Senken des Verkehrs, d.h. NT-Knoten, zu MUX-Knoten zu ändern. Das Entfernen einer bestehenden Verbindung zwischen einem MUX- und dem dazugehörigen NT-Knoten und Installation einer neuen Verbindung des NT-Knotens zu einem anderen MUX-Knoten im Netz würde am Anfang der Optimierung bei der großen Unordnung zur Verbesserung der mutierten Lösungen führen. Insgesamt sorgt dieser Operator für den Erhalt der Informationsvielfalt im Genpool des Algorithmus, da Änderungen auf der niedrigen Netzhierarchiestufe Änderungen auf den höheren Hierarchiestufen hervorrufen. Die Vorschrift für die Neuverbindung lautet (s. Abb. 9.7(b)):

1. Auswahl eines zufälligen NT-Knotens  $i \in \{1, \dots, N^{\text{NT}}\}$  und eines beliebigen MUX-Knotens  $j' \in \{1, \dots, N^{\text{MUX}}\}$ ,
2. Die Verbindung von  $i$  nach  $j$  wird aufgelöst und der NT-Knoten  $i$  wird dem MUX-Knoten  $j'$  angeschlossen.

### Operator $\omega_7^{\text{GA}}$ : Bewege MUX zu NT

Die Analyse der Kostenstruktur (s. Kap. 4) im eindimensionalen Fall zeigt, daß ein MUX-Knoten bevorzugt nahe dem verbundenen SW-Knoten oder NT-Knoten plaziert werden sollte<sup>8</sup>, da diese Bereiche Orte der minimalen Kosten für einen MUX-Knoten darstellen [57]. Unter Berücksichtigung dieser Eigenschaft wurde der Operator  $\omega_7^{\text{GA}}$ , der einen MUX-Knoten auf den Ort eines der verbundenen NT-Knoten verschiebt, entworfen. Die Vorschrift für die Verschiebung ist (s. Abb. 9.7(c)):

<sup>8</sup>Makroskopisch kann man eine Anziehung zwischen den Knoten eines Netzes feststellen, die dem Gesamtknotenverkehr proportional ist.

1. Auswahl eines zufälligen MUX-Knotens  $j \in \{1, \dots, N^{\text{MUX}}\}$  und eines mit ihm verbundenen NT-Knotens  $i \in \{1, \dots, N^{\text{NT}}\}$ ,
2. Der MUX-Knoten  $j$  wird auf die Position des NT-Knotens  $i$  verschoben, d.h.  $\vec{r}_{\text{MUX},j}(p_{i+1}) = \vec{r}_{\text{NT},i}(p_i)$ .

### Operator $\omega_8^{\text{GA}}$ : Bewege SW zu MUX

Analog zum Operator  $\omega_7^{\text{GA}}$  wurde dieser Operator basierend auf der Eigenschaft der Knotenanziehung entwickelt. Der Operator  $\omega_8^{\text{GA}}$  verschiebt einen SW-Knoten zu einem an ihn angeschlossenen MUX-Knoten. Die Vorschrift für die Verschiebung lautet (s. Abb. 9.7(d)):

1. Auswahl eines zufälligen SW-Knotens  $k \in \{1, \dots, N^{\text{SW}}\}$  und eines mit ihm verbundenen MUX-Knotens  $j \in \{1, \dots, N^{\text{MUX}}\}$ ,
2. Der SW-Knoten  $k$  wird auf die Position des MUX-Knotens  $j$  verschoben, d.h.  $\vec{r}_{\text{SW},k}(p_{i+1}) = \vec{r}_{\text{MUX},j}(p_i)$ .

### Operator $\omega_9^{\text{GA}}$ : Löse NT-MUX Kreuzverbindungen auf

Dieser Operator  $\omega_9^{\text{GA}}$  zählt zu den rechenintensivsten für die Topologieoptimierung entwickelten Mutationsoperatoren. Der Operator prüft für jedes beliebige NT-Knotenpaar die Möglichkeit der Reduktion der Verbindungslänge zu den angeschlossenen MUX-Knoten, da eine Überkreuzung der Verbindungen eine längere Gesamtverbindungslänge bedeutet. Die Vorschrift für Überkreuzungsauflösung lautet (s. Abb. 9.8(a)):

1. Auswahl von zwei NT-Knoten  $i, i' \in \{1, \dots, N^{\text{NT}}\}$ ,
2. Bestimmung der jeweils an  $i$  und  $i'$  angeschlossenen MUX-Knoten  $j, j' \in \{1, \dots, N^{\text{MUX}}\}$ ,
3. Falls eine Reduktion der Verbindungslänge durch den Austausch der NT-Knoten-zugehörigkeit zu MUX-Anschlußbereichen erreicht werden kann, d.h.

$$|\vec{r}_{\text{NT},i} - \vec{r}_{\text{MUX},j}| + |\vec{r}_{\text{NT},i'} - \vec{r}_{\text{MUX},j'}| > |\vec{r}_{\text{NT},i} - \vec{r}_{\text{MUX},j'}| + |\vec{r}_{\text{NT},i'} - \vec{r}_{\text{MUX},j}|$$

wird die neue Struktur angenommen, d.h. dann werden die Verbindungen  $i$  zu  $j$  und  $i'$  zu  $j'$  aufgelöst, und  $i$  zu  $j'$  und  $i'$  zu  $j$  Verbindungen werden installiert.

4. Wenn alle Kombinationen zweier NT-Knoten überprüft worden sind, soll der Operator terminieren; sonst wird bei 1. wiederholt.

### Operator $\omega_{10}^{\text{GA}}$ : Löse MUX-SW Kreuzverbindungen auf

Betrachtet man die MUX-SW-Verbindungen anstelle von NT-MUX-Verbindungen wie in Operator  $\omega_9^{\text{GA}}$ , so ergibt sich der Operator  $\omega_{10}^{\text{GA}}$ , der in der Lage ist, die MUX-SW-Überkreuzungen aufzulösen. Die Vorschrift für Überkreuzungsauflösung lautet (s. Abb. 9.8(b)):

1. Auswahl von zwei MUX-Knoten  $j, j' \in \{1, \dots, N^{\text{MUX}}\}$ ,
2. Bestimmung der jeweils an  $j$  und  $j'$  angeschlossen SW-Knoten  $k, k' \in \{1, \dots, N^{\text{SW}}\}$ ,
3. Falls eine Reduktion der Verbindungslänge durch den Austausch der MUX-Knotenzugehörigkeit zu SW-Anschlußbereichen erreicht werden kann, d.h.

$$|\vec{r}_{\text{MUX},j} - \vec{r}_{\text{SW},k}| + |\vec{r}_{\text{MUX},j'} - \vec{r}_{\text{SW},k'}| > |\vec{r}_{\text{MUX},j} - \vec{r}_{\text{SW},k'}| + |\vec{r}_{\text{MUX},j'} - \vec{r}_{\text{SW},k}|$$

wird die neue Struktur angenommen, d.h. dann werden die Verbindungen  $j$  zu  $k$  und  $j'$  zu  $k'$  aufgelöst, und  $j$  zu  $k'$  und  $j'$  zu  $k$  Verbindungen werden installiert.

4. Wenn alle Kombinationen zweier MUX-Knoten überprüft worden sind, soll der Operator terminieren; sonst wird bei 1. wiederholt.

### Operator $\omega_{11}^{\text{GA}}$ : Verbinde alle NT neu

Ein weiterer Operator zur Behebung der anfänglichen Unordnung der Netze im simulierten Evolutionsprozeß ist der Operator  $\omega_{11}^{\text{GA}}$ . Dieser Operator findet für alle NT-Knoten einen nächstliegenden MUX-Knoten. Es ist ersichtlich, daß der Operator in der Anfangsphase der Optimierung erfolgreich sein wird. Die Vorschrift für die Neuordnung der NT-Knoten lautet (s. Abb. 9.8(c)):

1. Auswahl eines NT-Knotens  $i \in \{1, \dots, N^{\text{NT}}\}$ ,
2. Bestimmung eines MUX-Knotens  $j', \in \{1, \dots, N^{\text{MUX}}\}$  mit der Eigenschaft:

$$|\vec{r}_{\text{NT},i} - \vec{r}_{\text{MUX},j'}| = \min_{\forall j \in \{1, \dots, N^{\text{MUX}}\}} (|\vec{r}_{\text{NT},i} - \vec{r}_{\text{MUX},j}|)$$

und Anschluß der NT-Knoten  $i$  mit dem MUX-Knoten  $j'$ .

3. Falls alle NT-Knoten bearbeitet worden sind, dann den Operator terminieren; sonst wird bei 1. fortgesetzt.

**Operator  $\omega_{12}^{\text{GA}}$ : Verbinde alle MUX neu**

Bildet man die Funktionalität des Operators  $\omega_{11}^{\text{GA}}$  auf eine höhere Netzhierarchieebene ab, so resultiert der Operator  $\omega_{12}^{\text{GA}}$ . Die Vorschrift für die Neuordnung der MUX-Knoten lautet (s. Abb. 9.8(d)):

1. Auswahl eines MUX-Knotens  $j \in \{1, \dots, N^{\text{MUX}}\}$ ,
2. Bestimmung eines SW-Knotens  $k' \in \{1, \dots, N^{\text{SW}}\}$  mit der Eigenschaft:

$$|\vec{r}_{\text{MUX},j} - \vec{r}_{\text{SW},k'}| = \min_{\forall k \in \{1, \dots, N_{\text{SW}}\}} (|\vec{r}_{\text{MUX},j} - \vec{r}_{\text{SW},k}|)$$

und Anschluß der MUX-Knoten  $j$  mit dem SW-Knoten  $k'$ .

3. Falls alle MUX-Knoten bearbeitet worden sind, dann den Operator terminieren; sonst wird bei 1. fortgesetzt.

**Operator  $\omega_{13}^{\text{GA}}$ : Entferne MUX Anschlußüberschuß**

Im Laufe der simulierten Evolution treten Netze auf, bei denen für einige Knoten die Bedingung der maximal zulässigen Anschlußkapazität verletzt wird. Diese Netze werden in der Regel bei der Bewertung mit zusätzlichen Kosten beaufschlagt, so daß sie bei der Selektionsstufe eliminiert werden und nicht in den nächsten Generationen auftauchen. Um die MUX-Knoten von dem Anschlußüberschuß zu entlasten, wurde der Operator  $\omega_{13}^{\text{GA}}$  entworfen. Dieser Operator entlastet einen MUX-Knoten, indem er die Anzahl der angeschlossenen NT-Knoten reduziert. Die Vorschrift für die MUX-Knotenentlastung lautet (s. Abb. 9.9(a)):

1. Ermittlung eines MUX-Knotens  $j \in \{1, \dots, N^{\text{MUX}}\}$ , wobei gilt:  

$$\sum_{i \in \{1, \dots, N^{\text{NT}}\}} L_{ij}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}} > N_{\text{max}}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}},$$
2. Auswahl eines an  $j$  angeschlossenen NT-Knotens  $i \in \{1, \dots, N^{\text{NT}}\}$ ,
3. Entfernen der Verbindung zwischen  $i$  und  $j$  und suche nach  $\hat{j}$  mit der Eigenschaft:

$$|\vec{r}_{\text{NT},i} - \vec{r}_{\text{MUX},\hat{j}}| = \min_{\substack{\forall j' \in \{1, \dots, N_{\text{max}}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}}\} \\ j' \neq j}} (|\vec{r}_{\text{NT},i} - \vec{r}_{\text{MUX},j'}|)$$

4. Verbinde NT-Knoten  $i$  mit MUX-Knoten  $\hat{j}$ .

### Operator $\omega_{14}^{GA}$ : Entferne SW Anschlußüberschuß

Die gleiche „Reparaturarbeit“ für die Reduktion des Knotenanschlußüberschusses fällt auch an SW-Knoten an. Der Operator  $\omega_{14}^{GA}$  wurde analog zum Operator  $\omega_{13}^{GA}$  zur Behebung des Anschlußüberschusses an SW-Knoten entworfen. Die Vorschrift für die SW-Knotenentlastung lautet (s. Abb. 9.9(b)):

1. Ermittlung eines SW-Knotens  $k \in \{1, \dots, N^{SW}\}$ , wobei gilt:  

$$\sum_{j \in \{1, \dots, N^{MUX}\}} L_{jk}^{MUX \rightarrow SW} > N_{\max}^{MUX \rightarrow SW},$$
2. Auswahl eines an  $k$  angeschlossenen MUX-Knotens  $j \in \{1, \dots, N^{MUX}\}$ ,
3. Entfernen der Verbindung zwischen  $j$  und  $k$  und suche nach  $\hat{k}$  mit der Eigenschaft:

$$|\vec{r}_{MUX,j} - \vec{r}_{SW,\hat{k}}| = \min_{\substack{v_{k' \in \{1, \dots, N_{\max}^{MUX \rightarrow SW}\}} \\ k' \neq k}} (|\vec{r}_{MUX,j} - \vec{r}_{SW,k'}|)$$

4. Verbinde MUX-Knoten  $j$  mit SW-Knoten  $\hat{k}$ .

### Operator $\omega_{15}^{GA}$ : Entferne längste NT-MUX-Verbindung

Die zugrundeliegende Kostenstruktur für die Verbindungen im Netz ist u.a. proportional zu den Verbindungslängen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, Operatoren zu entwerfen, die die längeren und daher teureren Verbindungen, wenn möglich, in kürzeren Verbindungen umwandeln. Der Operator  $\omega_{15}^{GA}$  übernimmt die Aufgabe der Suche nach der längsten NT-MUX-Verbindung und eine Verkürzung dieser Verbindung durch optimalen Anschluß der NT-Knoten an einen am nächsten liegenden und unbelasteten MUX-Knoten. Die Vorschrift für das Entfernen der längsten NT-MUX-Verbindung lautet (s. Abb. 9.9(c)):

1. Auswahl eines MUX-Knotens  $j \in \{1, \dots, N^{MUX}\}$ ,
2. Ermittlung eines NT-Knotens  $i \in \{1, \dots, N^{NT}\}$ , der an  $j$  angeschlossen ist und am weitesten zu  $j$  liegt, d.h.

$$|\vec{r}_{NT,i} - \vec{r}_{MUX,j}| = \max_{\substack{v_{i' \in \{1, \dots, N^{NT}\} \wedge \\ \text{wenn } L_{i'j}^{NT \rightarrow MUX} = 1}} (|\vec{r}_{NT,i'} - \vec{r}_{MUX,j}|)$$

3. Ermittlung des am nächsten liegenden MUX-Knotens  $\hat{j}$ , der noch freie Anschlußkapazität besitzt ( $\hat{j} \in \{1, \dots, N^{MUX}\}$ ):

$$|\vec{r}_{NT,i} - \vec{r}_{MUX,\hat{j}}| = \min_{\substack{v_{j' \in \{1, \dots, N^{MUX}\} \\ j' \neq j \wedge \sum_i L_{ij'} < N_{\max}^{NT \rightarrow MUX}}} (|\vec{r}_{NT,i} - \vec{r}_{MUX,j'}|)$$

4. Falls MUX-Knoten  $\hat{j}$  existiert, dann die Verbindung zwischen  $i$  und  $j$  abbauen und NT-Knoten  $i$  zum MUX-Knoten  $\hat{j}$  anschließen.

### Operator $\omega_{16}^{\text{GA}}$ : Entferne längste MUX-SW-Verbindung

Um die Wirkungsweise vom Operator  $\omega_{15}^{\text{GA}}$  auf MUX-SW-Verbindungen anzuwenden, wurde der Operator  $\omega_{16}^{\text{GA}}$  entwickelt. Die Vorschrift für das Entfernen der längsten NT-MUX-Verbindung lautet (s. Abb. 9.9(d)):

1. Auswahl eines SW-Knotens  $k \in \{1, \dots, N^{\text{SW}}\}$ ,
2. Ermittlung eines MUX-Knotens  $j \in \{1, \dots, N^{\text{MUX}}\}$ , der an  $k$  angeschlossen ist und am weitesten zu  $k$  liegt, d.h.
 
$$|\vec{r}_{\text{MUX},j} - \vec{r}_{\text{SW},k}| = \max_{\substack{v, j' \in \{1, \dots, N^{\text{MUX}}\} \\ \text{wenn } L_{j'k}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}} = 1}} (|\vec{r}_{\text{MUX},j'} - \vec{r}_{\text{SW},k}|)$$
3. Ermittlung des am nächsten liegenden SW-Knotens  $\hat{k} \in \{1, \dots, N^{\text{SW}}\}$ , der noch freie Anschlußkapazität besitzt:
 
$$|\vec{r}_{\text{MUX},j} - \vec{r}_{\text{SW},\hat{k}}| = \min_{\substack{v, k' \in \{1, \dots, N^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}}\} \\ k' \neq k \wedge \sum_j L_{jk'} < N_{\text{max}}^{\text{SW}}}} (|\vec{r}_{\text{MUX},j} - \vec{r}_{\text{SW},k'}|)$$
4. Falls SW-Knoten  $\hat{k}$  existiert, dann die Verbindung zwischen  $j$  und  $k$  abbauen und MUX-Knoten  $j$  zum SW-Knoten  $\hat{k}$  anschließen.

### Operator $\omega_{17}^{\text{GA}}$ : SW zieht MUX

Dieser Operator wurde basierend auf der makroskopischen Eigenschaft der Kostenstruktur – die Knoten ziehen sich entsprechend dem an ihnen ankommenden Verkehr gegenseitig an – entworfen. Dieser Operator verschiebt die MUX-Knoten in Richtung der Zugkraft des angeschlossenen SW-Knotens. Der Faktor  $k_{\text{zug}}$  ( $0 < k_{\text{zug}} < 1$ ) multipliziert mit dem Abstand zwischen MUX- und SW-Knoten ( $\Delta \vec{r}_{\text{MUX},j}$ ) als Verschiebungsmaß ermöglicht, die Schwankung des MUX-Knotens um den SW-Knoten zu vermeiden. Die Vorschrift für Verschiebung lautet (s. Abb. 9.10(a)):

1. Auswahl eines MUX-Knotens  $j \in \{1, \dots, N^{\text{MUX}}\}$ ,
2. Ermittlung von an  $j$  angeschlossenen SW-Knoten  $k \in \{1, \dots, N^{\text{SW}}\}$ ,
3. Verschiebung des MUX-Knotens  $j$  in Richtung der Zugkraft zum SW-Knoten um den Betrag:

$$\begin{aligned} \Delta \vec{r}_{\text{MUX},j} &= k_{\text{zug}} (\vec{r}_{\text{SW},k} - \vec{r}_{\text{MUX},j}) \\ \vec{r}_{\text{MUX},j}(p_{i+1}) &= \vec{r}_{\text{MUX},j}(p_i) + \Delta \vec{r}_{\text{MUX},j} \end{aligned}$$

### Operator $\omega_{18}^{\text{GA}}$ : NT ziehen MUX

Der Operator  $\omega_{18}^{\text{GA}}$  überträgt das Prinzip von Operator  $\omega_{17}^{\text{GA}}$  auf die NT-MUX-Verbindungen. Dabei wird ein MUX-Knoten von allen angeschlossenen NT-Knoten entsprechend dem Verkehr der NT-Knoten angezogen. Richtung und Betrag der Zugkraft resultieren aus dem arithmetischen Mittel über die einzelnen NT-MUX-Verbindungen. Die Vorschrift für die Verschiebung lautet (s. Abb. 9.10(b)):

1. Auswahl eines MUX-Knotens  $j \in \{1, \dots, N^{\text{MUX}}\}$ ,
2. Ermittlung von an  $j$  angeschlossenen NT-Knoten  $i \in \{1, \dots, N^{\text{NT}}\}$ ,
3. Bestimmung des Verschiebungsvektors durch Bildung des arithmetischen Mittels der einzelnen Verschiebungsvektoren:

$$\Delta \vec{r}_{\text{MUX},j} = \frac{k_{\text{zug}} \left( \sum_{i \in \{1, \dots, N^{\text{NT}}\}} L_{ij}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}} (\vec{r}_{\text{NT},i} - \vec{r}_{\text{MUX},j}) \right)}{\sum_{i \in \{1, \dots, N^{\text{NT}}\}} L_{ij}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}}}$$

4. Verschiebung des MUX-Knotens  $j$  in Richtung der Zugkraft zu den NT-Knoten um den Betrag:

$$\vec{r}_{\text{MUX},j}(p_{i+1}) = \vec{r}_{\text{MUX},j}(p_i) + \Delta \vec{r}_{\text{MUX},j}$$

### Operator $\omega_{19}^{\text{GA}}$ : SW zieht alle MUX

Eine Vervielfachung der Wirkungsweise von Operator  $\omega_{17}^{\text{GA}}$  bewirkt der Operator  $\omega_{19}^{\text{GA}}$ . Dabei wird jeder MUX-Knoten in Richtung der Zugkraft zum zugeordneten SW-Knoten verschoben. Die Vorschrift für die Verschiebungen lautet (s. Abb. 9.10(c)):

1. Auswahl eines MUX-Knotens  $j \in \{1, \dots, N^{\text{MUX}}\}$ ,
2. Ermittlung von an  $j$  angeschlossenen SW-Knoten  $k \in \{1, \dots, N^{\text{SW}}\}$ ,
3. Verschiebung des MUX-Knotens  $j$  in Richtung der Zugkraft zum SW-Knoten um den Betrag:

$$\begin{aligned} \Delta \vec{r}_{\text{MUX},j} &= k_{\text{zug}} (\vec{r}_{\text{SW},k} - \vec{r}_{\text{MUX},j}) \\ \vec{r}_{\text{MUX},j}(p_{i+1}) &= \vec{r}_{\text{MUX},j}(p_i) + \Delta \vec{r}_{\text{MUX},j} \end{aligned}$$

4. Falls alle MUX-Knoten berücksichtigt worden sind, dann wird der Operator terminiert; sonst wird bei 1. angefangen.

**Operator  $\omega_{20}^{GA}$ : NT ziehen alle MUX**

Verallgemeinert man den Operator  $\omega_{18}^{GA}$  in der Art, daß alle MUX-Knoten einbezogen werden, so ergibt sich der Operator  $\omega_{20}^{GA}$ . Die Vorschrift für Verschiebungen lautet (s. Abb. 9.10(d)):

1. Auswahl eines MUX-Knotens  $j \in \{1, \dots, N^{MUX}\}$ ,
2. Ermittlung von an  $j$  angeschlossenen NT-Knoten  $i \in \{1, \dots, N^{NT}\}$ ,
3. Bestimmung des Verschiebungsvektors durch Bildung des arithmetischen Mittels der einzelnen Verschiebungsvektoren:

$$\Delta \vec{r}_{MUX,j} = \frac{k_{zug} \left( \sum_{i \in \{1, \dots, N^{NT}\}} L_{ij}^{NT \rightarrow MUX} (\vec{r}_{NT,i} - \vec{r}_{MUX,j}) \right)}{\sum_{i \in \{1, \dots, N^{NT}\}} L_{ij}^{NT \rightarrow MUX}}$$

4. Verschiebung des MUX-Knotens  $j$  in Richtung der Zugkraft zu den NT-Knoten um den Betrag:

$$\vec{r}_{MUX,j}(p_{i+1}) = \vec{r}_{MUX,j}(p_i) + \Delta \vec{r}_{MUX,j}$$

5. Falls alle MUX-Knoten berücksichtigt worden sind, dann wird der Operator terminiert; sonst wird bei 1. angefangen.

Die zur Anwendung auf Codierung A entwickelten kontextbezogenen und problemorientierten Mutationsoperatoren können basierend auf den erzielten Erfolgen überprüft werden. Ein Operator wird als erfolgreich definiert, wenn das resultierte Netz eine bessere Bewertung als das ursprüngliche Netz besitzt. Die Abbildungen 9.11, 9.12, 9.13, 9.14 und 9.15 zeigen die jeweilige Erfolgsstatistik der Operatoren bei einer Gleichverteilung der Operatoranwendungen.

Die Operatoren sind unterschiedlich erfolgreich. Außerdem ist der Grad des Erfolgs von der Generation, in der der Operator angewandt wurde, abhängig. Manche Operatoren sind bis zu einer bestimmten Generationenanzahl erfolgreich, während die anderen für den gesamten Optimierungsprozeß erfolgreich bleiben. Die Ergebnisse aus der gleichverteilten Operatoranwendungen legen nahe, daß eine gewichtete Anwendung der Operatoren der Konvergenzzeit des Algorithmus zugute kommen kann. Die Abbildung 9.16 zeigt unterschiedliche Wichtungen der Operatoren und ihren Einfluß auf die Konvergenzgeschwindigkeit des Algorithmus. Wird die Wahrscheinlichkeit des

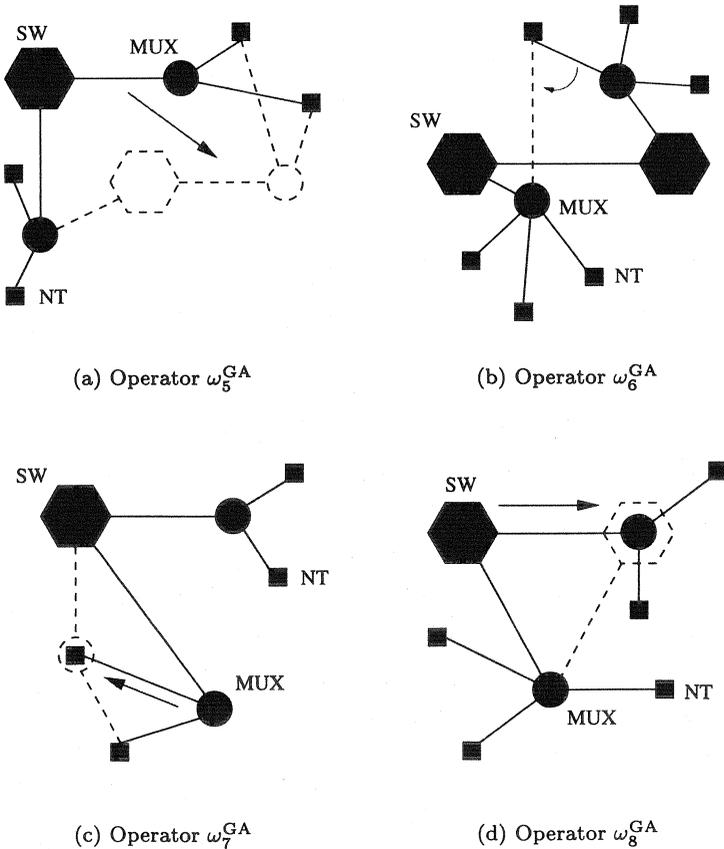


Abbildung 9.7: Die problemorientierten Mutationsoperatoren (I): (a)  $\omega_5^{GA}$ : Bewege MUX–SW verbunden zufällig; (b)  $\omega_6^{GA}$ : Verbinde NT neu zufällig; (c)  $\omega_7^{GA}$ : Bewege MUX zu NT; (d)  $\omega_8^{GA}$ : Bewege SW zu MUX

Operatoreinsatzes proportional zu ihrer bisherigen Erfolgswahrscheinlichkeit festgelegt, so lässt sich die Konvergenzgeschwindigkeit erhöhen. Ein anderer Ansatz zur Wichtung der Operatoren ist die gewinnorientierte Wich-

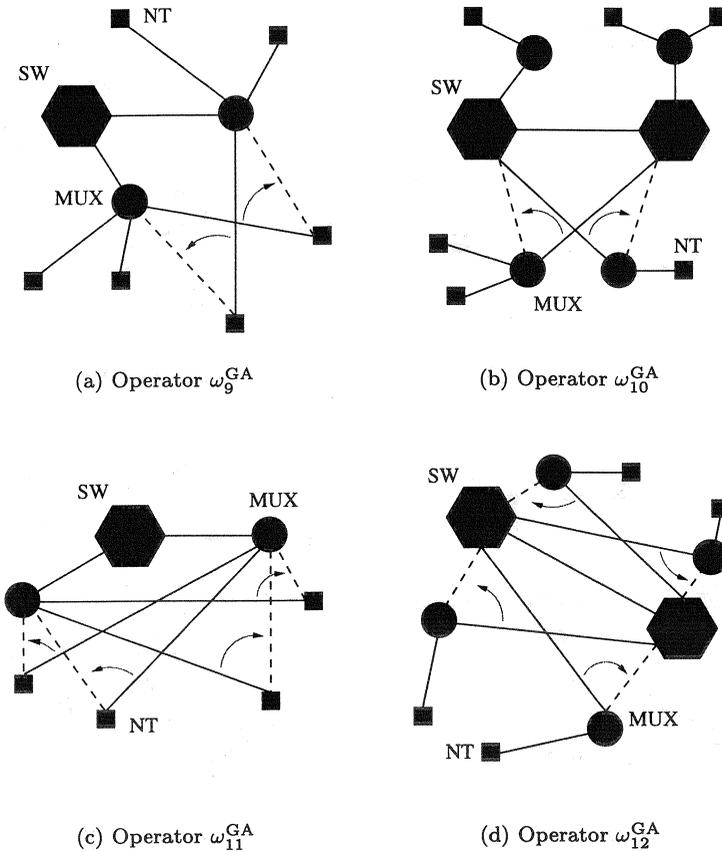


Abbildung 9.8: Die problemorientierten Mutationsoperatoren (II): (a)  $\omega_9^{GA}$ : Löse NT-MUX Kreuzverbindungen auf; (b)  $\omega_{10}^{GA}$ : Löse MUX-SW Kreuzverbindungen auf; (c)  $\omega_{11}^{GA}$ : Verbinde alle NT neu; (d)  $\omega_{12}^{GA}$ : Verbinde alle MUX neu

tung, wobei die Wahrscheinlichkeit der Operatoranwendung mit dem erzielten Gewinn gewichtet wird. Es ist offensichtlich, daß schlecht gewichtete Operatoreinsätze die Konvergenz des Algorithmus verlangsamen und sogar

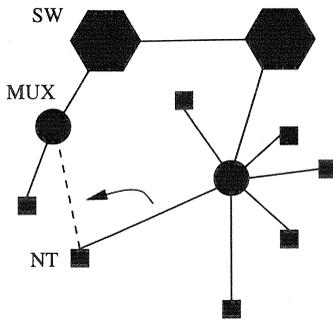
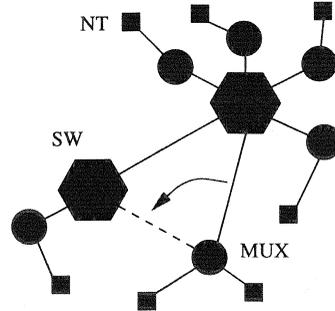
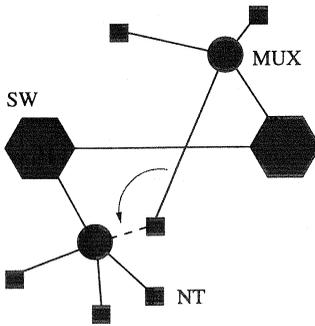
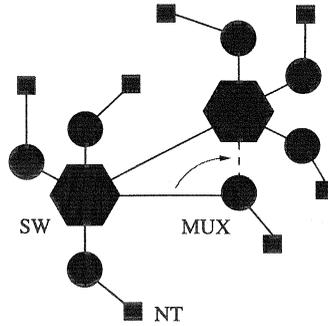
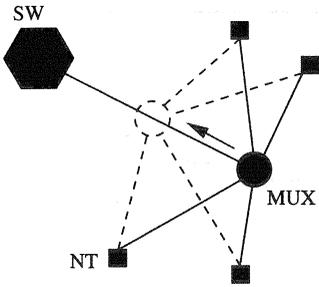
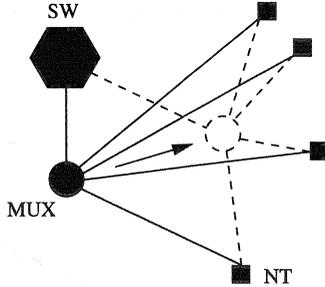
(a) Operator  $\omega_{13}^{GA}$ (b) Operator  $\omega_{14}^{GA}$ (c) Operator  $\omega_{15}^{GA}$ (d) Operator  $\omega_{16}^{GA}$ 

Abbildung 9.9: Die problemorientierten Mutationsoperatoren (III): (a)  $\omega_{13}^{GA}$ : Entferne MUX Anschlußüberschuß; (b)  $\omega_{14}^{GA}$ : Entferne SW Anschlußüberschuß; (c)  $\omega_{15}^{GA}$ : Entferne längste NT-MUX Verbindung; (d)  $\omega_{16}^{GA}$ : Entferne längste MUX-SW Verbindung

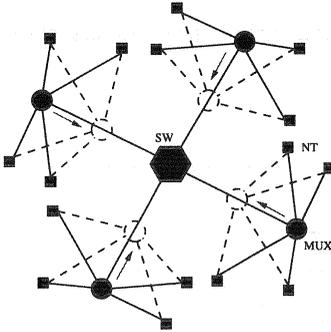
manchmal unterbinden. Zum Vergleich ist das Verhalten des Algorithmus bei gleichverteilter Anwendung von Operatoren angegeben.



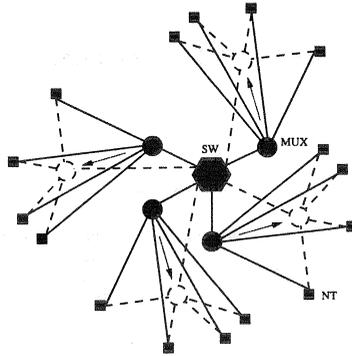
(a) Operator  $\omega_{17}^{GA}$



(b) Operator  $\omega_{18}^{GA}$



(c) Operator  $\omega_{19}^{GA}$



(d) Operator  $\omega_{20}^{GA}$

Abbildung 9.10: Die problemorientierten Mutationsoperatoren (IV): (a)  $\omega_{17}^{GA}$ : SW zieht MUX; (b)  $\omega_{18}^{GA}$ : NT ziehen MUX; (c)  $\omega_{19}^{GA}$ : SW zieht alle MUX; (d)  $\omega_{20}^{GA}$ : NT ziehen alle MUX

## 9.8 Selektionsmechanismus

Die Netze in der aktuellen Population und die durch Operatoren neu generierten werden in einen Pool zusammengeführt. Aus diesem Pool wird dann

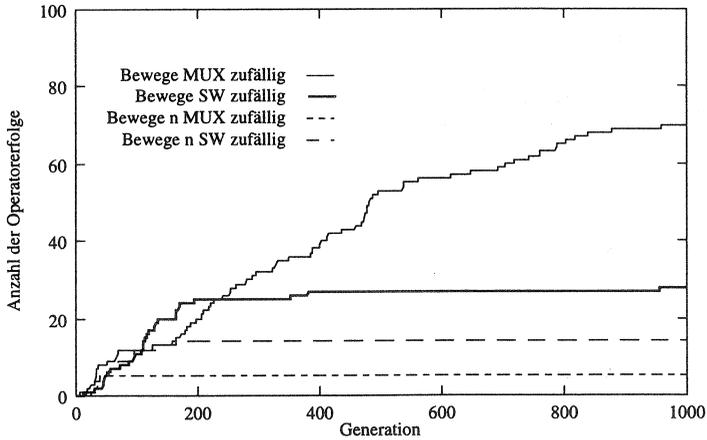


Abbildung 9.11: Erfolgsstatistik der kontextbezogenen Operatoren

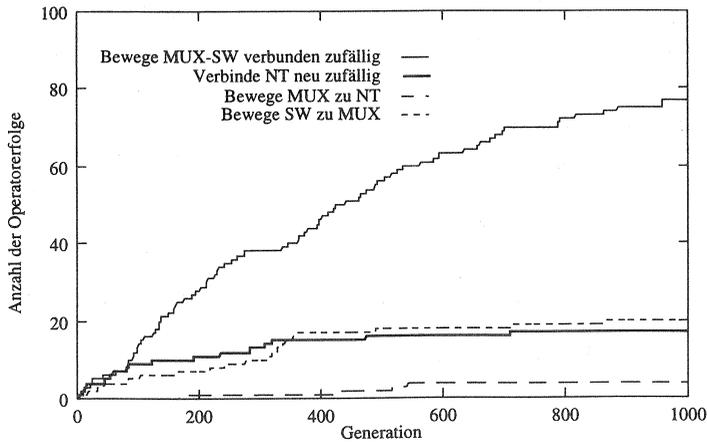


Abbildung 9.12: Erfolgsstatistik der problemorientierten Operatoren (I)

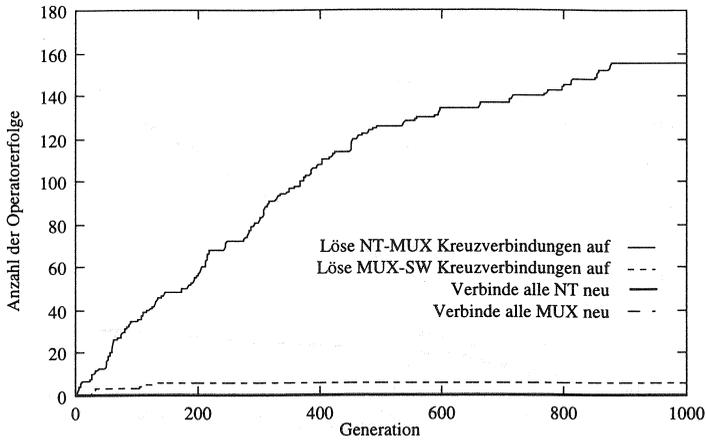


Abbildung 9.13: Erfolgsstatistik der problemorientierten Operatoren (II)

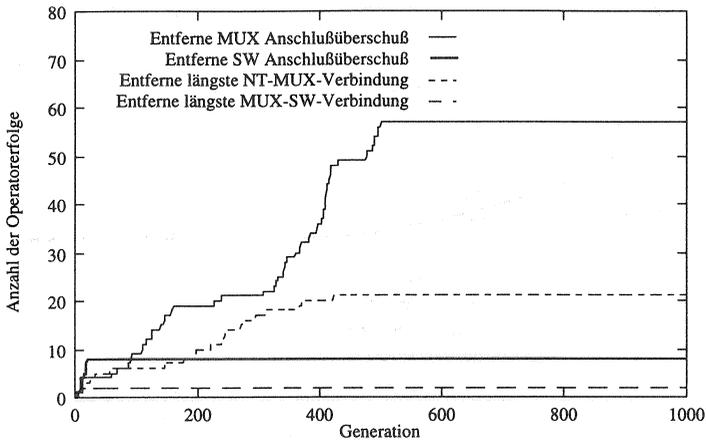


Abbildung 9.14: Erfolgsstatistik der problemorientierten Operatoren (III)

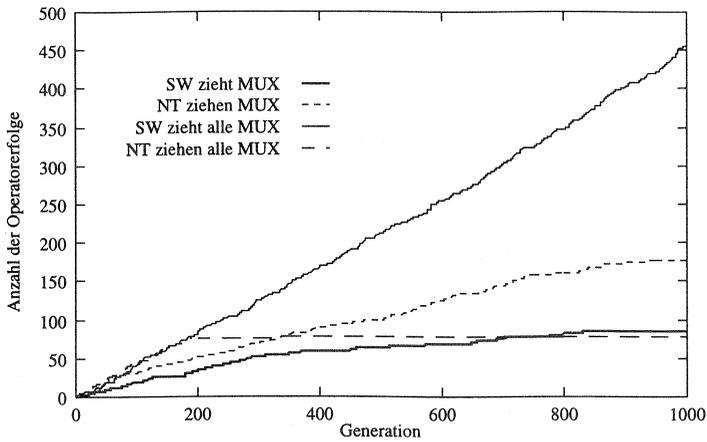


Abbildung 9.15: Erfolgsstatistik der problemorientierten Operatoren (VI)

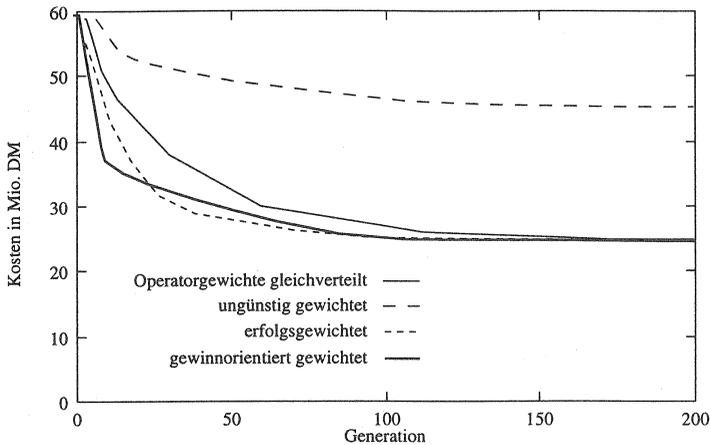


Abbildung 9.16: Einfluß von gewichtetem Einsatz von Operatoren

eine neue Population ausgewählt. Die Verfahren für diese Auswahl werden Selektionsmechanismen<sup>9</sup> genannt. Man kann zwischen verschiedenen Selektionsmechanismen unterscheiden:

- **Vollständiges Ersetzen:** Das als Vollständiges Ersetzen (*generational replacement*) bekannte Verfahren wählt nur die durch Operatoren generierten Netze aus und ersetzt damit die aktuelle Population vollständig. Der Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, daß die guten und zur Optimalität führenden Netzeigenschaften abrupt verloren gehen können. Andererseits kann dieses Verfahren vorteilhaft wirken, da die Dominanz irgendwelcher Netzeigenschaften, insbesondere die schlechten, durch vollständiges Ersetzen reduziert werden und die Gefahr der lokalen Minima vermindert wird.
- **Elitismus:** Unter Elitismus (*elitism*) versteht man einen Mechanismus der Auswahl der  $n$  besten Netze aus der Menge der Netze (aktuelle Population + Nachkommen). Die Güte eines Netzes wird durch seine Bewertung festgelegt. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist die Möglichkeit der zu schnellen Ausbreitung der guten Netzeigenschaften und dadurch zu früher Konvergenz des Algorithmus.
- **Schwacher Elitismus:** Das Verfahren Schwacher Elitismus (*weak elitism*) ermöglicht, dem Nachteil von Elitismus entgegen zu wirken, indem die  $n$  besten Netzentwürfe zuerst mutiert und dann in die neue Population übernommen werden. Der Nachteil ist, daß durch die Mutation die guten Netzeigenschaften zerstört werden können.
- **Ersetzen der Schlechtesten:** Ersetzt man die  $n$  als schlecht ausgewählten Netze, so liegt das Verfahren „Ersetzen der Schlechtesten“ (*delete-n-last*) vor<sup>10</sup>.

Es sind prinzipiell viele weitere Verfahren denkbar. Für das Topologieoptimierungsproblem wurde im Falle des Algorithmus basierend auf Codierung A das Verfahren Elitismus benutzt. Die Abbildung 9.17 zeigt, daß der Selektionsmechanismus „Elitismus“ dem Mechanismus „Vollständiges Ersetzen“ überlegen ist. Für die Topologieoptimierungsaufgabe konvergiert der Selektionsmechanismus „Vollständiges Ersetzen“ nicht, obwohl man ihn mit

<sup>9</sup>In diesem Zusammenhang kann man auch von Ersetzungsmechanismen sprechen, da die aktuelle Population durch eine neue Population ersetzt wird.

<sup>10</sup>Ist  $n$  sehr viel kleiner als die Populationsgröße, so spricht man von einem *steady state* Ersetzungsschema. Für  $n$  gleich der Populationsgröße erhält man das Verfahren des Vollständigen Ersetzens.

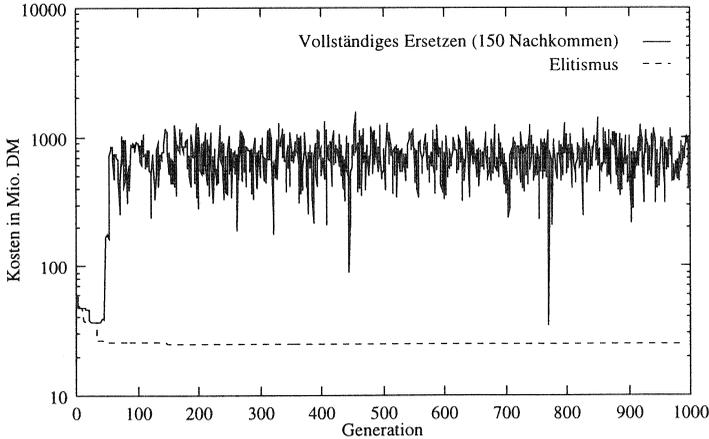


Abbildung 9.17: Vergleich zwischen zwei Selektionsmechanismen für den auf Codierung A basierten Algorithmus

der hohen Nachkommenzahl von 150 Nachkommen in jeder Generation begünstigt hat.

Der Algorithmus basierend auf Codierung B verwendet ein hybrides Verfahren aus „Elitismus“ bzw. „schwacher Elitismus“ und „Ersetzen der Schlechtesten“.

## 9.9 Abbruchkriterium

Für den Abbruch des auf der Evolutionsstrategie bzw. dem Genetischen Algorithmus basierenden Topologieentwurfalgorithmen sind verschiedene Kriterien möglich. Ein Kriterium ist die Überschreitung einer vorgegebenen Generationenzahl. Man kann auch automatisch abbrechen lassen, wenn die gewonnene Generation homogen geworden ist, d.h. die Netze quasi die gleiche Bewertung besitzen. Als Lösung des Verfahrens gilt das beste Netz der letzten Generationen.

## 9.10 Beispielszenario GA

Analog zum Beispielszenario für SA im Abs. 8.10 wird hier unter den gleichen Bedingungen die Netztopologie mit Hilfe des auf GA basierten Topologieentwurfalgorithmus optimiert.

- Anzahl der NT-Knoten:  $N^{\text{NT}} = 200$ ,
- Homogene Verkehrsbeziehung:  $p_{i \leftrightarrow i'}^{\text{NT}} = 0,01$  Erlang  $\forall i, i' \in I$ ,
- Maximale Anschlußkapazität der MUX- und SW-Knoten:  $N_{\text{max}}^{\text{NT} \rightarrow \text{MUX}} = 32$ ,  $N_{\text{max}}^{\text{MUX} \rightarrow \text{SW}} = 10$ ,
- Linkblockierung:  $\xi = 0,001$ ,
- Minimal erforderliche Anzahl der MUX- und SW-Knoten:  $N^{\text{MUX}} = 7$  und  $N^{\text{SW}} = 1$ .

Die Abbildungen 9.18(a), 9.18(b), 9.18(c), 9.18(d) zeigen die besten Netztopologien bei verschiedenen Generationen der Netzoptimierung mittels des in dieser Arbeit entwickelten genetischen Topologieentwurfalgorithmus. Die zufällig erzeugte Netztopologie bei der Generation 0 (s. Abb. 9.18(a)) findet sehr schnell bei der Generation 6 eine geordnete Netzstruktur (s. Abb. 9.18(b)). Die besten Netzlösungen aus den Generationen 982 und 4825 unterscheiden sich wenig (s. Abb. 9.18(c) und 9.18(d)), was für eine schnelle Konvergenz des GA-Algorithmus spricht.

Der Optimierungsalgorithmus wurde bei der Generationszahl 5000 terminiert, wobei eine Population aus 5 Netztopologien zusammengesetzt wird.

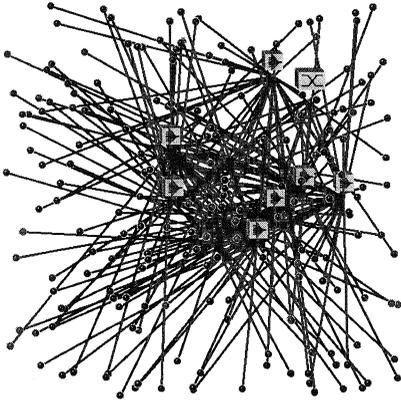
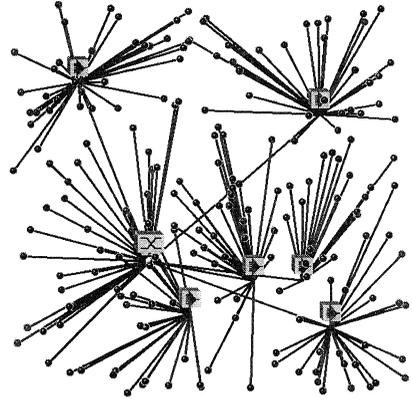
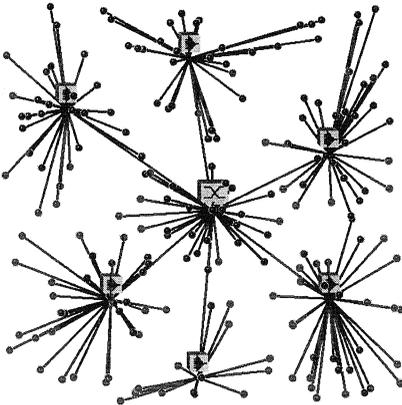
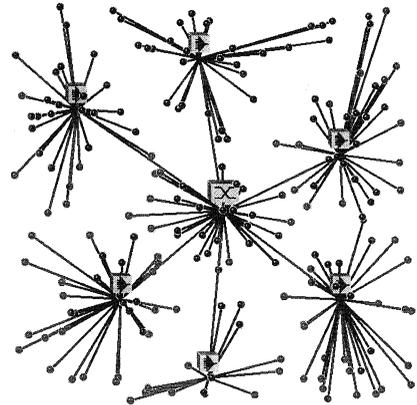
(a)  $\Psi_0 = 88.916.968$  DM(b)  $\Psi_6 = 64.985.912$  DM(c)  $\Psi_{982} = 48.942.052$  DM(d)  $\Psi_{4825} = 48.798.800$  DM

Abbildung 9.18: Beste Netztopologien: (a) Generation 0; (b) Generation 6;  
(c) Generation 982; (d) Generation 4825

## Topologieentwurfswerkzeug

Die Komplexität der heutigen Telekommunikationsnetze erfordert rechnergestützte Werkzeuge und Hilfsmittel, um den anfallenden Netzplanungsaufgaben im akzeptablen Zeitrahmen gerecht zu werden. Die wenigen kommerziell verfügbaren Netzplanungswerkzeuge, wie MIND<sup>1</sup>, NetSolve<sup>2</sup> und NPAT<sup>3</sup>, sind für die Anforderungen der Diensteanbieter oder Hersteller von Hardware zugeschnitten, wie z.B. die Dimensionierung von speziellen Übertragungsstrecken und herstellereigenen Vermittlungsanlagen. Es existiert bislang kein Werkzeug, das Netzplaner zur Bestimmung der optimalen Netztopologie, die Schwerpunkt dieser Arbeit ist, unterstützt.

Mit der Entwicklung des Topologieentwurfswerkzeugs wurden zwei Zielsetzungen verfolgt. Das Werkzeug soll dem Netzplaner durch die Integration der entwickelten Algorithmen und gewonnenen Erkenntnisse leistungsfähige Hilfsmittel zur Erleichterung der Netzentwurfsaufgaben anbieten. Außerdem soll das Werkzeug als Entwicklungsplattform für Wissenschaftler und Algorithmententwerfer im Bereich Netzplanung die Möglichkeit geben, andere existierende Algorithmen zu benutzen, ihre eigenen Algorithmen und Verfahren zu prüfen, ihre Ergebnisse zu visualisieren und durch Interaktion mit dem System die Entwurfsphase zu beschleunigen.

In diesem Kapitel wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Topologieentwurfswerkzeug TND Tool (*Topological Network Design Tool*) vorgestellt. Nach einer Anforderungsanalyse werden die einzelnen Module von TND Tool beschrieben [52, 53].

### 10.1 Anforderungsanalyse

Die Entwicklung von TND Tool basiert auf einer Anforderungsanalyse, um die Zahl der evtl. erforderlichen Implementationskorrekturen, die i.d.R. ab-

---

<sup>1</sup> *Network Analysis Center*

<sup>2</sup> *Quintessential Solutions*

<sup>3</sup> *WANDL, Inc.*

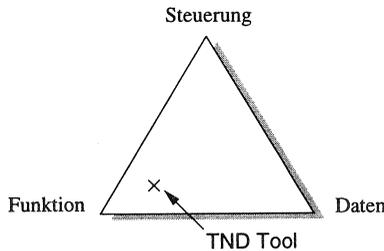


Abbildung 10.1: Lage von TND Tool im Klassifikationsdreieck

hängig von der Entwicklungsphase mit hohem Aufwand verbunden sind, zu reduzieren. Die Wahl der Analyseverfahren bestimmt die Charakteristika des Zielsystems. Die Systeme können abhängig von ihrem Verhalten funktional, steuerungorientiert oder datenorientiert sein. Funktionale Systeme führen hauptsächlich Datentransformationen aus, wie z.B. Optimierungs- und Simulationsprogramme. Ihr Verhalten wird durch die Eingabedaten bestimmt. Steuerungorientierte Systeme sind unterbrechungsgesteuert (*interrupt driven*) und werden in Realzeitumgebungen vorgefunden, wie z.B. bei Prozeßsteuerungs- und Flugleitsystemen. Die datenorientierten Systeme basieren auf Speicherung und Manipulation großer Datenmengen, wie z.B. bei Büroautomatisierungsanwendungen. Das TND Tool besitzt eine Mischung der dargestellten Klassifikationseigenschaften, aber die zentralen Eigenschaften deuten auf ein funktionales System hin, wie in Abbildung 10.1 dargestellt ist.

Aus der Lage des Werkzeugs im Klassifikationsdreieck kann man schließen, daß eine funktionale Anforderungsanalyse des Werkzeugs die geeignetste Analyseverfahren ist. Die hier verwendete Methode wird nach ihren Entwicklern HATLEY & PIRBHAI [25] benannt. Der Vorteil dieser Analyseverfahren besteht darin, daß eine technologieunabhängige Beschreibung der geforderten Systemfunktionalität erreicht wird. Hierdurch wird der maximale Grad an Portabilität und Wiederverwendbarkeit der Analyseergebnisse erzielt. Es wird in erster Linie festgelegt, was zu entwerfen ist, anstatt wie man es entwirft. Um dies zu bewerkstelligen, verwendet man hierarchische Diagramme, die erlauben, komplexe Systeme auf verschiedenen Hierarchiestufen, ohne Angabe der irrelevanten Details auf jeder Stufe, darzustellen.

Die Anforderungsanalyse beginnt mit der Definition des Kontextes, in dem

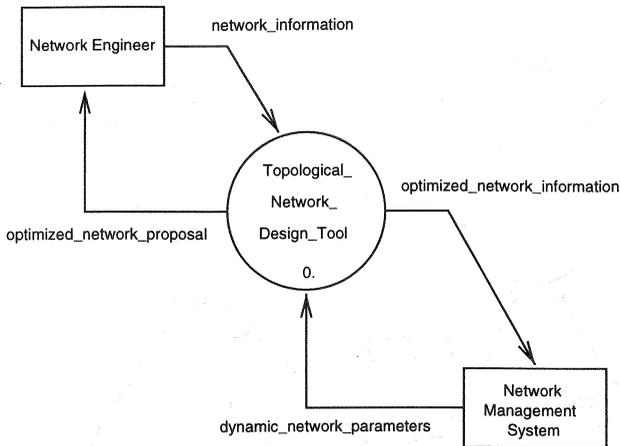


Abbildung 10.2: Kontextdiagramm

das System operieren soll und legt die Grenzen und Schnittstellen des Systems fest. Das diese Stufe repräsentierende Diagramm wird Kontextdiagramm<sup>4</sup> (*Context Diagram*) genannt und ist in Abbildung 10.2 angegeben. Für das TND Tool wurde die Interaktion mit zwei externen Systemen vorgesehen. Auf der einen Seite ist der Netzplaner, der durch Bereitstellung der erforderlichen Informationen die angebotenen Funktionalitäten des Werkzeugs in Anspruch nimmt und den Fortlauf der Optimierung mit seinen Entscheidungen, basierend auf den von Werkzeugen berechneten Vorschlägen, bestimmen kann.

Auf der anderen Seite ist die Interaktion mit einem Netzmanagementsystem<sup>5</sup> vorgesehen, das Lösungen zu neuen Problemsituationen in einem operierenden Netz sucht. Werden Fehlersituationen, wie z.B. Überlast einer Verbindung, durch Ereignisse dem Netzmanager oder direkt dem TND Tool angemeldet, so kann der Fehler kurzfristig durch optimale Änderung der Wegewahl und langfristig durch eine Rekonfiguration der kritischen und

<sup>4</sup>Ein Kontextdiagramm ist ein spezielles Datenflußdiagramm, das über zwei Datenflußdiagramm-Bausteinararten verfügt, nämlich die Bausteine Terminator und Prozeß (s. App. B).

<sup>5</sup>Unter einem Netzmanagementsystem versteht man die Aktivitäten, die zur Steuerung, Koordination und Überwachung der Ressourcen notwendig sind [64, 54].

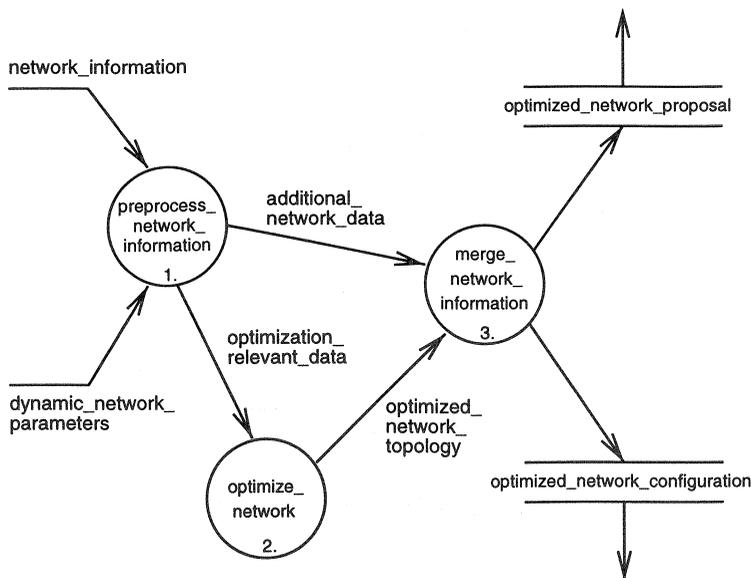


Abbildung 10.3: Datenflußdiagramm (DFD-0): TND Tool

den Fehler verursachenden Netzelemente behoben werden. Der Netzmanagementaspekt des Werkzeugs wird im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt, weil er ein Netz im Betrieb voraussetzt und über die Zielsetzung der Arbeit hinausgeht.

Die nächste Hierarchiestufe des TND Tool ist in Abbildung 10.3 dargestellt. Auf dieser Stufe werden die Eingabedaten evtl. vorbereitet, die Optimierungsaufgabe wird ausgeführt, und die Ergebnisse werden dem Netzplaner präsentiert.

Die Vorbereitung der Eingabedaten besteht darin, die für einen speziellen „Optimierungsvorgang“ notwendigen Daten aus der Datenbank (s. Abs. 10.2.4), Benutzereingaben und interne Berechnungen zusammenzustellen, wie z.B. Verkehrsanforderungen zwischen den Quellen und Senken des Verkehrs, Blockierungstabelle und netzelementspezifische Daten (s. Abb. 10.4). Die Zielfunktion und die Eingabedaten spannen den Lösungsraum des Problems auf, aus dem dann nach der Bewertung eine Lösung gewählt wird. Die generierten Lösungen können auch als Grundlage für

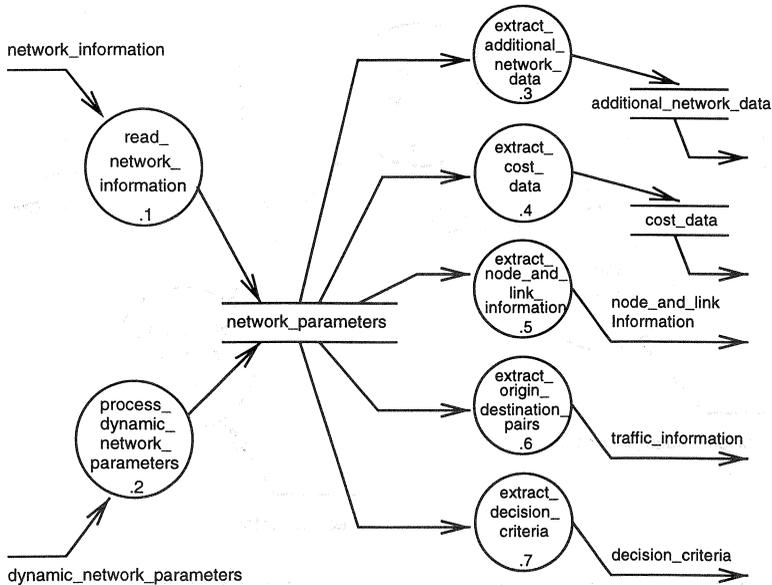


Abbildung 10.4: Datenflußdiagramm (DFD-1): Vorbereitung der Eingabedaten

weitere Optimierungsschritte dienen.

Die vorbereiteten Daten werden zur Ausführung der Optimierung dem Kernmodul des Systems Optimierungsmodul (s. Abs. 10.2.2) übergeben. Eine grobe Spezifikation des Optimierungsmoduls ist in Abbildung 10.5 gegeben.

Die Ergebnisse der Optimierung werden dann in vertretbarer Form durch eine graphische Benutzeroberfläche dem Netzplaner präsentiert.

## 10.2 Organisation des Werkzeugs

Das Topologieoptimierungswerkzeug TND Tool wurde basierend auf der vorangehenden Anforderungsanalyse modular aufgebaut (s. Abb. 10.2). Man kann zwischen vier Hauptmodulen unterscheiden, nämlich Darstellungs-, Optimierungs-, Kostenberechnungs- und Datenbankmodul.

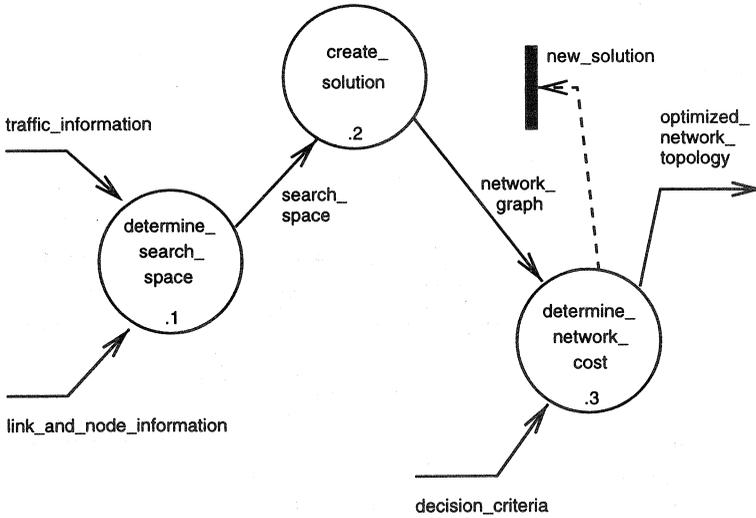


Abbildung 10.5: Datenflußdiagramm (DFD-2): Optimierungsmodul

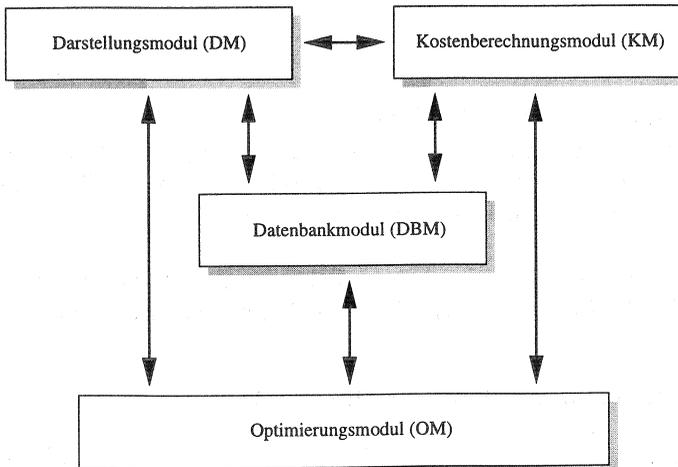


Abbildung 10.6: Hauptmodule von TND Tool

### 10.2.1 Darstellungsmodul

Das Darstellungsmodul ist hauptsächlich verantwortlich für:

- Interaktion mit dem Netzplaner,
- Koordination aller Aktivitäten und Funktionalitäten des Werkzeugs,
- Eingabe und Ausgabe von Daten,
- Darstellung der Optimierungsergebnisse,
- Graphische Bearbeitung der Netztopologie und Netzinformationen und
- Umschaltung zwischen verschiedenen Netzarten, wie z.B. Mobilfunknetzen, Computernetzen, lokalen Zugangnetzen usw..

Das Darstellungsmodul stellt die Schnittstelle des Werkzeugs zum Netzplaner zur Verfügung. Um den Umgang mit großen Datenmengen zu vereinfachen und die Ergebnisse besser visualisieren zu können wurde eine graphische Benutzeroberfläche in Motif entwickelt. In Abbildung 10.7 ist beispielhaft ein deutschlandweites Festnetz dargestellt.

### 10.2.2 Optimierungsmodul

Das Optimierungsmodul umfaßt die Optimierungsalgorithmen, die aufgrund der zugrundeliegenden Konzepte eine allgemeine Anwendung auf verschiedene Netztypen finden. Eine definierte Schnittstelle erlaubt mit minimalem Aufwand die Basismenge an Algorithmen zu erweitern. Die Erweiterbarkeit ist eine wesentliche Eigenschaft, da hierdurch das Anwendungsspektrum des Werkzeugs auch auf proprietäre Algorithmen ausgedehnt wird. Durch Vereinheitlichung der durch Algorithmen verwendeten Datenstrukturen und eine syntaktisch festgelegte Netzbeschreibung in einer Datei ist der optimale Grad der Kompatibilität zwischen den Algorithmen und dem Repräsentationsmodul erreicht worden. Die Umwandlung der Netzeigenschaften, wie z.B. die Koordinaten der Knoten, die Verkehrsbeziehungen zwischen Quellen und Senken und die Verbindungen zwischen den Knoten, in die Datei der Netzbeschreibung mit einer festen Syntax bietet eine einfache und effizient definierte Schnittstelle zur Außenwelt.

### 10.2.3 Kostenberechnungsmodul

Die Kosten eines Netzes bzw. eines Teilnetzes stellen die Grundlage der Entscheidungen innerhalb der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Opti-

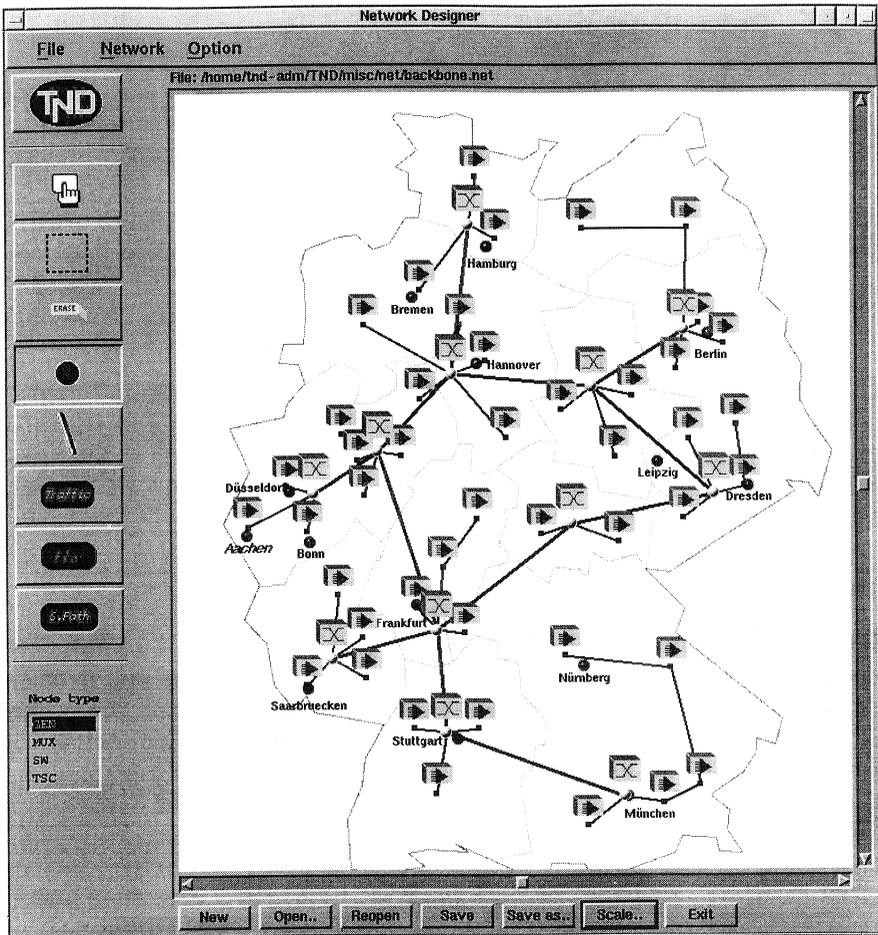


Abbildung 10.7: Graphische Benutzeroberfläche von TND Tool

mierungsverfahren dar. Die Kostenberechnung stellt i.d.R. den Flaschenhals der Netzoptimierungsalgorithmen dar, da ein Großteil der zur Optimierung benötigten Zeit für die Bewertung der Netze verwendet wird (s. auch Abs. 4). Das Kostenmodul ist eine strukturierte Ansammlung verschiedener Kostenfunktionen. Sie liegen entweder in Form mathematischer Funktionen für die

Algorithmenentwicklung und Tests oder als Regeln und Tabellen für die realitätsbezogene Kostenberechnung der Netzelemente vor. Durch die Möglichkeit der Integration von Tarifen verschiedener Hersteller ist es möglich, Netzlösungen bzgl. existierender Angebote zu prüfen. Durch die Einführung von Wettbewerb im Telekommunikationssektor gewinnt diese Variante der Netzuntersuchung in naher Zukunft an Bedeutung.

#### 10.2.4 Datenbankmodul

Die Netzoptimierungsalgorithmen manipulieren große Mengen an Daten. Sie benötigen auch viele Informationen, die nicht direkt in den Optimierungsprozeß eingehen, wie z.B. Adresse der Herstellerfirma oder die Leistung der Lüftungsanlage einer Vermittlungsstelle. Sie sind aber notwendig, wenn das reale Netz, basierend auf den Ergebnissen der Optimierung, installiert und dies dann in Betrieb genommen wird. Das Datenbankmodul sorgt für die effiziente Speicherung und den Zugriff auf alle innerhalb des Werkzeugs TND Tool benötigten Informationen. Um die Abhängigkeit von einem kommerziellen Datenbankprodukt zu vermeiden, sind die Daten zur Zeit in Daten mit relationaler Abhängigkeit mit effizienten Zugriffsroutinen gespeichert.



## Validierung des Netzentwurfs durch stochastische Simulation

Die Güte der aus einem Netzplanungsprozeß stammenden Netzlösungen beruht hauptsächlich auf der zugrundeliegenden Modellierung, der Zuverlässigkeit der Eingabedaten und der Lösungsmethodik. Mit der Entwicklung der in dieser Arbeit vorgestellten stochastischen Algorithmen wurde für die Bereiche Modellierung und Lösungsmethodik ein fundamentaler Beitrag geleistet. Die Zuverlässigkeit der Eingabedaten wird oft dadurch vermindert, daß die benötigten Daten nicht verfügbar sind und sinnvolle Annahmen und Prognosen erforderlich sind, wie z.B. die Verkehrsanforderungen zwischen den Kommunikationsknoten vor der Inbetriebnahme eines Telekommunikationsnetzes (s. auch Abs. 5). Die korrekte Ausführung der Lösungsmethode sichert die Optimalität der Netzlösung für die verwendete Modellierung und die angenommenen Eingabedaten. Die Netzoptimierungsverfahren stützen sich aber oft auf die statistischen Erwartungswerte der Eingabedaten, wie z.B. bei den Verkehrsannahmen. Die stochastische Simulation der aus Optimierungsverfahren resultierenden Netzlösungen ermöglicht nachzuprüfen, ob alle geforderten Dienstgüteparameter eingehalten werden. Aus diesem Grund ist die Quasi-Validierung der Netzlösungen durch Abbildung ihrer Funktionalität im Betrieb mittels eines Simulators zweckmäßig bzw. erforderlich.

In diesem Kapitel wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte ereignisgesteuerte Simulationssystem TRANSIT (*TRANsport Network Simulation Tool*) für die Bewertung und Validierung von Telekommunikationsnetzen vorgestellt. Nach einer Beschreibung der Modellierung und des Simulatorenaufbaus wird auf sein Anwendungsspektrum eingegangen.

## 11.1 Modellierung der Netzelemente

Zur ereignisgesteuerten und dezentralen Simulation der Netztopologie muß die Topologie auf die Simulationsstruktur abgebildet werden. Aus der Sicht der Simulation wird zwischen drei Netzelementmodellen unterschieden, Generatormodell, Knotenmodell und Verbindungsmodell. Die Verkehrssenke wird nicht explizit modelliert, ist jedoch in der Lage, den eingehenden Verkehr aufzunehmen und zu kommunizieren. Die Modellierung des Gesamtnetzes ergibt sich dann aus der Summe der miteinander verbundenen Einzelmodelle, deren Modellierung mit Hilfe von Warteschlangennetzen realisiert wird. Ein Warteschlangennetz ist ein Zusammenschluß von Warteschlangensystemen, das jedes für sich ein stochastisches Modell für eine leistungserbringende Einheit darstellt.

### Generatormodell

Das Modell eines Lastgenerator-knotens bestimmt als verkehrserzeugendes Element Zeitpunkt, Umfang, Quelle und Ziel einer Verkehrsanforderung. Ein Lastgenerator-knoten verfügt nicht über die Eigenschaft der Verkehrslenkung.

### Knotenmodell

Das Modell eines Netzknotens ermöglicht Verbindungsstrecken zwischen den Lastgenerator-knoten aufzubauen. Es kann wahlweise ein wegeselektierendes Netzelement repräsentieren, wie z.B. Vermittlungsstelle (SW), Hauptvermittlungstelle (HVSt) oder Mobilvermittlungstelle (MSC), oder auch ein nicht-wegeselektierendes, wie z.B. ein Konzentrador oder Multiplexer (MUX). Außerdem erlaubt das Modell blockierend auf den Rest des Netzes durch die limitierten Ressourcen in diesem Netzknotentyp zu wirken. Charakteristisch ist, daß ein Knotenmodell keinen Beitrag zur Verkehrslast liefert, sondern nur dessen Verteilung im Netz steuern kann.

### Verbindungsmodell

Das Modell einer Verbindung dient der Übermittlung von Anforderungen, Freigaben oder anderen Nachrichten und wirkt auf das übrige Netz wegen der knappen Ressourcen blockierend, d.h. für jede Verbindung wird eine bestimmte Kapazität des Übertragungsmediums belegt, sofern vorhanden,

andererseits wird die Verbindung (nach Ausschöpfung der alternativen Routingverfahren) blockiert. Es trägt keinen Verkehr zu dem Verkehrsaufkommen bei.

## 11.2 Simulatorenbau

Der Simulator TRANSIT basiert auf einem dezentralen Modell mit lokaler Datenhaltung. Alle verfügbaren Ressourcen im simulierten Netz werden lokal durch die entsprechenden Ereignisbearbeiter (*Event Handler*) verwaltet. Die Anforderungen und die Freigabe von Ressourcen sowie die Reaktionen auf die Netzereignisse finden ausschließlich zwischen den beteiligten Ereignisbearbeitern statt (s. Abb. 11.1). Die Generatorknoten fordern Netzbetriebsmittel an, wobei die Netzknoten und Verbindungen dem Netz Betriebsmittel zur Verfügung stellen. Die Betriebsmittelanforderungen der Generatorknoten dienen dazu, Kanäle in dem benötigten Maß von beliebigen Generatorknoten zu anderen Generatorknoten aufzubauen.

Ein Netzobjekt wird durch genau eine Ereignisbearbeiterinstanz realisiert. Die Instanzen kommunizieren durch Austausch von Ereignissen bzw. Nachrichten. Ein logisch direkter Austausch von Ereignissen wird programmtechnisch zentral von einem Systemereignisverwalter abgewickelt.

Der Simulator bietet den Ereignisbearbeiterinstanzen verschiedene Dienste zur Beschaffung von Information, nämlich den Topologiedienst, den Routingdienst und den Ereignisbearbeiterdienst.

Der Topologiedienst liefert Informationen bzgl. der Netztopologie, wie z.B. mit welchen Knoten eine Verbindung benachbart ist.

Alle routingspezifischen Informationsabfragen werden durch den Routingdienst bereitgestellt. Hierzu zählen die Ermittlung des initialen Leitwegs von einem Knoten aus sowie die Alternativleitwegbestimmung nach einer auftretenden Blockierung.

Der Ereignisbearbeiterdienst verfügt über die Informationen bzgl. der Beziehungen zwischen den topologischen Identifikatoren, wie z.B. Knotennamen, und Ereignisbearbeiterinstanzen.

## 11.3 Implementierung

Der Simulator TRANSIT wurde unter Zuhilfenahme der Simulationsbibliothek CNCL *Communication Networks Class Library* in der Programmier-

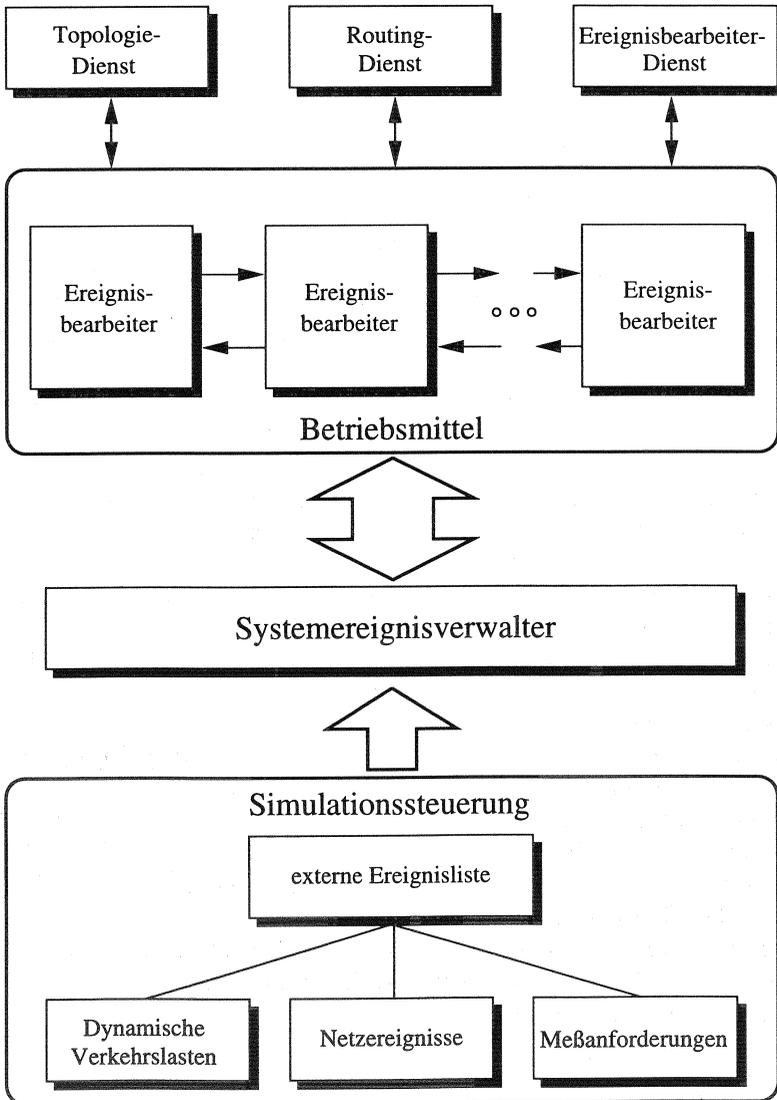


Abbildung 11.1: Schematische Darstellung des Simulatorenaufbaus

sprache C++ implementiert. Hierzu wurden die von CNCL bereitgestellten Funktionen für die Ereignissteuerung, Zufallszahlenerzeugung basierend auf Zufallsgeneratoren mit unterschiedlichen Verteilungen und schließlich die statistische Auswertung benutzt.

### 11.3.1 Simulationssteuerung

Die Simulationssteuerung im Simulator steuert über eine externe Ereignisliste den Verlauf einer Simulation (s. Abb. 11.1). Die Simulationssteuerung ist zuständig für:

- Weiterleitung der Netzereignisse, wie z.B. Knoten- bzw. Verbindungs- ausfall oder ihre Weitergabe zum entsprechenden Simulationszeitpunkt, an die entsprechenden Betriebsmittel,
- dynamische Einspeisung der Verkehrslasten zum korrekten Zeitpunkt der Simulation und
- Meßaufnahme von Betriebsmittelbelegungen und Parametern der Netzobjekte zu bestimmten Zeiten.

Die Anforderungen an das Netz werden in Ereignisform dargestellt und durch Systemereignisverwalter wie Systemereignisse abgewickelt. Hierzu wird eine externe Ereignisliste benutzt, die die Summe aller auf das Netz extern einwirkenden Ereignisse enthält [58]. Darüber hinaus ist die Möglichkeit gegeben, die simulierten Eigenschaften der realen Betriebsmittel durch eine Parameterbeschreibungsdatei zu modifizieren, wie z.B. Puffergröße einer Vermittlungsstelle oder die Verzögerungszeit einer Verbindung.

## 11.4 Wegewahl im Simulator

Der modulare Aufbau von TRANSIT setzt keine Grenzen bzgl. der für das zu simulierende Netz geltenden Wegewahlstrategie. Der Simulator ist in der Lage, alle statischen, quasistatischen und dynamischen Wegewahlstrategien zu benutzen, bei denen die Routenbestimmung vor Beginn der Simulation feststeht. Hierzu zählen die verschiedenen Variationen des Minhop-Verfahrens und der geometrischen Verfahren. Enthält die Wegewahltable eines zu simulierenden Netzes mehrere Wege von einem Quell- zu einem Zielknoten und weitere Alternativwege von den Transitknoten zum Zielknoten, dann ist die Verbindungsaufbausteuerung durch die Verfahren Ursprungsknoten-

steuerung (*originating office control*) und fortlaufende Knotensteuerung (*sequential office control*) im Simulator möglich [21].

## 11.5 Validierung des Simulators

Durch eine verkehrstheoretische Analyse wurde der Simulator bzgl. der Zuverlässigkeit der gemessenen Ergebnisse validiert. Die Untersuchungen wurden anhand eines symmetrischen und eines nicht-symmetrischen Netzes, bestehend jeweils aus drei Knoten, durchgeführt. Die Ergebnisse aus den verkehrstheoretischen Untersuchungen und den Simulationen stimmen in allen Fällen überein [56].

## 11.6 Anwendungsspektrum des Simulators

Der Simulator TRANSIT ermöglicht zusätzlich zur Quasi-Validierung der Netzentwurfsergebnisse, auch rückwirkend den Netzplanungsprozeß zu beeinflussen. Hiermit läßt sich das Anwendungsspektrum des Simulators von der Ist-Zustandanalyse eines Netzes auf einen bestimmten Sollzustand zu erstrecken. Unter Ist-Zustandanalyse versteht man Aktivitäten wie die Messung und Überprüfung der Dienstgüteparameter. Der Sollzustand eines Netzes kann durch die Beeinflussung der Betriebsparameter erreicht werden, wobei sich dann die gewünschten Netzcharakteristika ergeben. Weiterhin ist es möglich, makroskopische bzw. das ganze Netz betreffende Güteparameter, wie z.B. Stabilität eines Netzes, mit Hilfe des Simulators zu untersuchen. Der Simulator als Werkzeug zur Quasivalidierung vorgegebener Leistungsmerkmale von Telekommunikationsnetzen ermöglicht:

- Messungen an den Betriebsmitteln, wie:
  - Knotenblockierungen aufgrund beschränkter Raum-/Zeitkoppler-Kapazität und Prozessorleistung,
  - Verbindungsblockierung
  - Knotenauslastung der Raum-/Zeitkoppler
  - Auslastung der Prozessoren
  - Auslastung der Verbindungen
- Messungen von Dienstgüteparametern, darunter:
  - Verbindungsaufbauzeiten
  - Ende-zu-Ende-Blockierung
  - Ende-zu-Ende-Verzögerung

- Untersuchung des Netzverhaltens bzgl. folgender Verkehrsparameter:
  - Realisierung dynamischer Verkehrslasten
  - Ausfall von Netzbetriebsmitteln
  - Verkehrsverhalten der Teilnehmer
- Detektion und Beseitigung von Engpässen
- Verbesserungsvorschläge für bestehende Netze durch
  - Mindestdimensionierung
  - geeignete Wegwahlstrategie
- Einsatz zu Prognosezwecken

Damit ist es möglich, werkzeuggestützt eine vollständige Analyse des Netzentwurfs bzgl. aller denkbaren Dienstgüteparameter vorzunehmen.



# Anwendung der Werkzeuge

Das Anwendungsspektrum der in Kap. 10 und 11 vorgestellten Werkzeuge TND Tool und TRANSIT erstreckt sich über verschiedene und wichtige Netzplanungsaufgaben. Aufgrund der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse wird generell die Netzplanung als ein iterativer Prozeß in vier voneinander abhängigen Phasen unterteilt.

1. Topologieentwurf und -optimierung
2. Wegewahlentwurf und -optimierung
3. Validierung der Ergebnisse
4. Feinoptimierung

Die Phase des Topologieentwurfs und der -optimierung ermittelt für eine bestimmte Wegewahlstrategie die optimale Netztopologie. Diese Phase umfaßt außerdem alle Modifikationen eines bestehenden Netzes mit dem Ziel, die neuen Anforderungen an das Netz zu erfüllen. Andererseits ist es denkbar, für eine bestimmte Netztopologie mit Hilfe der Phase 2 die optimale Wegewahl herauszufinden. Die Validierung (Phase 3) wird von jeder Phase benutzt, um einerseits die Einhaltung der Dienstgüteparameter nachzuprüfen, andererseits Rückschlüsse auf Verbesserungsmöglichkeiten zu ziehen. Die Feinoptimierung (Phase 4) ermöglicht Teile des Netzes unter bestimmten problemspezifischen Rahmenbedingungen neu zu entwerfen und zu optimieren.

In diesem Kapitel werden anhand von Szenario 16 (s. Kap. 5) einige Anwendungsmöglichkeiten der entwickelten Werkzeuge und die Vorgehensweise bei der Netzplanung exemplarisch demonstriert.

## 12.1 Topologieentwurf und -optimierung

In dieser Phase wird die Topologie eines Netzes festgelegt. Man kann zwischen verschiedenen Verfahren unterscheiden.

- Manueller Netzentwurf
- Stufenweiser Netzentwurf
- Globaler Netzentwurf

### 12.1.1 Manueller Netzentwurf

Unter manuellem Netzentwurf wird in dieser Arbeit die Planung eines Netzes ohne Zuhilfenahme der Netzplanungswerkzeuge verstanden. Der Netzplaner legt nach seinen Erfahrungen und Kriterien die Struktur des Netzes fest. Das Netz wird dimensioniert, und die Kosten werden ermittelt. Falls das Netz vor Inbetriebnahme nicht simuliert wird, werden die Schwachstellen im Netz erst durch Messungen im Betrieb erkannt und müssen dann durch entsprechende Maßnahmen behoben werden. Diese Vorgehensweise ist aufgrund der Größe und Komplexität der heutigen Telekommunikationsnetze nicht mehr akzeptabel.

Der manuelle Netzentwurf wird von TND Tool durch verschiedene Hilfsmittel, wie z.B. den Netzeditor unterstützt. Hierbei kann man von Optimalität eines Entwurfs, wenn überhaupt, nur bzgl. der Fähigkeiten des Planers sprechen.

### 12.1.2 Stufenweiser Netzentwurf

Der Topologieentwurf eines Netzes kann in mehreren aufeinanderfolgenden Stufen stattfinden, die, mittels spezifischer Werkzeuge, automatisiert worden sind. Der Vorteil dieser Methode ist, daß man immer ein überschaubares Problem zu lösen hat. Der Nachteil ist, daß nicht alle Nebenbedingungen gleichzeitig berücksichtigt werden. Der Grad der Optimalität ist hier durch die den Werkzeugen zugrundegelegten Algorithmen gewährleistet, die man zum Netzentwurf benutzt.

Für Szenario 16 wurde z.B. das Netz in Abb. 12.1 mit folgenden Forderungen entworfen.

1. Die Netze zwischen NT- und MUX-Knoten sollen eine hybride Struktur mit einem Baumgrad von  $\alpha = 0,8$  besitzen<sup>1</sup>.
2. Die Netze zwischen MUX- und SW-Knoten sollen eine hybride Struktur mit einem Baumgrad von  $0,3$  besitzen.

---

<sup>1</sup>Die Baumgradskala erstreckt sich von  $\alpha = 0$  für einen minimalen Spannbaum bis  $\alpha = 1$  für eine sternförmige Struktur (s. HS-Algorithmus S. 82).

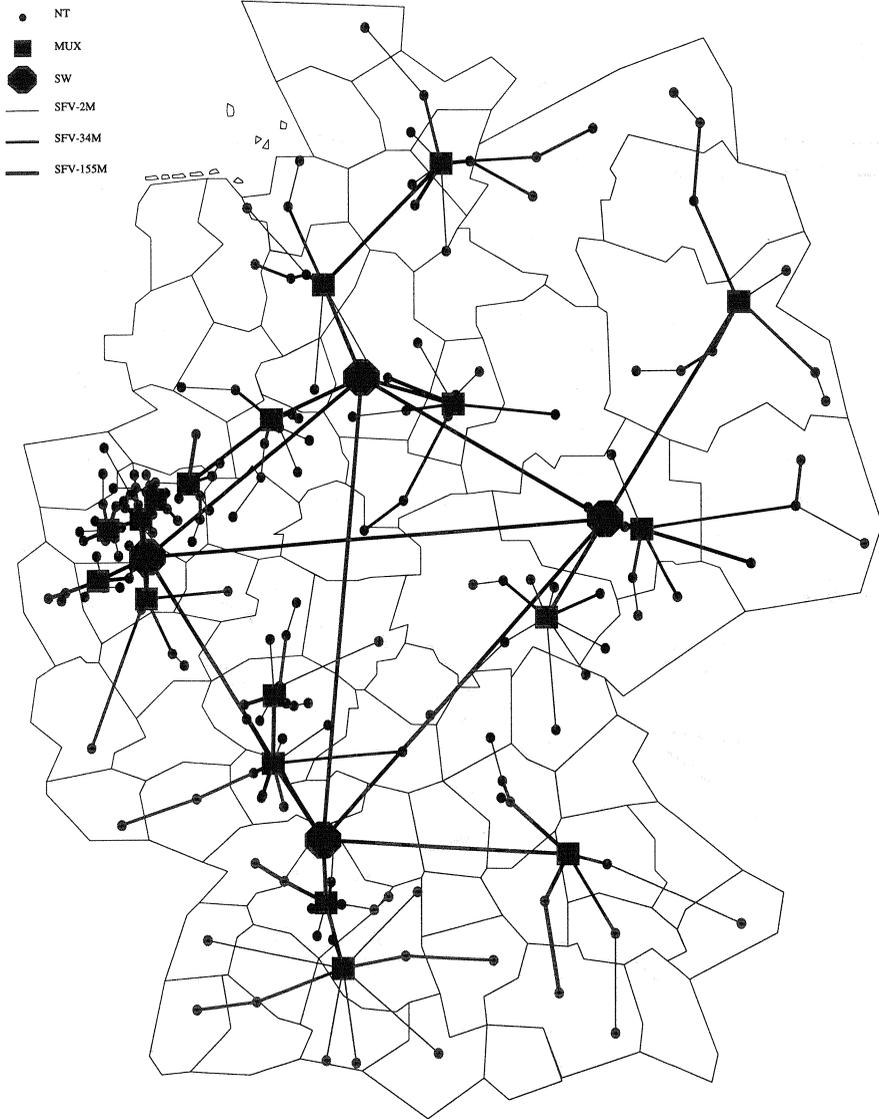


Abbildung 12.1: Stufenweiser Netzentwurf

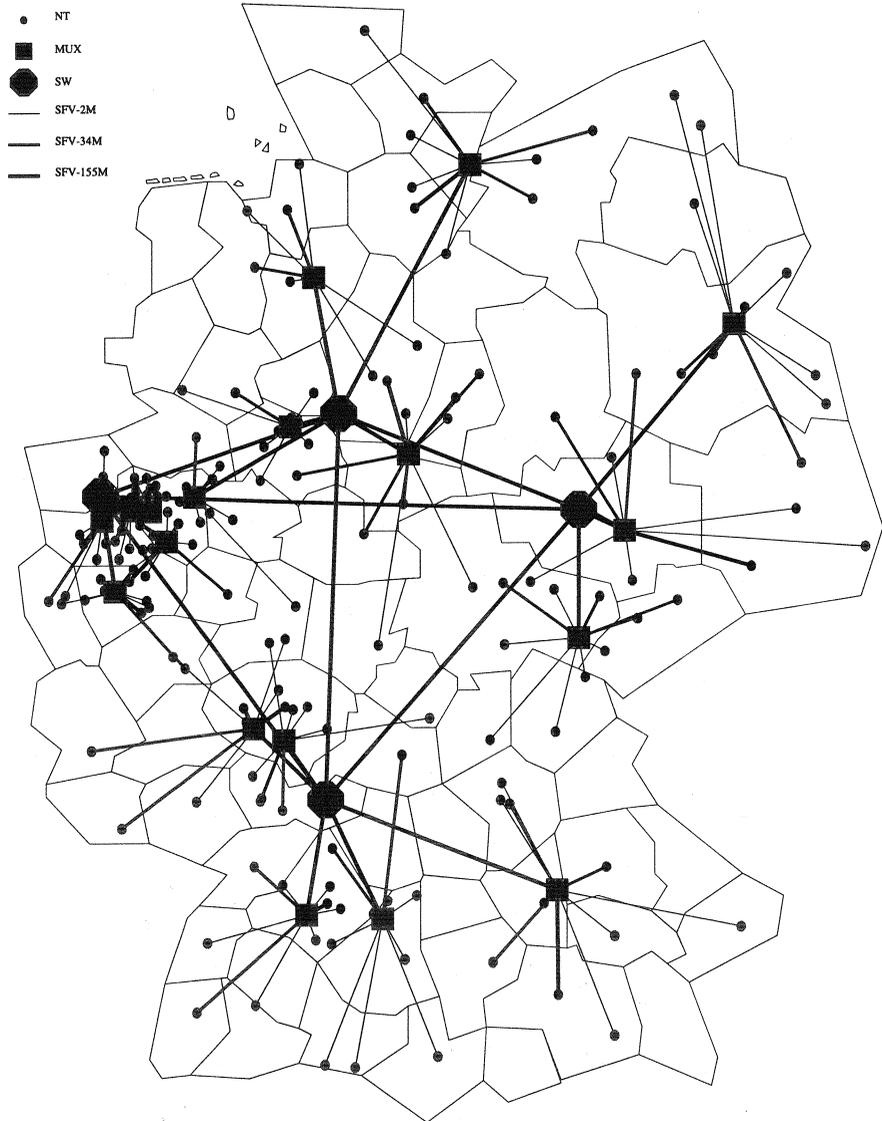


Abbildung 12.2: Netzentwurf basierend auf Verkehrsschwerpunkten

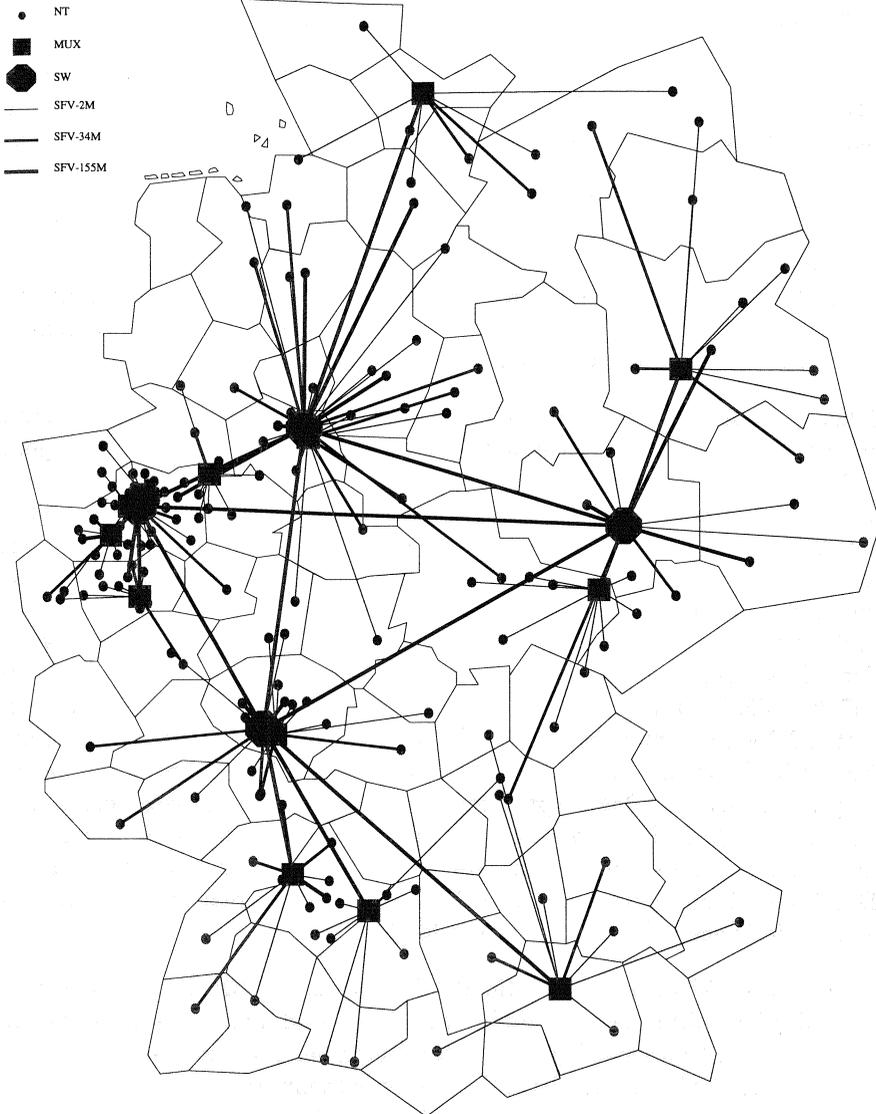


Abbildung 12.3: Netzentwurf basierend auf Verkehrsschwerpunkten und Reoptimierung

3. Das Netz zwischen SW-Knoten soll vollvermascht sein.

Somit liegt die Netzstruktur fest. Unter der Voraussetzung einer Wegewahlstrategie kann man den Verkehr auf den Verbindungen bestimmen. Das Beispielnetz von Szenario 16 muß z.B. folgende Nebenbedingungen erfüllen:

4. die Wegewahlstrategie soll der kürzeste Einpfad sein.
5. die Blockierung auf jeder Verbindung soll den Wert 0,1% nicht überschreiten.
6. Für die Verbindungen sollen die Tarife der Standardfestverbindungen der DEUTSCHEN TELEKOM AG und für Knoten feste Kosten gemäß Angaben im App. C gelten.

Jetzt ist man in der Lage das Netz zu dimensionieren und die Kosten zu ermitteln. Die Gesamtkosten des Beispielnetzes in Abb. 12.1 betragen: 173.159.888,00 DM.

Verwendet man die Verkehrsschwerpunkte, mit der Nebenbedingung, daß die Anschlußkapazitäten der MUX-Knoten max. 10 und der SW-Knoten max. 5 sind, dann erhält man das in Abb. 12.2 dargestellte Netz. Dabei sind für die obigen Nebenbedingungen 1 und 2 ein Baumgrad von 1 und ein vollvermaschtes Netz zwischen den SW-Knoten angenommen worden. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Gesamtkosten des Netzes auf 167.265.136,00 DM zu reduzieren. Eine weitere Optimierung des Netzes in Abb. 12.2 wurde unter der gleichen Nebenbedingungen erzielt, indem dieses Netz mittels des zufallsgesteuerten Algorithmus „Simulierten Ausglühens“ reoptimiert wurde. Das reoptimierte Netz ist mit den Gesamtkosten von 145.120.416,00 DM in Abb. 12.3 dargestellt worden. Dieses Netz wird für die weiteren Untersuchungen in Abschnitten 12.2 und 12.3 benutzt werden. Durch die Simulation des in Abb. 12.3 dargestellten reoptimierten Netzes wurde die Dienstgüte des Netzes wie folgt validiert:

- Alle Linkblockierungen<sup>2</sup> für die Normallast — für diese Last wurde das Netz dimensioniert und optimiert — sind kleiner als 0,1%, wie in Abb. 12.4 dargestellt ist. Die Zuordnung der Linkindizes in Abb. 12.4 zu den Links ist aus der Tab. D.1 zu entnehmen.
- Die mittlere Ende-zu-Ende-Blockierung der Verkehrsquellen für die Normallast liegt unterhalb 0,2%, vgl. Abb. 12.5. Diese Blockierung

---

<sup>2</sup>Unter einem Link ist die Verbindung zwischen zwei Netzknoten zu verstehen.

ist die mittlere Blockierung, die ein NT-Knoten erfährt. Eine Liste der Knoten und dazugehörigen Indizes ist in Tab. D.1 zu finden.

- Die Abb. 12.6 zeigt die mittlere Linkauslastung für alle Links im Netz. Es ist wichtig, daß die Links auf Backboneebene relativ gut ausgelastet sind, da auf diesem Wege die Wirtschaftlichkeit des Netzes gewährleistet ist. Für das Beispielnetz aus Abb. 12.3 sind die Links mit den Indizes 178 bis 201 z.T. über 95% ausgelastet. Die Links zwischen NT- und MUX-Knoten sind naturgemäß geringer ausgelastet, weil nur gewisse Linkkapazitäten zur Wahl stehen.
- Die Auslastung der Knoten MUX und SW, d.h. Raum-Zeit-Koppler, kann aus der Abb. 12.7 entnommen werden. Da die SW-Knoten die Aufgabe der Vermittlung im vorgestellten Netz erfüllen, sind sie auch stärker als die MUX-Knoten ausgelastet, vgl. hierzu Knotenindizes 196 bis 199 in Abb. 12.7.

Für die Simulationsergebnisse in diesem Kapitel wurde angenommen:

1. Knoten sind nicht blockierend, bzw. Bediendauer  $\rightarrow 0$ .
2. Die Kapazität des Raum-Zeit-Kopplers ist 10.000 Erl., d.h. 10.000 Verbindungen können gleichzeitig vermittelt werden.
3. Für die Gesprächsdauer wurde eine negativ exponentielle Verteilung mit einem Mittelwert von 90s angenommen.
4. Es wurden 10.000 Sekunden simuliert.

### 12.1.3 Globaler Netzentwurf

Der globale Netzentwurf basiert auf dem Grundgedanken, alle einschränkenden Bedingungen des Topologieoptimierungsproblems gleichzeitig zu berücksichtigen und dabei die durch evtl. Zerlegung des Problems und das Zusammenführen der Ergebnisse entstehenden Fehler und Ungenauigkeiten zu vermeiden. Die hierbei erzielten Lösungen gelten bzgl. des zu lösenden Problems global. Zur Entwicklung der hierfür geeigneten Werkzeuge wurden die Prinzipien der stochastischen Algorithmen verwendet. Zum globalen Netzentwurf werden die zufallsgesteuerten Algorithmen „Simuliertes Ausglühen“ und „Genetischen Algorithmen“ (s. Kap. 8 und 9) verwandt. Um die Effizienz der zufallsgesteuerten Algorithmen zu erhöhen, ist es sinnvoll, möglichst nur die wesentlichen Nebenbedingungen in der Modellierung des Problems zu benutzen. Diese Algorithmen eignen sich insbesondere zum ersten Grobentwurf des Netzes. Die Feinoptimierung kann dann anhand des

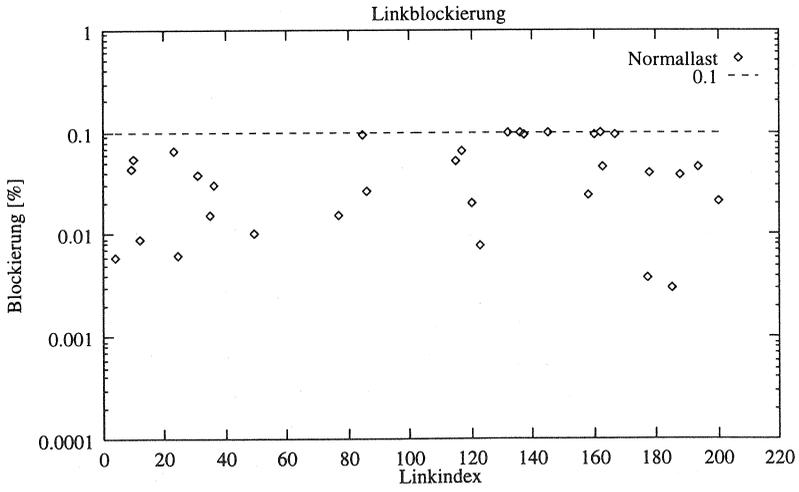


Abbildung 12.4: Linkblockierung für das Netz aus Abb. 12.3

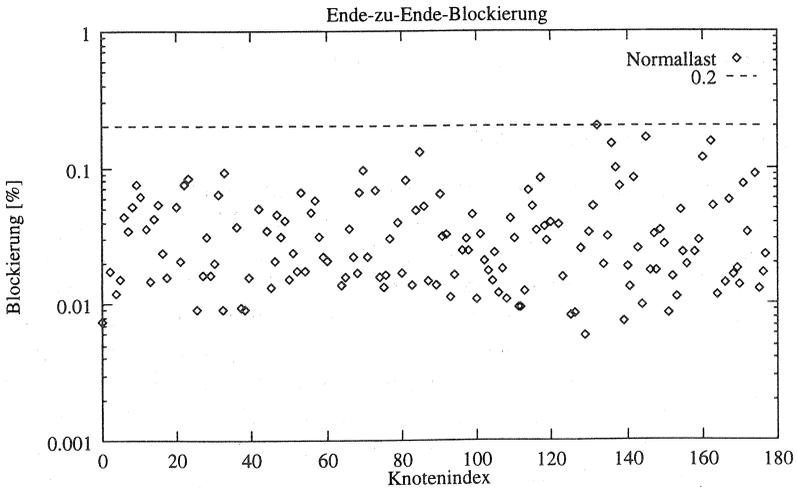


Abbildung 12.5: Ende-zu-Ende Blockierung für das Netz aus Abb. 12.3

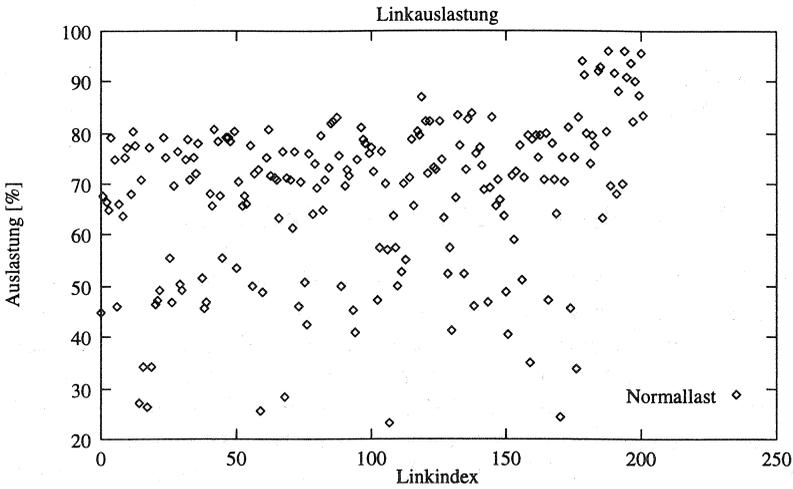


Abbildung 12.6: Linkauslastung für das Netz aus Abb. 12.3

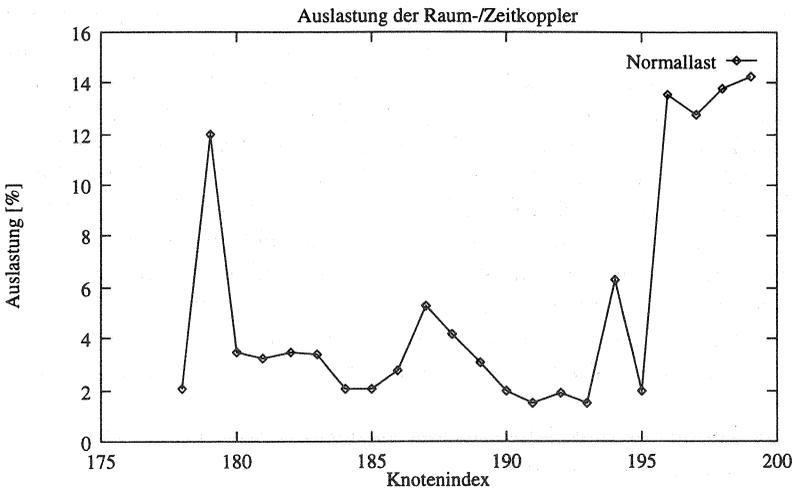


Abbildung 12.7: MUX- und SW-Auslastung für das Netz aus Abb. 12.3

grobentworfenen Netzes, wie z.B. im Abschnitt 12.3 dargestellt, vorgenommen werden.

In Abbildung 12.8 wird für das Beispielnetz aus Szenario 16 das optimale, mit Hilfe des genetischen Algorithmus berechnete Netz angegeben. Die Gesamtkosten des Beispielnetzes in Abb. 12.8 betragen: 142.808.704,00 DM.

## 12.2 Wegewahlentwurf und -optimierung

In der Phase des Topologieentwurfs wurde die Topologie des Netzes unter einer gegebenen Wegewahlstrategie bestimmt, bzw. optimiert. In dieser Phase jedoch wird eine Wegewahlstrategie gesucht, bzw. die gegebene dahingehend optimiert, daß der Durchsatz im Netz erhöht wird und die Betriebsmittel optimal ausgelastet werden. So wird das Netz mit gleichen Kosten mehr Verkehr übermitteln, während die vorgeschriebene Dienstgüte eingehalten wird. Wegewahlentwurf stellt daher eine effiziente Komponente des Netzplanungsprozesses dar. Außerdem ist es durch Anpassung der Wegewahlstrategie an veränderte Lastsituationen möglich, die vorhandene Netzstruktur, zumindest für eine Übergangszeit, optimal zu nutzen und die Erweiterung der Netze optimaler zu gestalten. So ist auch der Trend von hierarchischen zu nichthierarchischen Wegewahlstrategien zu begründen. Darüber hinaus ändert sich die Belastung eines Netzes im Laufe eines Tages. Netze mit hierarchischer Wegewahlstrategie können als statisch betrachtet werden. Sie müssen daher auf die Spitzenbelastung hin ausgelegt sein, um zu jeder Tages- und Nachtzeit eine vorgegebene Dienstgüte bereitstellen zu können. Daraus folgt, daß ein Großteil der Netzkapazitäten zu Zeiten geringer Belastung nicht genutzt wird. Bei Verwendung einer nichthierarchischen Wegewahlstrategie besteht die Möglichkeit, solche vorhersehbaren Laständerungen in der Planung zu berücksichtigen und die Wegewahlstrategie an die jeweilige Lastsituation anzupassen. Dies wird durch die prinzipielle Gleichstellung aller Vermittlungsstellen ermöglicht. Das Netz kann dann u.U. die gleiche Last wie im hierarchischen Fall, unter Verwendung von weniger Ressourcen tragen.

Das Backbone des Beispielnetzes aus Szenario 16 wird für die zwei folgenden Wegewahlstrategien untersucht:

- **Kürzeste Einpfad-Wegewahlstrategie:** Verkehr zwischen zwei Vermittlungsknoten wird über einen einzelnen Weg mit kürzester Länge geführt.

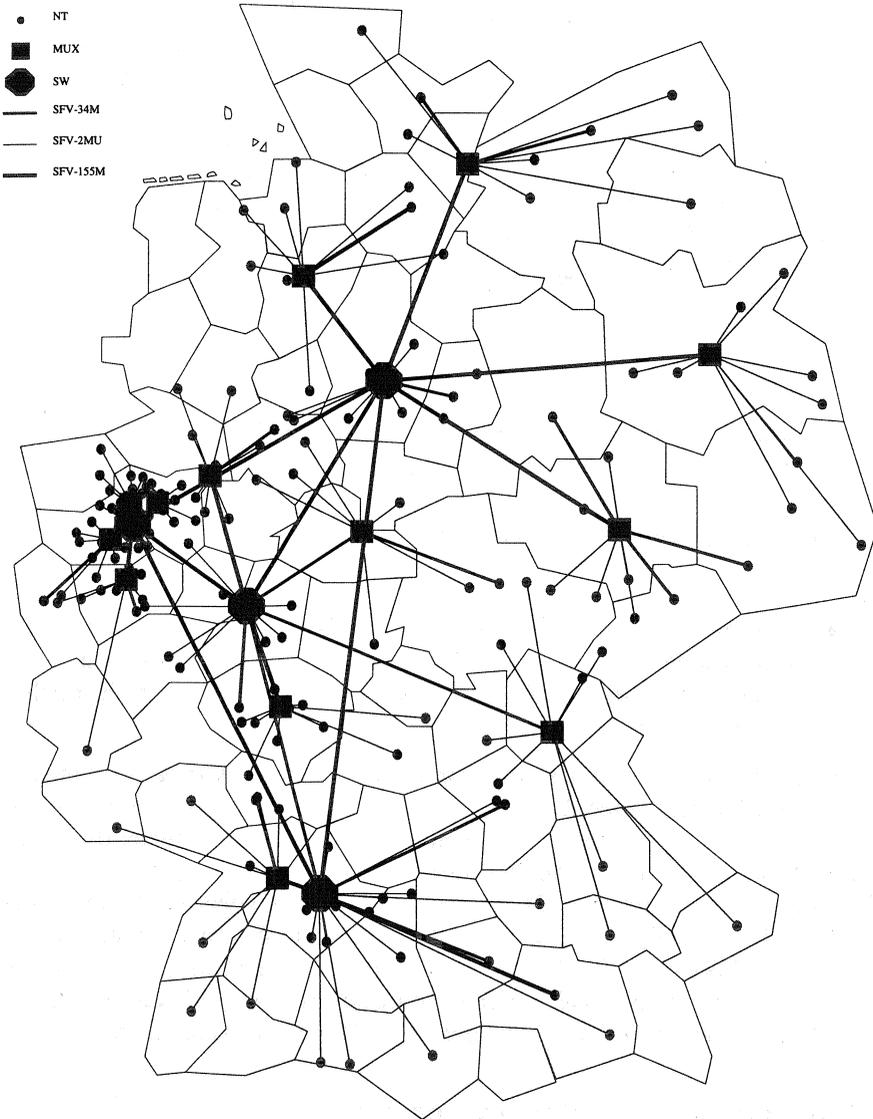


Abbildung 12.8: Globaler Netzentwurf mit genetischen Algorithmen

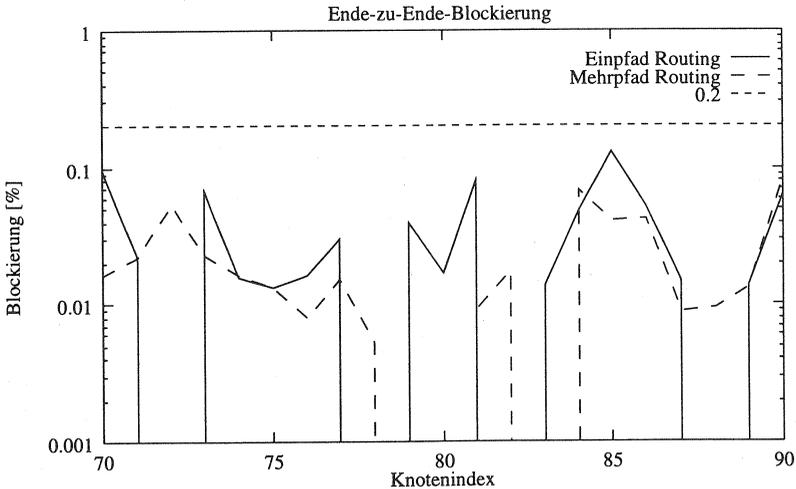


Abbildung 12.9: Ausschnitt aus der Ende-zu-Ende-Blockierungen der Knoten

- **Kürzeste Mehrpfad-Wegwahlstrategie:** Verkehr wird zwischen zwei Vermittlungsknoten zuerst auf dem kürzesten Pfad P1 und wenn nicht möglich auf dem nächst kürzesten, vom Pfad P1 unterschiedlichen Pfad geleitet.

Zur Demonstration wird das Netz von Abb. 12.3 unter Normallast betrachtet. Abb. 12.9 zeigt einen Ausschnitt aus der Ende-zu-Ende-Blockierung der Knoten. Durch die kürzeste Mehrpfad-Wegwahlstrategie sinken die Ende-zu-Ende-Blockierungen gegenüber der Einpfad-Wegwahlstrategie, falls die Links nicht überlastet sind. Die Blockierwahrscheinlichkeiten der einzelnen Links steigen dabei, wie in Abb. 12.10 dargestellt ist, erheblich an, da den einzelnen Links auch der Verkehr von anderen Pfaden angeboten werden kann. Ein weiteres Beispiel zur Dienstgüteverbesserung mittels verschiedener Wegwahlstrategien wird im folgenden Abschnitt besprochen.

### 12.3 Optimale Netzerweiterung

Soll das existierende Netz als Basis für die weitere Planung berücksichtigt werden, benötigt man modifizierte Verfahren, die mit den strengeren Ne-

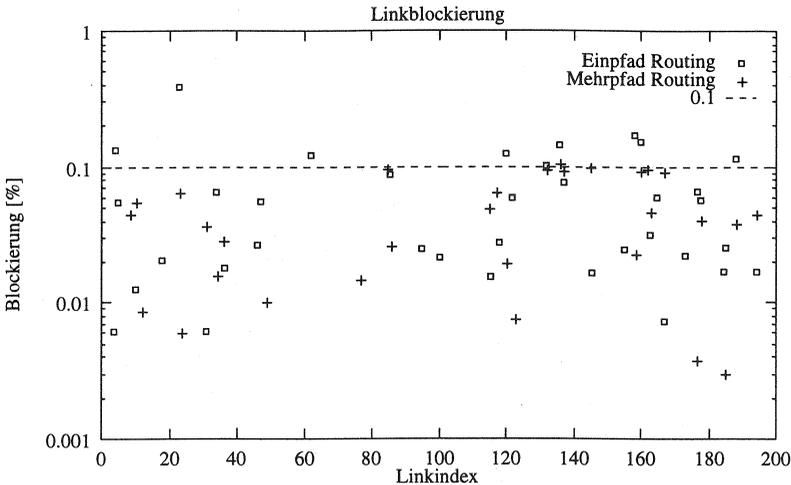


Abbildung 12.10: Linkblockierungen für zwei Wegwahlstrategien

benbedingungen effizient umgehen können. Sind z.B. die Orte der Knoten fest vorgegeben, kann eine Kostenreduktion durch Anzahl und Struktur der Verbindungen zwischen Knoten realisiert werden. Der oben beschriebene stufenweise Netzentwurf ist zum Zwecke der Netzerweiterung sehr geeignet, da die Teilaufgaben, die hier anfallen, sehr effizient mit zugeschnittenen Algorithmen gehandhabt werden können. Benötigt man Netzvorschlage für den aufgrund der Netzerweiterung entstandenen neuen Zustand, so kann man auch mit globalem Netzentwurf diesbezügliche Lösungsalternativen ermitteln.

Zur Demonstration der Netzerweiterung betrachten wir das Backbone-Netz aus Abb. 12.11 mit Überlast. Aus Veranschaulichungsgrunden wurden folgende Annahmen gemacht:

- alle Verbindungen besitzen 100 Kanäle außer Verbindung 5 (Hamburg — Frankfurt) mit 120 Kanälen.
- der Knotenverkehr beträgt 42 Erl.

Es wurden für das Netz aus Abb. 12.11 folgende Fälle simuliert:

- Einfad-Wegwahlstrategie
- Mehrfad-Wegwahlstrategie

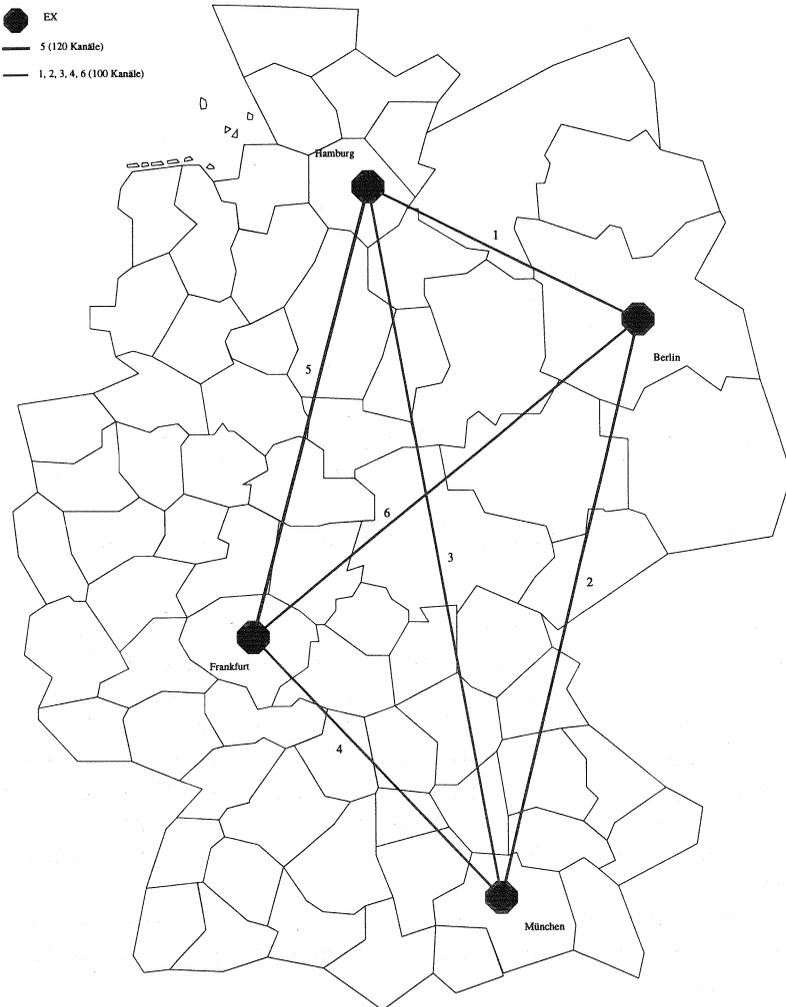


Abbildung 12.11: Backbone-Netz mit vier Knoten und vollvermascht

- Mehrpfad-Wegewahlstrategie mit Netzerweiterung; den Links 4 und 6 wurden jeweils 20 Kanäle hinzugefügt.

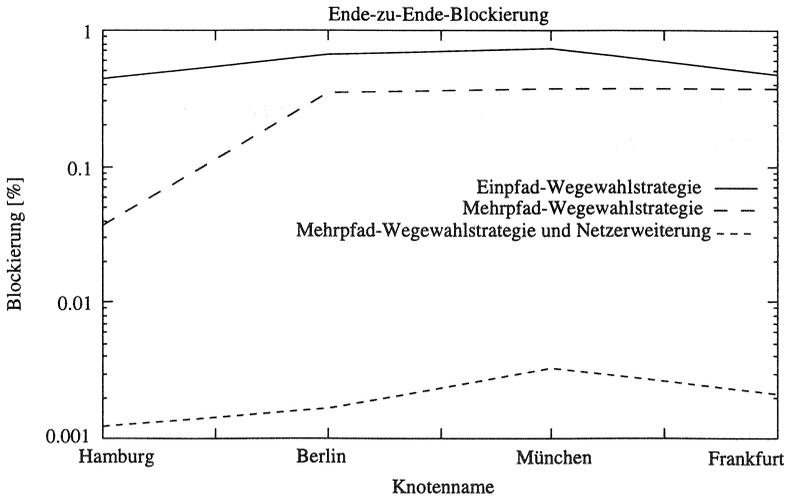


Abbildung 12.12: Ende-zu-Ende-Blockierungen für das Netz aus Abb. 12.11 bei Überlast

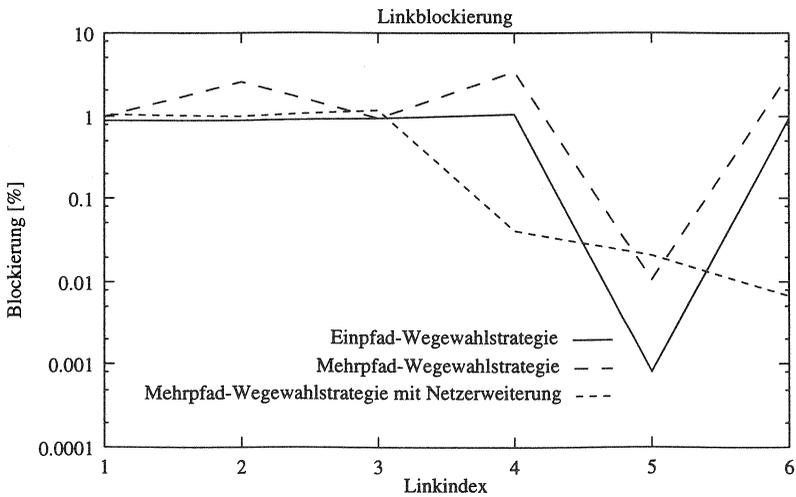


Abbildung 12.13: Linkblockierungen für das Netz aus Abb. 12.11 bei Überlast

Wie aus Abb. 12.12 zu sehen ist, wurde durch Hinzufügen von nur 20 Kanälen auf den Links 4 und 6 das Netz so erweitert, daß die Ende-zu-Ende-Blockierung unterhalb 0,1% gesunken ist. Die Linkblockierungen sind nur an Links 4 und 6 stark gesunken, da sie jetzt mehr Kanäle zur Verfügung haben, vgl. Abb. 12.13.

# Zusammenfassung und Ausblick

Die Topologie eines Telekommunikationsnetzes bestimmt im großen Maße das Investitionsvolumen zum Aufbau des Netzes. Aus diesem Grund stellt der kostenoptimale Topologieentwurf ein strategisches Mittel zur Eroberung und Verbesserung der Marktposition eines Netzbetreibers dar. Die bekannten Lösungsansätze zum Topologieentwurf berücksichtigen aufgrund der Problemkomplexität i.d.R. Teilprobleme und ermöglichen nur suboptimale Netzentwürfe. Die Entwicklung der Verfahren, die das Netz als Ganzes entwerfen, unter Berücksichtigung aller Rahmenbedingungen, ist für den Entwurf von dem Wettbewerb unterworfenen Telekommunikationsnetzen unabdingbar.

Die in dieser Arbeit entwickelten zufallsgesteuerten Topologieentwurfsalgorithmen erweisen sich als leistungsfähige und robuste Verfahren zum kostenoptimalen Topologieentwurf von Telekommunikationsnetzen. Sie eignen sich insbesondere für den optimalen Grobentwurf der Netze und erlauben die gesamte Netzstruktur ohne Zerlegung des Netzes zu entwerfen. Die zufallsgesteuerten Topologieentwurfsalgorithmen basieren auf den Prinzipien des „Simulierten Ausglühens“ (*Simulated Annealing, SA*) und der „Evolutionalgorithmen“ (*Evolutionary Algorithms, EA*). Diese Verfahren wurden in dieser Arbeit erstmals für den Netzentwurf eingesetzt. Zum Vergleich wurde ein modularer „Mehrstufiger Algorithmus“ (*Multi-step Topology Design Algorithm, MTDA*) entwickelt, der den optimalen Aufbau eines Telekommunikationsnetzes durch den optimalen Entwurf von Teilnetzen realisiert.

Eine charakteristische Eigenschaft der SA- und EA-Algorithmen besteht darin, daß sie wegen des zugrundeliegenden Zufallsprinzips in der Lage sind, die lokalen Optima zu verlassen, und die Möglichkeit gegeben ist, das globale Optimum zu erreichen. Die entwickelten SA- und EA-Algorithmen ermöglichen das Finden von guten Lösungen unabhängig von der Auswahl der Initialisierungslösung. Man spricht in diesem Fall von effizienten und robusten Algorithmen. Die Abhängigkeit der zufallsgesteuerten Topologieentwurfsal-

gorithmen von ihren Parametern wurde untersucht. Eine Feineinstellung in Bezug auf die in dieser Arbeit vorgestellte Netzstruktur und die Kostenstruktur wurde vorgenommen. Die Unterwerfung der Feineinstellung der Parameter unter den gleichen Algorithmus würde sich als sinnvoll erweisen. Die zur praktischen Umsetzung der in dieser Arbeit vorgestellten Algorithmen entwickelten Werkzeuge TND Tool (*Topological Network Design Tool*) und TRANSIT (*TRANsport Network SIMulation Tool*) ermöglichen praxisbezogene Netzentwurfsaufgaben effizient zu handhaben. TND Tool ist ein für den optimalen Entwurf von Telekommunikationsnetzen konzipiertes Werkzeug, das zufallsgesteuerte Topologieoptimierungsalgorithmen benutzt. Charakteristisch sind außerdem die Einfachheit der grundlegenden Konzepte, basierend auf der vorausgehenden und fundierten Anforderungsanalyse, der Erweiterbarkeit der Werkzeugmodule und der geeigneten Visualisierung aller interessanten Informationen und Ergebnisse. TRANSIT wurde zur Bewertung und Validierung von Ergebnisnetzen aus dem Topologieentwurf entwickelt. Hiermit ist es möglich, die Einhaltung der angestrebten Dienstgüteparameter und anderer Kenngrößen zu überprüfen. Das Anwendungsspektrum von TRANSIT erstreckt sich aber auch auf die partielle Netzerweiterung und -dimensionierung.

Aus den Untersuchungen zur optimalen Parametereinstellung der Verfahren ergibt sich der Vorschlag hybride Topologieentwurfverfahren einzusetzen. Man kann z.B. die zufallsgesteuerten Topologieentwurfsalgorithmen mit konventionellen Optimierungsverfahren, wie dem Gradientenverfahren<sup>1</sup>, kombinieren. Es ist dann möglich, für größere Probleme die Suche nach der optimalen Topologie mit einem zufallsgesteuerten Topologieentwurfsalgorithmus zu beginnen und zu einem günstigen Zeitpunkt auf ein Gradientenverfahren zur Konvergenz zum nächsten Optimum umzuschalten. Mittele große Probleme mit kleiner Zahl von Knoten und Kanten werden sehr gut von einem Gradientenverfahren unterstützt, dessen Schrittweite mittels zufallsgesteuerten Topologieentwurfsalgorithmen berechnet wird [26]. Somit ist es möglich, die Vorteile der Verfahren zu vereinigen und ihre gemeinsame Leistungsfähigkeit zu erhöhen. Die inhärente Parallelität erlaubt überdies die zum Topologieentwurf benötigte Zeit deutlich zu reduzieren.

Aufgrund der aus dem ständigen Zwang zur Anpassung an die veränderte Netzbelastung resultierenden Dynamik zukünftiger Telekommunikations-

---

<sup>1</sup>Das Gradientenverfahren ist ein Optimierungsverfahren, das die Fortbewegung im Lösungsraum nur in Richtung des stärksten Anstiegs erlaubt, d.h. des Gradienten der Zielfunktion.

netze erscheint es zweckmäßig, daß Netzentwurfalgorithmen aus dem gewonnenen Wissen während des Optimierungsprozesses lernen und das Wissen für weitere Optimierungsläufe verwenden. Die entsprechenden Verfahren sind noch zu entwickeln.

Die theoretischen und praktischen Resultate dieser Arbeit zeigen, daß die vorgestellten zufallsgesteuerten Verfahren einen wichtigen Beitrag zur Lösung des Topologieoptimierungsproblems leisten können.



## LITERATURVERZEICHNIS

---

- [1] Emile Aarts, Jan Korst. *Simulated Annealing and Boltzmann Machines*. John Wiley & Sons, 1990.
- [2] M. Abduh. *Entwurf eines Darstellungsmoduls für die topologische Netzplanung*. Master's thesis, Lehrstuhl Kommunikationsnetze, RWTH Aachen, Mai 1995.
- [3] I. Baybars, K. Kortanek. *Transmission Facility Planning in Telecommunications Networks: A Heuristic Approach*. European Journal of Operational Research, Vol. 16, pp. 59–83, 1984.
- [4] L. Berry, R. Harris. *Modular Design of a Large Metropolitan Telephone Network: A Case Study*. In *Proc. 11th Int. Teletraffic Congr.*, Kyoto, 1985.
- [5] L. T.M. Berry. *A Mathematical Model for Optimizing Telephone Network*. PhD thesis, University of Adelaide, December 1971.
- [6] A. Blaauw. *Optimal Design of Hierarchical Networks with Alternative Routing Based on Overall Grade of Service*. In *Proc. Int. Symposium on Network Planning*, Paris, 1980.
- [7] F. Boorstyn, H. Frank. *Large-scale network topological optimization*. IEEE, Transactions on communication, Vol. COM-25, No. 1, pp. 29–47, January 1977.
- [8] L. Camerini, P. Fratta, F. Maffioli, M. Bonatti, G. Gallasi. *A Dynamic Planning Method for Telecommunication Networks and its Performance Evaluation for District Trunk Networks*. In *Proc. 10th Int. Teletraffic Congr.*, Montreal, 1982.
- [9] CCITT. *General Network Planning (GAS-3)*, 1983.
- [10] D. Conrads. *Datenkommunikation: Verfahren - Netze - Dienste*. Vieweg, 1989.
- [11] T.H. Cormen, C.E. Leiserson, R.L. Rivest. *Introduction to Algorithms*. The MIT Press, 1990.

- [12] L. Davis. *Handbook of Genetic Algorithms*. Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [13] J.F.M. de Haan. *Untersuchung von Genetischen Algorithmen zum Topologie-Entwurf von Backbone-Netzen*. Master's thesis, Lehrstuhl Kommunikationsnetze, RWTH Aachen, 1996.
- [14] P.J. Douillez, M.R. Rao. *Optimal Network Capacity Planning: A Shortest Path Scheme*. Operation Research, Band 23, Nr. 4, pp. 811–817, 1975.
- [15] K. A. Dowsland. *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*, chapter 2. John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [16] ITU-T Recommendation E.175. *Models for International Network Planning*, 1993.
- [17] A. Eldin, Hrsg. *Basic Traffic Theory*, New Dehli, India, December 1975.
- [18] R. L. Freeman. *Telecommunication System Engineering – Analog and Digital Network Design*. John Wiley & Sons, 1980.
- [19] Bundesministerium für Post und Telekommunikation. *Amtsblatt*, 1994. Nr. 26.
- [20] B. Gavish, I. Neuman. *A System for Routing and Capacity Assignment in Computer Communications Networks*. IEEE Transactions on Communications, Vol. 37, No. 4, April 1989.
- [21] A. Girard. *Routing and dimensioning in circuit-switched networks*. Addison-Wesley, 1990.
- [22] D. E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, 1989.
- [23] E. P. Gould, C. D. Pack. *Communications Network Planning in the Evolving Information Age*. IEEE Communications Magazine, Vol. 25, No. 9, pp. 22–30, September 1987.
- [24] V. P. Gupta. *What is Network Planning?* IEEE Communications Magazine, Vol. 23, No. 10, pp. 10–16, October 1985.
- [25] D. J. Hatley, I. A. Pirbhai. *Strategies for Real-Time System Specification*. Dorset House Publishing Co, Inc., 353 West 12th St., New York NY 10014, 1988.

- [26] J. Heistermann. *Genetische Algorithmen: Theorie und Praxis evolutionärer Optimierung*. Teubner, 1994.
- [27] G. Held. *Practical Network Design techniques*. John Wiley & Sons Ltd., 1991.
- [28] J. H. Holland. *Adaption in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, The University of Michigan Press, 1975.
- [29] F. Hoßfeld. *Algorithmen für Parallelrechner*. Vorlesungsumdruck, Lehrstuhl für Technische Informatik und Computerwissenschaften, RWTH Aachen, 1990.
- [30] Institut für Angewandte Geodäsie, Richard-Strauss-Alle 11 D-60598 Frankfurt am Main. *Datei Geographischer Namen – Bundesrepublik Deutschland*, 1995.
- [31] D. Jungnickel. *Graphen, Netzwerke und Algorithmen*. BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim; Wien; Zürich, 1990.
- [32] F. Kaderali, W. Poguntke. *Graphen, Algorithmen, Netze – Grundlagen und Anwendungen in der Nachrichtentechnik*. Vieweg, 1995.
- [33] A. Kershenbaum. *Telecommunications Network Design Algorithms*. McGraw-Hill, Inc., 1993.
- [34] A. Kershenbaum, R. Boorstyn. *Centralized teleprocessing network design*. Networks, Vol. 13, pp. 279–293, 1983.
- [35] A. Kershenbaum, P. Kermani, G. A. Grover. *MENTOR: An Algorithm for Mesh Network Topological Optimization and Routing*. IEEE Transactions on Communications, Vol. 39, No. 4, pp. 503–513, April 1991.
- [36] W. Kinzel. *Optimieren durch simuliertes Ausglühen*. Spektrum der Wissenschaft, pp. 19–23, April 1988.
- [37] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. P. Vecchi. *Optimization by Simulated Annealing*. Science, Vol. 220, No. 4598, pp. 671–680, May 1983.
- [38] H. R. Lewis, C. H. Papadimitriou. *The Efficiency of Algorithms*. Scientific American, Vol. 238, No. 1, 1978.
- [39] H. Luss. *Operation Research and Capacity Expansion Problems: A Survey*. Operation Research, Vol. 30, No. 5, pp. 907–947, 1982.

- [40] M. Minoux. *Network Synthesis and Optimum Network Design Problems: Models, Solution Methods and Applications*. Networks, Vol. 19, pp. 313–360, 1989.
- [41] A. Mirzaian, K. Steiglitz. *A Note on the Complexity of the Star-Star Concentrator Problem*. IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-29, No. 10, pp. 1549–1552, October 1981.
- [42] A.W. Neebe, M.R. Rao. *Sequencing Capacity Expansions Projects in Continuous Time*. Management Science, Vol. 32, No. 11, November 1986.
- [43] I. Rechenberg. *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Friedrich Frommann Stuttgart - Bad Cannstatt, 1973.
- [44] E. Schöneburg, F. Heinzmann, S. Feddersen. *Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien – Eine Einführung in Theorie und Praxis der simulierten Evolution*. Addison-Wesley, 1994.
- [45] B. Schneier. *NP-Completeness*. Dr. Dobb's Journal, pp. 119–131, September 1994.
- [46] M. Schwartz. *Computer Communication Network Design and Analysis*. Prentice-Hall, INC., 1977.
- [47] H.-P. Schwefel. *Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie*. Birkhäuser Basel und Stuttgart, 1977.
- [48] R. Sedgewick. *Algorithmen in C*. Addison-Wesley, 1992.
- [49] M. Shahbaz. *Fixed Network Design of Cellular Mobile Communication Networks using Genetic Algorithms*. In *IEEE International Conference on Universal Personal Communication*, pp. 163–167, Tokyo, Japan, IEEE Publication, November 1995.
- [50] M. Shahbaz. *A Heuristic for Fixed Network Design of Mobile Communication Networks*. In *ITG Fachbericht 135 - Mobile Kommunikation*, pp. 525–532, Berlin, Offenbach, VDE Verlag GmbH, September 1995.
- [51] M. Shahbaz. *Performance Analysis of Stochastic Algorithms for Topological Design of Cellular Mobile Communication Networks*. In *Proceeding of 4th International Conference on Telecommunication Systems*,

- pp. 232–243, Nashville, Tennessee, Owen Graduate School of Management, Vanderbilt University, March 1996.
- [52] M. Shahbaz. *TND-Tool: A Tool for Topological Network Design of Mobile Communication Networks*. In *Proceeding of 3rd International Conference on Telecommunication Systems*, pp. 187–193, Nashville, Tennessee, Owen Graduate School of Management, Vanderbilt University, March 1995.
- [53] M. Shahbaz. *Topological Network Design of Mobile Communication Networks*. *Teletraffic Theory and Engineering, AEÜ*, Vol. 50, No. 4, pp. 240–246, July 1996.
- [54] M. Shahbaz. *Untersuchung über SNMP als Zwischenstufe zum OSI-orientierten Netzwerkmanagement*. Master's thesis, Lehrstuhl für Computerwissenschaften und Technische Informatik, Forschungszentrum Jülich, Postfach 1913, D-5170 Jülich, 1992, ISSN 0366-0885.
- [55] R.L. Sharma. *Network Topology Optimization*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- [56] A. Speetzen. *Entwurf und Implementierung eines Simulators zur Bewertung der Netzplanungsergebnisse*. Master's thesis, Lehrstuhl Kommunikationsnetze, RWTH Aachen, Mai 1996.
- [57] A. Speetzen. *Untersuchung der Portabilität von Genetischen Algorithmen auf die Topologieoptimierung von zellularen Mobilfunknetzen*. Master's thesis, Lehrstuhl Kommunikationsnetze, RWTH Aachen, June 1995.
- [58] A. Speetzen, M. Shahbaz. *TRANSIT – Ein Werkzeug zur Planung und Bewertung von Telekommunikationsnetzen*. In *1. ITG Anwenderfachtagung - Auf dem Weg zur modernen Informationsinfrastruktur*, Vol. 141, pp. 169–179. VDE-Verlag, February 1997.
- [59] Statistisches Bundesamt, 65180 Wiesbaden. *Arbeitsstättenzählung 87*.
- [60] Y. Tanaka, M. Akiyama, B. Wallström. *A Systematic Design Method of Highly Reliable Communication Networks By the Use of Graph Theory*. In *Proc. 12th International Teletraffic Congress*, Torino, 1988.
- [61] A. S. Tanenbaum. *Computer Networks*. Prentice-Hall International, Inc., 1989.

- [62] K. Terplan. *Kommunikationsnetze: Planung, Organisation, Betrieb*. Coedition der Verlage Carl Hanser und Prentice-Hall Int., 1989.
- [63] S. Tsujii, K. Kurosawa. *A Heuristic Algorithm for Multi Commodity Flow Problems in the Case of Line Failure in Communication Networks*. In *Proc. International Symposium on Network Planning, Session X*, Paris, 1980.
- [64] B. Walke. *Kommunikationsnetze und Verkehrstheorie I – Dienste und Protokolle digitaler Kommunikationsnetze*. Vorlesungsumdruck, Lehrstuhl Kommunikationsnetze, RWTH Aachen, 1994.
- [65] B. Walke. *Kommunikationsnetze und Verkehrstheorie II – Verkehrstheoretische Modelle von Echtzeitsystemen und Kommunikationsnetzen*. Vorlesungsumdruck, Lehrstuhl Kommunikationsnetze, RWTH Aachen, 1993.
- [66] B. Walke, M. Shahbaz. *Verkehrsprognose und Verkehrsschwerpunkte*. Interner Bericht, Lehrstuhl Kommunikationsnetze, RWTH Aachen, feb 1996.
- [67] Y. Xin, L. Guojie. *General Simulated Annealing*. *Journal of Comput. Sci. & Technol.* Vol. 6, No. 4, 1991.
- [68] B. Yaged. *Minimum Cost Routing for Dynamic Network Models*. *Networks*, Vol. 3, pp. 193–224, 1973.
- [69] B. Yaged. *Minimum Cost Routing for Static Network Models*. *Networks*, Vol. 1, pp. 139–172, 1971.

## ANHANG A

---

### Abkürzungen

A	Menge der Allele
BH	<i>Busy Hour</i> Hauptverkehrsstunde
CCITT	<i>Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique</i>
$c_k$	Steuerungsparameterwert bei der Iterationsstufe $k$
COT	<i>Center Of Traffic</i> Verkehrsschwerpunkt
ES	Evolutionsstrategien ( <i>Evolutionary Strategies</i> )
$\mathcal{G}$	Genotypenraum
G	Menge der Gene
$\Gamma$	Vektor der Verbindungen
GA	Genetische Algorithmen ( <i>Genetic Algorithms</i> )
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
$L_k$	Länge der Iterationsstufe $k$
$\Lambda$	Menge der relevanten und ein Netz charakterisierenden Größen; Netzkonfiguration; eine Lösung aus Lösungsraum $\mathcal{S}$ ; ein Individuum
MTDA	<i>Multi-step Topology Design Algorithm</i> Mehrstufiger Topologieentwurfsalgorithmus

<b>MUX</b>	<i>Multiplexer</i> Netzelement ohne Wegewahlfähigkeit, wie z.B. Konzentrator
<b>NT</b>	<i>Network Termination</i> Quelle und Senke des Verkehrs
$\Omega$	Menge der Operatoren
$\mathcal{P}$	Wahrscheinlichkeitsfunktion
$\mathbb{P}_k$	k-te Population
$\Psi$	Kostenfunktion
<b>POI</b>	<i>Point Of Interconnect</i> Übergabepunkt zum fremden Netz
$\mathbb{R}$	Menge der reellen Zahlen
$\mathcal{S}$	Lösungsraum eines Problems; Phänotypenraum
<b>SA</b>	Simuliertes Ausglühen ( <i>Simulated Annealing</i> )
<b>SFV</b>	Standardfestverbindung, Verbindungstyp DEUTSCHE TELEKOM AG
<b>SW</b>	<i>Switch</i> Netzelement mit Wegewahlfähigkeit, wie z.B. Vermittlungsstelle
$\Xi$	Vektor der Koordinatenpaare
$\zeta$	Abbildungsfunktion des Phänotypenraum auf den Genotypenraum

# Anforderungsanalysemodell

Die zur funktionalen Anforderungsanalyse verwendete Methode HATLEY & PIRBHAI bedient sich hierarchischer Datenflußdiagramme (*Data Flow Diagram, DFD*) [25]. Die Datenflußdiagramme erlauben komplexe und große Systeme in verschiedenen Hierarchiestufen durch Berücksichtigung der für jede Stufe wichtigen Informationen zu betrachten. Datenflußdiagramme bestehen aus den folgenden vier Bausteinen:

- **Prozeß:** Prozesse bilden die Eingabedaten in Ausgabedaten ab. Ein Prozeß darf mehrere Subprozesse der nächsttieferen Hierarchiestufe umfassen. Ein Prozeß wird durch einen Kreis dargestellt, wobei der die Prozeßfunktion beschreibende Prozeßname sowie die Prozeßidentifikationsnummer im Kreis angegeben werden.



Abbildung B.1: Prozeß DFD-Baustein

- **Datenspeicher:** Eine Möglichkeit Daten im Datenflußdiagramm darzustellen ist durch Datenspeicher gegeben. Ein Datenspeicher wird durch zwei parallele Linien dargestellt und beinhaltet die gespeicherte Information bis sie überschrieben wird.
- **Datenfluß:** Daten können auch durch Datenflüsse im Datenflußdiagramm dargestellt werden. Ein Datenflußbaustein kann Einzel- oder Sammeldatenfluß repräsentieren. Der Sammeldatenfluß wird auf den unteren Hierarchiestufen in Einzeldatenflüsse aufgespaltet. Die Datenflüsse werden durch Pfeile dargestellt.

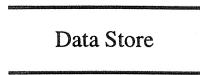


Abbildung B.2: Datenspeicher DFD-Baustein

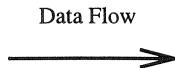


Abbildung B.3: Datenfluß DFD-Baustein

- **Terminator:** Die Terminatoren stellen die Instanzen außerhalb des Systems dar. Sie treten daher nur im Kontextdiagramm auf. Terminatoren sind nur über ihre Schnittstelle, ankommende und ausgehende Datenflüsse dem zu untersuchenden System bekannt. Somit wird garantiert, daß die Anforderungsanalyse nicht durch die interne Struktur eines externen Systems beeinflusst wird. Ein Terminator wird durch einen Rechteck dargestellt.

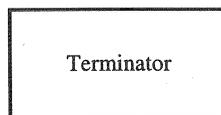


Abbildung B.4: Terminator DFD-Baustein

## ANHANG C

### Kostenstruktur

Die in dieser Arbeit verwendete Knotenkostenstruktur ist in Tab. C.1 angegeben:

Knoten	Kosten/Jahr
NT ( <i>Network Terminator</i> )	20.000 DM
MUX ( <i>Multiplexer</i> )	100.000 DM
SW ( <i>Switch</i> )	2.000.000 DM

Tabelle C.1: Kostenstruktur der Knoten

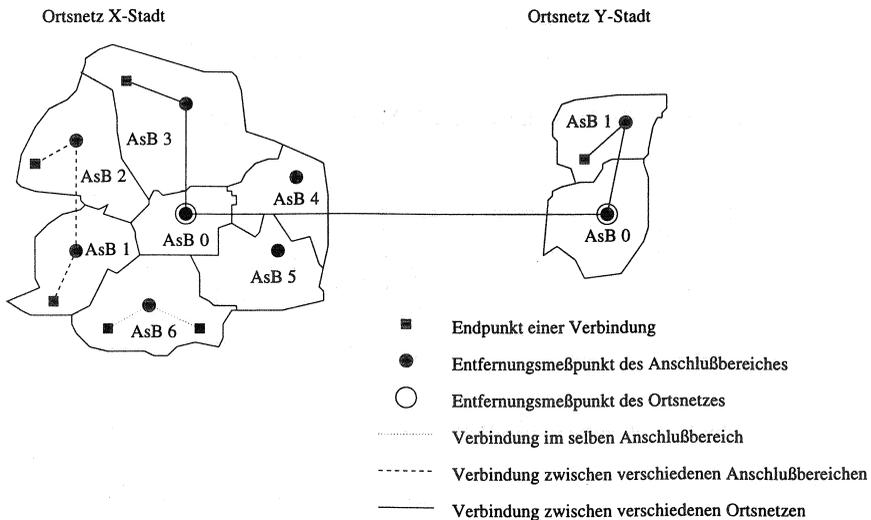


Abbildung C.1: Schematische Darstellung zur Entfernungsberechnung

Diese Kostenstruktur ist beispielhaft und kann durch Einsetzen anderer Zahlen geändert werden. Die Kostenstruktur der Netzverbindungen sind in den Tab. C.2, C.3, C.4 und C.5 entsprechend den Tariffestlegungen der DEUTSCHEN TELEKOM aufgeführt und kann ebenfalls leicht bei geänderten Vorgaben angepaßt werden.

Entfernungsbereich	Sockelbetrag/Jahr	zzgl. je km/Jahr
0 - 15 km	2757.00 DM	312.00 DM
15 - 50 km	7437.00 DM	73.00 DM
50 - 150 km	9992.00 DM	28.00 DM
über 150 km	12792.00 DM	14.00 DM

Tabelle C.2: Kostenstruktur der 64 kbit/s-Übertragungswege

Entfernungsbereich	Sockelbetrag/Jahr	zzgl. je km/Jahr
0 - 15 km	4968.00 DM	1242.00 DM
15 - 50 km	23598.00 DM	845.00 DM
50 - 150 km	53173.00 DM	447.00 DM
über 150 km	97873.00 DM	265.00 DM

Tabelle C.3: Kostenstruktur der 2 Mbit/s-Übertragungswege

Entfernungsbereich	Sockelbetrag/Jahr	zzgl. je km/Jahr
0 - 15 km	21861.00 DM	17139.00 DM
15 - 50 km	278946.00 DM	6201.00 DM
50 - 150 km	495981.00 DM	2449.00 DM
über 150 km	740881.00 DM	1275.00 DM

Tabelle C.4: Kostenstruktur der 34 Mbit/s-Übertragungswege

Die Kostenstruktur einer Verbindung gemäß Telekom II [19] für Standardfestverbindungen wird abschnittsweise, wie in Abb. C.1 dargestellt, nach der Tab. C.6 berechnet.

Entfernungsbereich	Sockelbetrag/Jahr	zzgl. je km/Jahr
0 - 15 km	46621.00 DM	23103.00 DM
15 - 50 km	393166.00 DM	19175.00 DM
50 - 150 km	1064291.00 DM	7010.00 DM
über 150 km	1765291.00 DM	3781.00 DM

Tabelle C.5: Kostenstruktur der 155 Mbit/s-Übertragungswege

Tarifierung	Digital 64K und 2M			Digital 34M und 140M		
	1	2	3	1	2	3
Fall	1	2	3	1	2	3
Pauschalpreis Ortszone 1	X					
Summe der Preise, die sich nach der Tarifierung zwischen der Kundenendstelle A und dem Entfernungsmesspunkt des Anschlußbereiches sowie der Kundenendstelle B und dem Entfernungsmesspunkt des Anschlußbereiches ergeben.				X		
Preis nach der Tarifentfernung zwischen den Entfernungsmesspunkten der beteiligten Anschlußbereiche		X			X	
Preis nach der Tarifentfernung zwischen den Entfernungsmesspunkten der Ortsnetze			X			X
Zusätzliche Preise für die Tarifentfernung zwischen der Kundenendstelle A und dem Entfernungsmesspunkt des Anschlußbereiches A sowie für die Tarifentfernung zwischen der Kundenendstelle B und dem Entfernungsmesspunkt des Anschlußbereiches B					X	X

Tabelle C.6: Tarifierungsarten der digitalen Standardfestverbindungen



## ANHANG D

### Knoten- und Linkindizes

Tabelle D.1 gibt die Struktur des Netzes in Abb. 12.3 wieder. Die Zuordnung der Knoten- und Linkindizes zu Knotennamen ist zur Vollständigkeit der Angaben in Abb. 12.9 und 12.10 erforderlich.

Tabelle D.1: Zuordnung der Knoten- und Linkindizes zu Knotennamen

Knotenidx.	Knotenname	Linkidx.	Linknamen
0	Aachen	0	Aachen — x184
1	Aalen	1	Aalen — x192
2	Ahlen	2	Ahlen — x193
3	Altenburg	3	Altenburg — x194
4	Arnsberg	4	Arnsberg — x193
5	Aschaffenburg	5	Aschaffenburg — x186
6	Augsburg	6	Augsburg — x189
7	Bad Homburg	7	Bad Homburg — x186
8	Bad Salzufen	8	Bad Salzufen — x181
9	Bamberg	9	Bamberg — x189
10	Bayreuth	10	Bayreuth — x194
11	Bergheim	11	Bergheim — x184
12	Bergisch Gladbach	12	Bergisch Gladbach — x185
13	Berlin	13	Berlin — x180
14	Bielefeld	14	Bielefeld — x195
15	Bocholt	15	Bocholt — x187
16	Bochum	16	Bochum — x187
17	Bonn	17	Bonn — x185
18	Bottrop	18	Bottrop — x190
19	Brandenburg	19	Brandenburg — x191
20	Braunschweig	20	Braunschweig — x179
21	Bremen	21	Bremen — x181
22	Bremerhaven	22	Bremerhaven — x195
23	Castrop-Rauxel	23	Castrop-Rauxel — x187

Fortsetzung folgt

Fortsetzung Knoten- und Linkübersicht			
Knotenidx.	Knotenname	Linkidx.	Linknamen
24	Celle	24	Celle — x181
25	Chemnitz	25	Chemnitz — x180
26	Cottbus	26	Cottbus — x191
27	Cuxhaven	27	Cuxhaven — x196
28	Düren	28	Düren — x185
29	Düsseldorf	29	Düsseldorf — x184
30	Darmstadt	30	Darmstadt — x186
31	Delmenhorst	31	Delmenhorst — x181
32	Dessau	32	Dessau — x180
33	Detmold	33	Detmold — x179
34	Dinslaken	34	Dinslaken — x190
35	Dormagen	35	Dormagen — x184
36	Dorsten	36	Dorsten — x187
37	Dortmund	37	Dortmund — x181
38	Dresden	38	Dresden — x180
39	Duisburg	39	Duisburg — x190
40	Eberswalde	40	Eberswalde — x191
41	Eisenhüttenstadt	41	Eisenhüttenstadt — x191
42	Erfurt	42	Erfurt — x195
43	Erlangen	43	Erlangen — x192
44	Eschweiler	44	Eschweiler — x190
45	Essen	45	Essen — x188
46	Esslingen	46	Esslingen — x192
47	Fürth	47	Fürth — x189
48	Flensburg	48	Flensburg — x196
49	Frankfurt (Oder)	49	Frankfurt (Oder) — x191
50	Frankfurt (Main)	50	Frankfurt (Main) — x183
51	Freiburg	51	Freiburg — x182
52	Friedrichshafen	52	Friedrichshafen — x192
53	Fulda	53	Fulda — x179
54	Göppingen	54	Göppingen — x192
55	Görlitz	55	Görlitz — x180
56	Göttingen	56	Göttingen — x179
57	Gütersloh	57	Gütersloh — x195
58	Garbsen	58	Garbsen — x181
59	Gelsenkirchen	59	Gelsenkirchen — x187

Fortsetzung folgt

<b>Fortsetzung Knoten- und Linkübersicht</b>			
<b>Knotenidx.</b>	<b>Knotenname</b>	<b>Linkidx.</b>	<b>Linknamen</b>
60	Gera	60	Gera — x194
61	Gießen	61	Gießen — x183
62	Gladbeck	62	Gladbeck — x187
63	Gotha	63	Gotha — x194
64	Greifswald	64	Greifswald — x191
65	Grevenbroich	65	Grevenbroich — x184
66	Hürth	66	Hürth — x185
67	Hagen	67	Hagen — x188
68	Halle (Saale)	68	Halle (Saale) — x180
69	Hamburg	69	Hamburg — x195
70	Hameln	70	Hameln — x179
71	Hamm	71	Hamm — x193
72	Hanau	72	Hanau — x186
73	Hannover	73	Hannover — x195
74	Hattingen	74	Hattingen — x188
75	Heidelberg	75	Heidelberg — x182
76	Heilbronn	76	Heilbronn — x182
77	Herford	77	Herford — x181
78	Herne	78	Herne — x187
79	Herten	79	Herten — x187
80	Hilden	80	Hilden — x184
81	Hildesheim	81	Hildesheim — x195
82	Hof	82	Hof — x194
83	Hoyerswerda	83	Hoyerswerda — x180
84	Ingolstadt	84	Ingolstadt — x189
85	Iserlohn	85	Iserlohn — x193
86	Jena	86	Jena — x194
87	Köln	87	Köln — x188
88	Kaiserslautern	88	Kaiserslautern — x183
89	Karlsruhe	89	Karlsruhe — x182
90	Kassel	90	Kassel — x179
91	Kempten (Allgäu)	91	Kempten (Allgäu) — x189
92	Kerpen	92	Kerpen — x185
93	Kiel	93	Kiel — x196
94	Koblenz	94	Koblenz — x185
95	Konstanz	95	Konstanz — x192

Fortsetzung folgt

Fortsetzung Knoten- und Linkübersicht			
Knotenidx.	Knotenname	Linkidx.	Linknamen
96	Krefeld	96	Krefeld — x184
97	Lübeck	97	Lübeck — x196
98	Lüdenscheid	98	Lüdenscheid — x188
99	Lüneburg	99	Lüneburg — x195
100	Lünen	100	Lünen — x193
101	Landshut	101	Landshut — x189
102	Leipzig	102	Leipzig — x180
103	Leverkusen	103	Leverkusen — x185
104	Lippstadt	104	Lippstadt — x193
105	Ludwigsburg	105	Ludwigsburg — x182
106	Ludwigshafen	106	Ludwigshafen — x183
107	Mönchengladbach	107	Mönchengladbach — x184
108	Mülheim	108	Mülheim — x190
109	München	109	München — x189
110	Münster	110	Münster — x193
111	Magdeburg	111	Magdeburg — x180
112	Mainz	112	Mainz — x183
113	Mannheim	113	Mannheim — x186
114	Marburg	114	Marburg — x179
115	Marl	115	Marl — x187
116	Menden	116	Menden — x193
117	Minden	117	Minden — x181
118	Moers	118	Moers — x190
119	Nürnberg	119	Nürnberg — x180
120	Neubrandenburg	120	Neubrandenburg — x191
121	Neumünster	121	Neumünster — x196
122	Neuss	122	Neuss — x184
123	Neuwied	123	Neuwied — x183
124	Norderstedt	124	Norderstedt — x196
125	Oberhausen	125	Oberhausen — x190
126	Offenbach	126	Offenbach — x186
127	Offenburg	127	Offenburg — x182
128	Oldenburg	128	Oldenburg — x181
129	Osnabrück	129	Osnabrück — x181
130	Paderborn	130	Paderborn — x179
131	Passau	131	Passau — x189

Fortsetzung folgt

Fortsetzung Knoten- und Linkübersicht			
Knotenidx.	Knotenname	Linkidx.	Linknamen
132	Pforzheim	132	Pforzheim — x182
133	Plauen	133	Plauen — x194
134	Potsdam	134	Potsdam — x191
135	Rüsselsheim	135	Rüsselsheim — x183
136	Ratingen	136	Ratingen — x190
137	Recklinghausen	137	Recklinghausen — x187
138	Regensburg	138	Regensburg — x189
139	Remscheid	139	Remscheid — x188
140	Reutlingen	140	Reutlingen — x192
141	Rheine	141	Rheine — x193
142	Rosenheim	142	Rosenheim — x189
143	Rostock	143	Rostock — x191
144	Saarbrücken	144	Saarbrücken — x183
145	Salzgitter	145	Salzgitter — x179
146	Sankt Augustin	146	Sankt Augustin — x185
147	Schwäbisch Gmünd	147	Schwäbisch Gmünd — x192
148	Schwedt (Oder)	148	Schwedt (Oder) — x191
149	Schweinfurt	149	Schweinfurt — x186
150	Schwerin	150	Schwerin — x196
151	Siegen	151	Siegen — x188
152	Sindelfingen	152	Sindelfingen — x182
153	Solingen	153	Solingen — x190
154	Stolberg (Rheinland)	154	Stolberg (Rheinland) — x185
155	Stralsund	155	Stralsund — x196
156	Stuttgart	156	Stuttgart — x182
157	Suhl	157	Suhl — x194
158	Tübingen	158	Tübingen — x192
159	Trier	159	Trier — x183
160	Troisdorf	160	Troisdorf — x185
161	Ulm	161	Ulm — x192
162	Unna	162	Unna — x193
163	Velbert	163	Velbert — x188
164	Viersen	164	Viersen — x184
165	Villingen	165	Villingen — x182
166	Würzburg	166	Würzburg — x186
167	Weimar	167	Weimar — x194

Fortsetzung folgt

Fortsetzung Knoten- und Linkübersicht			
Knotenidx.	Knotenname	Linkidx.	Linknamen
168	Wesel	168	Wesel — x190
169	Wetzlar	169	Wetzlar — x186
170	Wiesbaden	170	Wiesbaden — x183
171	Wilhelmshaven	171	Wilhelmshaven — x195
172	Wismar	172	Wismar — x196
173	Witten	173	Witten — x188
174	Wolfsburg	174	Wolfsburg — x195
175	Worms	175	Worms — x186
176	Wuppertal	176	Wuppertal — x188
177	Zwickau	177	Zwickau — x194
178	x179	178	x179 — xx200
179	x180	179	x180 — xx198
180	x181	180	x181 — xx200
181	x182	181	x182 — xx199
182	x183	182	x183 — xx199
183	x184	183	x184 — xx201
184	x185	184	x185 — xx201
185	x186	185	x186 — xx199
186	x187	186	x187 — xx201
187	x188	187	x188 — xx201
188	x189	188	x189 — xx199
189	x190	189	x190 — xx201
190	x191	190	x191 — xx198
191	x192	191	x192 — xx199
192	x193	192	x193 — xx200
193	x194	193	x194 — xx198
194	x195	194	x195 — xx200
195	x196	195	x196 — xx200
196	xx198	196	xx198 — xx201
197	xx199	197	xx198 — xx199
198	xx200	198	xx198 — xx200
199	xx201	199	xx199 — xx201
-	-	200	xx200 — xx201
-	-	201	xx200 — xx199

## NACHWORT

---

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der RWTH Aachen.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernhard Walke für die Ermöglichung, die Anregungen zum Thema der Dissertation, die sehr gute, fortwährende Betreuung und Förderung der Arbeit, sowie die kritische Durchsicht des Textes. Herrn Prof. Dr. rer. nat. Friedel Hoßfeld danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats und die unermüdliche Unterstützung in jeder Lebenslage.

Diese Arbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter dem Az. Wa 542/8-1 befördert. Spezieller Dank gilt der DFG für die finanzielle Unterstützung der Arbeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Kollegen, Diplomanden, Studienarbeitern und studentischen Hilfskräften, die durch ihre Arbeit wesentlich zum Gelingen beigetragen haben, insbesondere bei Herrn Dipl.-Ing. Muhammad Abduh, Herrn Dipl.-Ing. Hans de Haan und Herrn Dipl.-Ing. Alexander Speetzen.

Meinem Bruder Herrn Dipl.-Ing. Dipl.-Inform. Mahmood Shahbaz danke ich für die stetige Unterstützung und Vertrauen. Für die Geduld, Verzicht und die Mühe des Korrekturlesens dieser Arbeit bedanke ich mich herzlich bei meiner Frau Claudia. Meiner Tochter Sara Jasmina widme ich diese Arbeit für ihr Dasein als Quelle der Freude und Hoffnung.

Aachen, Herbst 1997

Mohammad Shahbaz



## AACHENER BEITRÄGE ZUR MOBIL- UND TELEKOMMUNIKATION

### **ABMT Band 1**

**Herrmann, C.**  
Stochastische Modelle für  
ATM-Konzepte,  
1. Auflage 1995, 138 Seiten;  
ISBN 3-86073-380-X

### **ABMT Band 2**

**Lawniczak, D. R.**  
Modellierung und Bewertung  
der Datenverwaltungskonzepte  
in UMTS,  
1. Auflage 1995, 230 Seiten;  
ISBN 3-86073-381-8

### **ABMT Band 3**

**Junius, M.**  
Leistungsbewertung intelligenter  
Handover-Verfahren für  
zellulare Mobilfunksysteme,  
1. Auflage 1995, 208 Seiten;  
ISBN 3-86073-382-6

### **ABMT Band 4**

**Steffan, H.**  
Stochastische Modelle für den  
Funkkanal und deren Anwendung,  
1. Auflage 1996, 164 Seiten;  
ISBN 3-86073-383-4

### **ABMT Band 5**

**Böhmer, S.**  
Entwurf eines ATM-basierten  
Funknetzes und Software-  
Entwurfsmethodik zur Implementierung,  
1. Auflage 1996, 172 Seiten;  
ISBN 3-86073-384-2

### **ABMT Band 6**

**Guntermann, M.**  
Universelle Benutzermobilität  
auf der Basis des Intelligenten  
Netzes - Entwurf, Bewertung  
und Implementierung -,  
1. Auflage 1996, 164 Seiten;  
ISBN 3-86073-385-0

### **ABMT Band 7**

**Kleier, S.**  
Neue Konzepte zur Unterstützung  
von Mobilität in  
Telekommunikationsnetzen,  
1. Auflage 1996, 204 Seiten;  
ISBN 3-86073-386-9

### **ABMT Band 8**

**Decker, P.**  
Entwurf und Leistungsbewertung  
hybrider Fehlersicherungs-  
protokolle für paketierte  
Sprach- und Datendienste im  
GSM-Mobilfunksystem,  
1. Auflage 1997, 232 Seiten;  
ISBN 3-86073-387-7

### **ABMT Band 9**

**Hußmann, H.**  
Algorithmen zur Kapazitäts-  
optimierung schnurloser  
Mobilfunksysteme nach DECT-  
Standard,  
1. Auflage 1997, 180 Seiten;  
ISBN 3-86073-388-5

### **ABMT Band 10**

**Plenge, C.**  
Leistungsbewertung öffentlicher  
DECT-Systeme,  
1. Auflage 1997, 258 Seiten;  
ISBN 3-86073-389-3

### **ABMT Band 11**

**Kennemann, O.**  
Lokalisierung von Mobilstationen  
anhand ihrer Funkmeßdaten,  
1. Auflage 1997, 162 Seiten;  
ISBN 3-86073-620-5

### **ABMT Band 12**

**Wiefeld, C. M.**  
Mobilfunksysteme für die  
europäische Verkehrsleittechnik -  
Leistungsanalyse des  
CEN-DSRC-Standards -,  
1. Auflage 1997, 210 Seiten;  
ISBN 3-86073-621-3

### **ABMT Band 13**

**Görg, C.**  
Verkehrstheoretische Modelle  
und stochastische Simulationstechniken  
zur Leistungsanalyse von  
Kommunikationsnetzen,  
1. Auflage 1997, 220 Seiten;  
ISBN 3-86073-622-1

### **ABMT Band 14**

**Shahbaz, M.**  
Zufallsgesteuerte Verfahren  
zur Topologieoptimierung von  
Telekommunikationsnetzen,  
1. Auflage 1998, 208 Seiten;  
ISBN 3-86073-623-X





