

# Planung und Bewertung von WDM Backbone-Netzen

Jan Späth

Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung  
Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. P. J. Kühn  
Pfaffenwaldring 47, D-70569 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685 7990; Fax: 0711 / 685 7983; E-Mail: spaeth@ind.uni-stuttgart.de

## 1 Einführung

Neben der Übertragungstechnik und der Entwicklung von Komponenten für photonische Netze gewinnen Aspekte des Designs, der Planung und des Betriebs von WDM-Netzen zunehmend an Bedeutung. Dies zeigt sich sowohl an den weltweit ablaufenden Forschungsprogrammen als auch an zahlreichen neueren Veröffentlichungen [4, 5]. Im PHOTONIK II - Programm wurde ebenfalls ein entsprechendes Projekt durchgeführt („Methoden und Programmwerkzeuge für die Planung von photonischen Backbone-Netzen“, 01 BP 504/2). Einige der erzielten Ergebnisse werden hier vorgestellt.

Nach der bereits in großem Umfang erfolgenden Installation von Punkt-zu-Punkt-Strecken mit WDM-Technik ist die Realisierung von photonischen Netzen als nächste Stufe zu erwarten. Die Wichtigkeit der Planung dieser Netze nimmt damit zu. Durch die relativ hohen Komponentenkosten wird die Bedeutung eines optimierenden Planungsprozesses noch erhöht. Dabei besteht ein umfassender Planungsprozeß aus zahlreichen Stufen, die sich in die zwei Hauptphasen „Planung“ und „Bewertung“ unterteilen lassen (siehe Bild 1).

Dieser Beitrag greift in Abschnitt 2 mit der Betrachtung von Protection-Verfahren, die für photonische Netze aufgrund der hohen Bitraten eine wichtige Rolle spielen werden, einen Aspekt der ersten Planungsphase auf. In Abschnitt 3 wird dann als Beispiel für eine Problemstellung aus der Bewertungsphase der Einfluß von Routing-Strategien auf die Leistungsfähigkeit von WDM-Netzen untersucht.

## 2 Planung von WDM-Netzen mit Reservekapazitäten

Die Planung der Netzinfrastruktur zielt auf die Minimierung der physikalischen Ressourcen unter Einhaltung aller vorgegebenen Randbedingungen, welche sich einerseits aus technologischen oder physikalischen Beschränkungen, andererseits aus Anforderungen an die Netzgüte zusammensetzen. Dabei kommt ein breites Spektrum von Methoden zum Einsatz, ausgehend von Verkehrsprognosen über topologische Designverfahren bis hin zu analytischen oder simulativen Bewertungsmethoden. Eine zentrale Rolle spielen dabei Optimierungsverfahren zur Suche von (sub-) optimalen Lösungen in meist sehr großen Zustandsräumen.

Bei der Planung von WDM-Netzen ergibt sich das Problem, daß sich zahlreiche Randbedingungen noch immer stark ändern oder weitgehend unbekannt sind (wie beispielsweise künftige Verkehrsanforderungen oder Kostenparameter). Dadurch wird die Aussagekraft der Ergebnisse von speziellen Optimierungen fraglich, da sich bei leicht geänderten Randbedingungen oft ganz andere Schlußfolgerungen ergeben [2]. Trotzdem sind diese Planungsarbeiten aus mehreren Gründen wesentlich:

- Sie ermöglichen einen Vergleich von Alternativen, wofür jeweils eine optimierte Lösung verwendet werden muß.
- Eine Weiterentwicklung der Planungsmethoden ist erforderlich und kann unabhängig von den tatsächlichen Werten der Randbedingungen erfolgen.
- Eine Verbesserung des Verständnisses der speziellen Probleme bei der Planung von WDM-Netzen ist weiter erforderlich (die Netzplanung für „klassische“ Netze ist bereits sehr viel weiter fortgeschritten und in die Management-Werkzeuge der Netzbetreiber integriert).
- Die Untersuchungen zeigen den prinzipiellen Einfluß der einzelnen Parameter, was einen Einfluß auf die Technologie-Entwicklung haben kann (z. B. bei der Konverter-Frage).

Die folgenden Abschnitte konzentrieren sich auf einen Aspekt, dessen Bedeutung mit der ständigen Steigerung der erzielbaren Übertragungsraten in optischen Netzen zunimmt: die Erhöhung der Netz-

verfügbarkeit bzw. die Minimierung des Einflusses von Ausfällen im Netz durch die Bereitstellung von Reservekapazitäten. Dabei gibt es zwei grundsätzliche Möglichkeiten:

- Bei *Restoration*-Strategien wird beim Auftreten eines Fehlers versucht, den betroffenen Verkehr unter Ausnutzung aller in diesem Moment vorhandenen Reservekapazitäten umzuleiten.
- Bei *Protection*-Strategien erfolgt bereits im Vorfeld zu einem möglichen Fehler eine Zuweisung (und Reservierung) der dann zu verwendenden Reservekapazitäten.

Es ist dabei festzuhalten, daß diese beiden Konzepte sich nicht gegenseitig ausschließen. Vielmehr ist zu erwarten, daß für einige Fehlerfälle (oder auch für einen Teil des Verkehrs) eine Absicherung mittels *Protection* realisiert wird, während versucht wird, weitere – z. T. auch unvorhersehbare – Fehler durch die „zweite Sicherungslinie“ eines *Restoration*-Verfahrens abzufangen. Im folgenden werden *Protection*-Verfahren näher betrachtet.

## 2.1 Klassifizierung von Protection-Verfahren

Für eine Klassifizierung von *Protection*-Verfahren können zahlreiche Parameter herangezogen werden. Neben dem häufig betrachteten Bedarf an Ressourcen, der für einige Verfahren im nächsten Abschnitt verglichen wird, sind dies:

- Wahl der Wegeführung für die *Protection*-Kanäle (Beispiel siehe Bild 5)
- Anforderungen an die Fehlererkennung und Überwachungsmechanismen im Netz
- Anforderungen an die Funktionalität optischer Netzkomponenten
- Anforderungen an das Netzmanagement und an die Signalisierung zwischen Netzknoten
- realisierbare Umschaltgeschwindigkeit
- Umfang der Absicherung (100% des Verkehrs im Netz oder nur ein Teil)
- Flexibilität des Verfahrens gegenüber künftigen Änderungen (z. B. erforderlicher Aufwand bei Änderungen der Verkehrsanforderungen)

Bei einem Vergleich der Verfahren ergibt sich das Problem, daß diese von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst werden und zwischen diesen Parametern häufig noch komplexe Wechselwirkungen bestehen. Beispiele hierfür sind:

- Netztopologie (z. B. Anzahl der Knoten und Links, Vermaschungsgrad, Durchmesser, ...)
- Verkehrsanforderungen und deren geographische Verteilung (Symmetrie des Verkehrs, ...)
- einsetzbare Technologie (bei WDM-Netzen beispielsweise Konversion und Regeneration)
- Implementierungsaspekte und Freiheitsgrade innerhalb der Algorithmen eines Verfahrens

Bei den meisten in der Literatur vorgestellten Untersuchungen wird eine Vielzahl dieser Parameter mehr oder weniger willkürlich festgelegt, wodurch die Allgemeingültigkeit der erzielten Ergebnisse in Frage gestellt werden muß. Eine mögliche Abhilfe besteht darin, eine Vielzahl von Szenarien zu untersuchen. Dazu können beispielsweise Netz- oder Verkehrsgeneratoren zur zufälligen Erzeugung von Topologien bzw. Verkehrsanforderungen dienen. Dadurch ergibt sich aber als neue Schwierigkeit eine starke Zunahme der Rechenzeit und der auszuwertenden Datenmenge, wodurch die Ableitung allgemeiner Ergebnisse schwierig wird. Die nach der Durchführung zahlreicher Studien und der Untersuchung des Einflusses der genannten Parameter ableitbaren prinzipiellen Aussagen zu einigen der in Bild 5 aufgelisteten Verfahren werden im nächsten Abschnitt kurz vorgestellt.

## 2.2 Vergleich von Protection-Verfahren

In Bild 6 werden einige Verfahren hinsichtlich des Ressourcenbedarfs für eine Fallstudie (Netz mit 8 Knoten und 16 bidirektionalen Links, keine Konverter im Netz, gleiche Verkehrsanforderungen zwischen allen Knotenpaaren) verglichen. Die ersten drei Verfahren gehören zu den *Link-Protection*-Verfahren. Sie sichern also jeweils einen einzelnen Link ab und können dabei auf Faser- oder auf Wellenlängenbasis arbeiten. Verfahren 1 verwendet einen vollständig disjunkten *Protection*-Weg für jeden einzelnen Link im Netz. Dadurch ergibt sich zwar ein hoher Ressourcenbedarf, dafür aber auch ein sehr hoher Schutz für den gesamten Verkehr im Netz. Beim Verfahren 2 werden alle Kanten des Netzes durch beliebig liegende Ringe vollständig abgedeckt. Jedem Link wird genau ein *Protection*-Ring zugeordnet. Da ein Ring mehrere Links schützen kann, ist der Ressourcenbedarf kleiner als bei Verfahren 1. Eine weitere Reduktion ergibt sich für Verfahren 3, bei dem Ringe so auf das Netz gelegt werden, daß jeder Link unter Benutzung genau eines Ringes abgesichert ist, wobei der Link nicht unbedingt auf dem Ring liegen muß (Bild 2). Dieses Verfahren kann durch die Wahl großer Ringe

eine relativ gute Ressourcenausnutzung bei gleichzeitig geringem Signalisieraufwand erreichen, wird aber bei stark unsymmetrisch belasteten Links schlechter, da die Kapazität des Protectionringes der maximalen Kapazität eines geschützten Links entsprechen muß.

Die Verfahren 4 bis 7 zählen zu den Pfad-Protection-Verfahren, sichern also jeweils optische Ende-zu-Ende-Pfade (d. h. Wellenlängenkanäle) ab. Verfahren 4 entspricht weitgehend dem *Self-Healing-Ring*-Konzept von SDH. Dabei werden Arbeits- und Protection-Kanäle jeweils über unterschiedliche „Hälften“ des Ringes geführt. Bei Verfahren 5 wird zu jedem Arbeitspfad ein zweiter, vollständig disjunkter Protection-Pfad zugeordnet und reserviert. Aufgrund der höheren Flexibilität bei der Wegewahl werden dadurch zwar weniger Ressourcen als bei Verfahren 4 benötigt, dafür werden aber die Netzknoten aufwendiger.

Die letzten beiden Verfahren erreichen eine weitere Reduktion der Protection-Kapazitäten. Verfahren 6 basiert darauf, daß jedem *beliebig* verlaufenden Arbeitspfad ein Ringabschnitt für den Protection-Pfad zugeordnet ist (Bild 3). Eine hohe Effizienz ergibt sich durch die Möglichkeit, Ringabschnitte als Schutz für mehrere Pfade zu verwenden. Eine vergleichbare Effizienz erreicht Verfahren 7, bei dem zu jedem Link des Arbeitspfades ein (teil-) disjunkter Protection-Pfad zugeordnet wird (Bild 4). Nachteilig bei diesem Verfahren sind aber die höheren Anforderungen an die Fehlerortung und an die Umschaltfunktionalität der Netzknoten.

Abschließend bleibt festzuhalten, daß bei einem Vergleich von Protection-Verfahren neben dem Ressourcen-Bedarf weitere Aspekte wie erforderlicher Signalisieraufwand oder notwendige Knotenfunktionalität berücksichtigt werden müssen. Da außerdem zahlreiche Einflußparameter mit komplexen Wechselwirkungen vorhanden sind, muß für die Ableitung gesicherter Ergebnisse ein möglichst breiter Wertebereich für die zahlreichen Parameter abgedeckt werden.

### 3 Leistungsuntersuchung für dynamische Verkehrsbedingungen

Für die Planung von Netzen werden i. a. statische Verkehrsannahmen getroffen, während zu einer umfassenden Netzbewertung auch die Untersuchung des Betriebs unter dynamischen Bedingungen wichtige Aussagen liefert. Zwar sind zur Zeit praktisch alle WDM-basierten Netzbereiche rein statisch, doch wird in Zukunft die Dynamik aufgrund höherer Bitraten bis zum Endteilnehmer, zunehmender Teilnehmerzahl, der Einführung neuer Dienste wie „Leased Wavelength Services“ oder Re-Routing für Restoration-Aufgaben auch in der Transportebene zunehmen.

Diese Dynamik wirft eine ganze Reihe von Problemen auf der physikalischen Schicht auf, die hier nicht näher betrachtet werden sollen (wie beispielsweise das Powermanagement). Doch auch auf Netzebene sind neue Funktionen zur Behandlung dynamischen Verkehrs erforderlich. Ein zentraler Aspekt ist dabei die Verkehrslenkung (Routing), welche zu jeder Verbindungsanforderung – hier eines Wellenlängenkanals – einen zugehörigen Weg im Netz finden muß. Die Leistungsfähigkeit der Routing-Verfahren wird dabei von einer Vielzahl von Parametern wie Netztopologie oder Verkehrsverhalten beeinflusst [1]. Für WDM-Netze sind beim Routing einige Besonderheiten zu beachten:

- neben der reinen Wegeauswahl ist auch noch ein Wellenlängenkanal für jeden Abschnitt auszuwählen (neuer Freiheitsgrad für das Routing durch die Wellenlängendimension)
- vielfältige Strategien für die Absuchreihenfolge der Ressourcen (Link, Faser, Wellenlängenkanal, Konverterverwendung)
- andere Dynamik des Verkehrs und (zumindest vorerst) Netze mit relativ wenigen Knoten
- einzelne Blockierereignisse haben große Auswirkungen (da Kanäle mit mehreren Gbit/s)

#### 3.1 Vergleich von Routing-Strategien für WDM-Netze

Nachfolgend werden einige quantitative Ergebnisse gezeigt, die für ein beispielhaftes nationales Transportnetz (Bild 7) unter Annahme von Poisson-Verkehr mittels ereignisgesteuerter Simulation abgeleitet wurden. Bild 8 vergleicht mehrere Routingverfahren. Bei FSR (Fixed Source Routing) steht nur der für die Planung verwendete Erstweg zur Verfügung. Bei ASR-LD (Alternative Source Routing - Link Disjoint) werden mehrere Alternativen bereitgestellt, die alle zu jeweils einem Link des Erstweges disjunkt sind. ADR2 (Alternative Dynamic Routing) stellt zwei vollständig disjunkte Alternativwege bereit, erlaubt aber noch zusätzlich eine dynamische Neuberechnung, falls beide Alternativen blockiert sind.

Es zeigt sich, daß bei niedriger Last die Verfahren mit mehr Alternativen besser sind und das Verfahren mit dynamischer Neuberechnung am leistungsfähigsten ist. Das zum Vergleich aufgeführte dezentrale Verfahren SOCc (Sequential-Office Control with Crankback) erreicht ebenfalls eine relativ gute Performance. Es kann aber die Werte von ADR2, welches allerdings eine zentrale Sicht des Netzes erfordert, nicht erreichen. Bei hoher Last ändert sich das Verhalten grundlegend: nun sind die restriktiveren Verfahren vorzuziehen, da sie lange Alternativen vermeiden und damit den Gesamtdurchsatz im Hochlastfall erhöhen.

Dies führt zu der Erkenntnis, daß zusätzliche Beschränkungen der Pfadlänge die Performance verbessern können. Die Auswirkung einer solchen relativen Grenze, die abhängig von der Länge des Erstweges gewählt wird, zeigt Bild 9 (ADR3, relative Grenze). Zwar wird nun im Hochlastfall die Gesamtblokkierung gesenkt, doch bei niedriger Last führt das Verfahren zu unnötigen Einschränkungen und erhöht deshalb die Blockierung (im Vergleich zu ADR3 ohne Grenzen). Aus diesem Grund wurde eine adaptive Verwendung der Längenbeschränkung realisiert, die sich an der Auslastung der Links zum Zeitpunkt des Verbindungsaufbaus orientiert. Wie Bild 9 zeigt, kann damit über den gesamten Lastbereich eine nahezu optimale Performance erreicht werden [1].

### 3.2 Absuchstrategien bei partieller Konversion

Bild 10 zeigt die Blockierwahrscheinlichkeit für das Beispielnetz bei 80% mittlerer Auslastung über der Anzahl von Konvertern pro Faser [3]. Als Knoten werden „Share-per-Node“-Cross-Connects angenommen, so daß 2 Konverter pro Faser einem Konversionsgrad von 25% entsprechen (0 Konverter = WR-Netz, 8 Konverter = WI-Netz). Verglichen werden unterschiedliche Routingstrategien (FSR, SOC, SOC mit Crankback). Die durchgezogenen Linien beschreiben die Ergebnisse für eine Strategie, welche die Anzahl der Konverter zu minimieren versucht (*Strategie 1*). Die gestrichelten Linien stehen für eine Strategie, bei der die Pfadlänge minimiert wird, dafür aber mehr Konverter verwendet werden (*Strategie 2*).

Zum einen zeigt sich, daß bereits relativ wenige Konverter eine starke Reduzierung der Blockierwahrscheinlichkeiten zur Folge haben, während sich für mehr als 25% Konversion keine Verbesserungen mehr ergeben. Zum anderen zeigt sich aber auch der überraschende Effekt, daß für Strategie 2 bei geringer Konverterzahl die Blockierung mit steigendem Konversionsgrad zunimmt, während dann für einen hohen Konversionsgrad geringere Blockierwahrscheinlichkeiten als bei Strategie 1 erreicht werden. Der Grund hierfür liegt in der geringen Anzahl von Konvertern, die zu einem Engpaß werden können, während Strategie 1 dies – durch Verwendung längerer Alternativwege – vermeidet.

Dies zeigt, daß bei WDM-Netzen subtile Effekte auftreten können, die bei klassischen Netzen nicht bekannt sind. Deshalb muß beispielsweise die Routingstrategie sorgfältig auf die vorhandenen Konversionsmöglichkeiten im Netz abgestimmt werden. Weitere Untersuchung zum Verhalten unterschiedlicher Routing-Strategien bei „Non-Poisson“-Verkehr finden sich in [1].

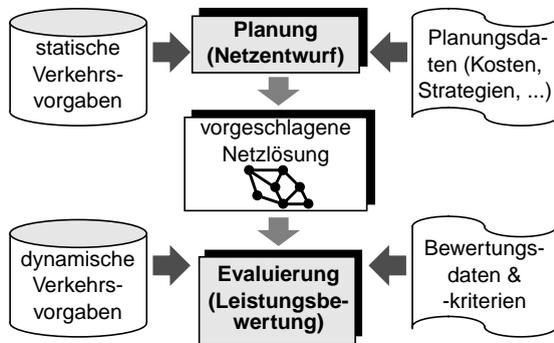
## 4 Referenzen

- [1] *Design parameters for dynamic routing in WDM cross-connect networks*, J. Späth, 3rd IFIP TC 6 Working-Conference on „Optical Network Design and Modelling“, Paris, Februar, 1999
- [2] *Planning methods for photonic backbone networks*, J. Späth, V. Feil, Proceedings of the NOC '97 (Network & Optical Communications), Antwerpen, Juni 1997, Vol. 3, S. 47 – 54
- [3] *Routing of dynamic Poisson and non-Poisson traffic in WDM networks with limited wavelength conversion*, J. Späth, S. Bodamer, Proceedings of the 24th European Conference on Optical Communication (ECOC) '98, Madrid, September 1998, S. 359 – 360
- [4] Special Issue of the Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 14, Nr. 5, Juni 1996
- [5] Special Issue of the Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 16, Nr. 7, Sept. 1998

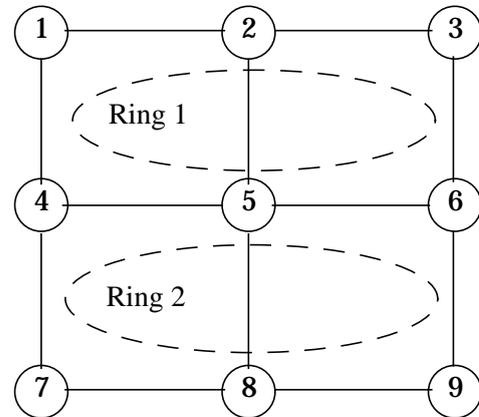
### Danksagung

Der Autor bedankt sich bei S. Bodamer, C. Gauger und H. Weißschuh für die Unterstützung bei der Implementierung der erforderlichen Tools und der Durchführung der Studien sowie beim BMBF für die Förderung der vorgestellten Arbeiten unter 01 BP 504/2.

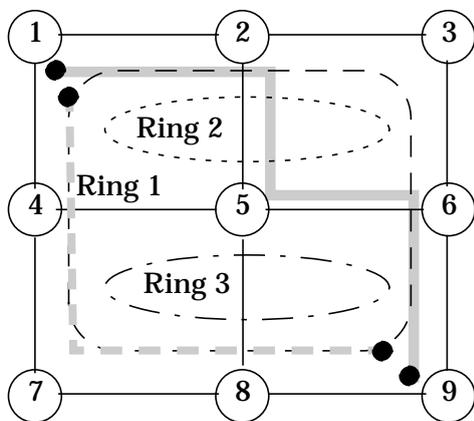
## 5 Bilder



**Bild 1:** Hauptphasen eines Planungsprozesses



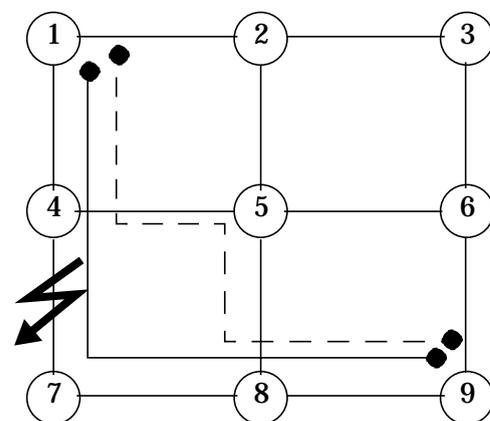
**Bild 2:** Link-Protection mit Ringen ohne vollständige Linkabdeckung



Beispiel:

- Arbeitspfad: 1-2-5-6-9
- - - Protection-Pfad: 1-4-7-8-9 auf Abschnitt des Ringes 1

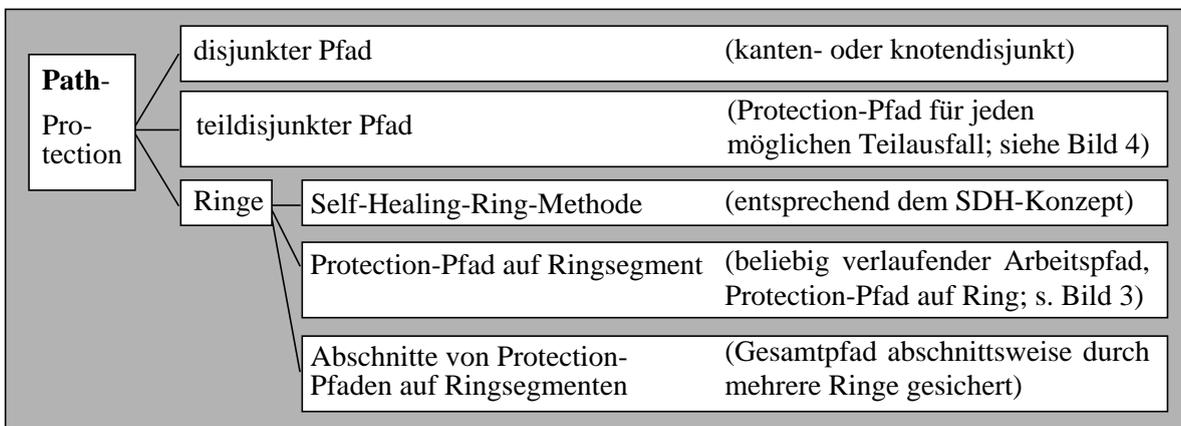
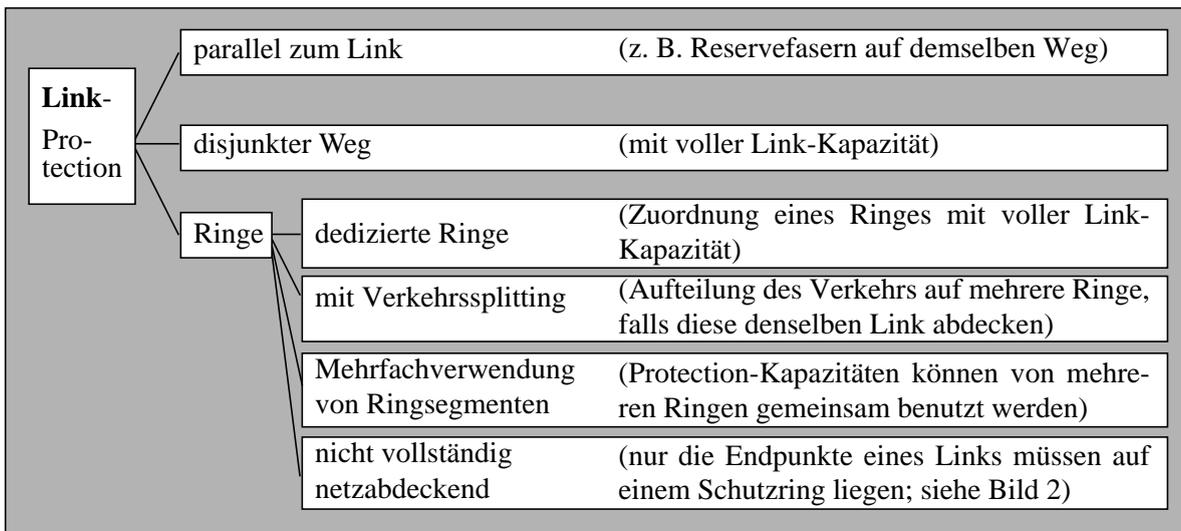
**Bild 3:** Pfad-Protection entlang eines Ringabschnitts



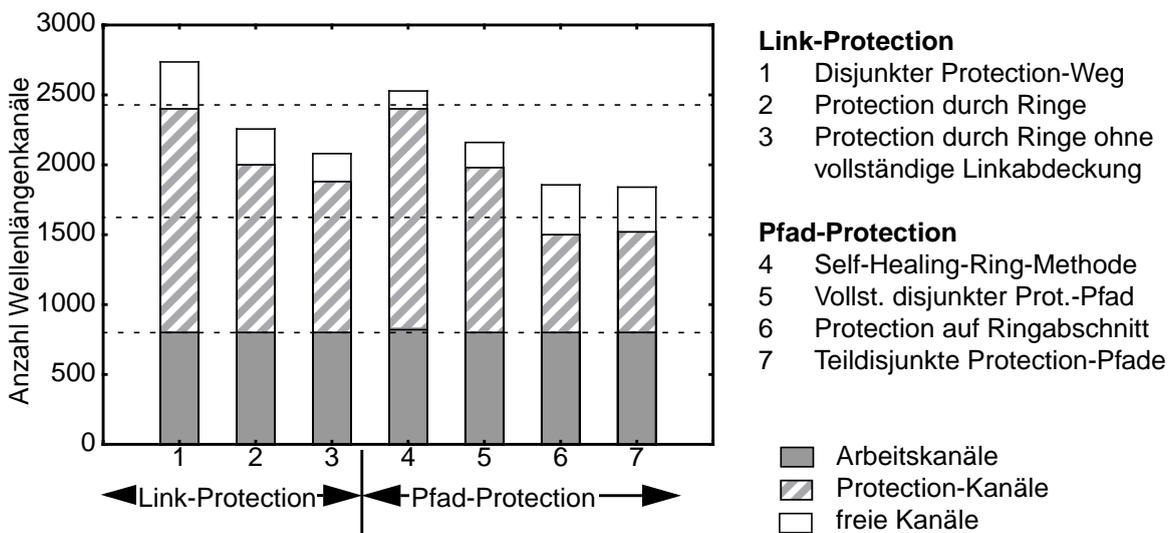
— Arbeitspfad 1-9

- - - Zugehöriger Protection-Pfad für Ausfall des Links 4-7

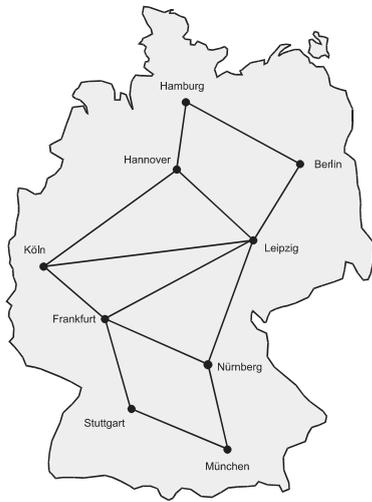
**Bild 4:** Pfad-Protection mit teildisjunkten Schutzpfaden



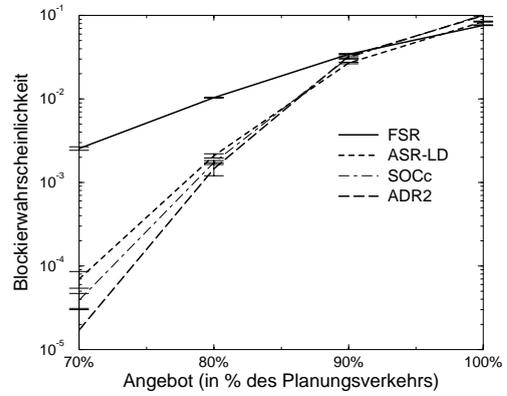
**Bild 5:** Eine mögliche Klassifizierung von Protection-Verfahren



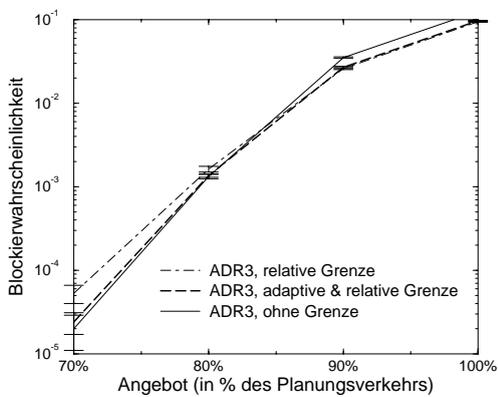
**Bild 6:** Vergleich des Ressourcen-Bedarfs ausgewählter Protection-Verfahren



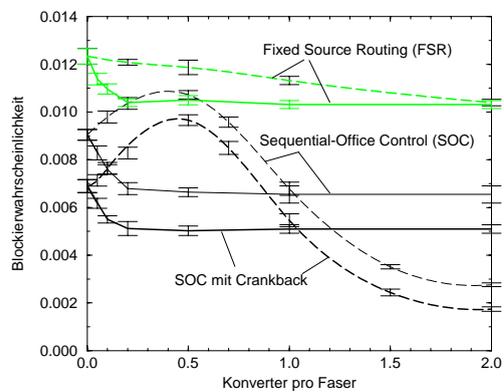
**Bild 7:** Topologie des Beispielnetzes für die Untersuchung von Routing-Strategien



**Bild 8:** Vergleich von Routing-Strategien



**Bild 9:** Auswirkung von Längengrenzen



**Bild 10:** Unterschiedliche Routingverfahren mit 2 Strategien zur Ressourcenbelegung für ein Netz mit partieller Konversion