

**Universität Stuttgart**

Institut für Kommunikationsnetze und Rechnersysteme

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. mult. P. J. Kühn

**82. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten**

**Entwurf und Bewertung von Verfahren  
zur Verkehrslenkung in WDM-Netzen**

von

**Jan Späth**

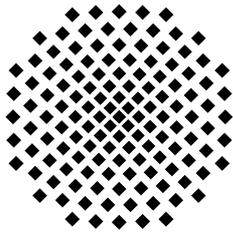
2002

D 93

© 2002 Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart

Druck: E. Kurz & Co., Druckerei + Reprografie GmbH., Stuttgart

ISBN 3-922403-92-1



**University of Stuttgart**

Institute of Communication Networks and Computer Engineering

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. mult. P. J. Kühn

**82th Report on Studies in Congestion Theory**

**Design and Evaluation of  
Routing Mechanisms for WDM Networks**

by

**Jan Späth**

2002

# **Entwurf und Bewertung von Verfahren zur Verkehrslenkung in WDM-Netzen**

Von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

**Jan Späth**

geboren in Sulz a. N.

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Paul J. Kühn
Mitberichter:	Prof. Dr. Peter E. Leuthold, ETH Zürich
Tag der Einreichung:	28. August 2001
Tag der mündlichen Prüfung:	15. November 2002

Institut für Kommunikationsnetze und Rechnersysteme  
der Universität Stuttgart

2002

*Für Angela, Lisa und Sabrina  
für ihre motivierende Unterstützung*

# Design and Evaluation of Routing Mechanisms for WDM Networks

## Summary

The evolution from an industry society towards an information society directly leads to a strong increase in the importance of communication networks. The traffic volume that has to be carried by communication networks is strongly growing, largely but not exclusively driven by the development of mobile and Internet communications. In addition, other requirements such as network availability or cost effectiveness of information transport are gaining more importance.

These factors are accompanied by large technological improvements which allow to fulfil the requirements described above. This holds especially for the development of optical communication networks which experienced an unprecedented growth since the middle of the nineties that resulted in *wavelength division multiplexing* (WDM) being introduced into real networks. By realising multiple high-bitrate wavelength channels in parallel on a single strand of fibre, those networks experienced a strong growth in available transport capacity.

Although today, these WDM networks largely consist of static point-to-point connections, it is commonly expected that several trends presently visible will lead to a higher degree of dynamics in these networks in the future, i. e. wavelength channels will have to be dynamically provisioned. The main drivers are the increasing demand for higher bandwidth connections and the presently discussed de-centralised transport network control schemes which will help to realise dynamic transport networks (ASON/ASTN: *automatic switched optical/transport network*; GMPLS: *generalized multi-protocol label switching*). In case of dynamic traffic behaviour, paths with available resources have to be found to fulfil connection requests. This task is performed by so-called routing mechanisms.

This thesis has three main targets: to present a structured method for describing the great variety of possible routing mechanisms for WDM networks, to develop efficient routing strategies and prove their performance with a quantitative evaluation, and to perform a systematic investigation of the large number of parameters influencing the routing performance.

Following a short introduction and motivation in Chapter 1, Chapter 2 gives an overview of photonic networks based on WDM technology. Basic physical aspects are briefly introduced, followed by a description of the key building blocks for photonic networks. The main part of the chapter is an overview of optical network architectures. Possible node architectures are described in detail, specifically for wide area transport networks, and special focus is on the aspects of wavelength conversion. While wavelength conversion can avoid so-called wavelength conflicts when switching wavelength channels in a node, those converters are expensive

and the realisation of all-optical converters is still a complex issue not completely solved. Next is a description of protection and restoration mechanisms in both, electronically and optically switching networks. The chapter concludes with an overview of application areas for photonic networks and expected technological progress in the near future.

The third chapter introduces network planning and routing mechanisms. First, the planning process is described by highlighting the important steps and necessary parameters such as network topology, traffic description, or functional models of the network elements. Then, main methods for network planning are presented with a more detailed look into modelling aspects and optimisation mechanisms. The main part of the chapter deals with routing mechanisms. Following some important definitions, several criteria for classifying routing strategies are highlighted. Then, an overview of well-known routing strategies is given, covering telephone networks as representative for circuit switching technology as well as IP (*internet protocol*), ATM (*asynchronous transfer mode*), and MPLS (*multi-protocol label switching*) networks which are based on packet switching.

Routing in WDM networks has to consider several specific aspects, mainly resulting from the WDM technology and wavelength conversion issues. Chapter 4 first highlights these new aspects and then gives a detailed overview of available literature on routing in WDM networks with dynamic establishment and release of wavelength channels. A summary of this investigation is given in Table 4.1. Several issues are identified that are not sufficiently covered in the published literature, such as the impact of non-Poisson traffic behaviour, strategies in networks with partial wavelength conversion, or the mutual dependencies of problem parameters.

Section 4.3 presents a design methodology for routing strategies in WDM networks. Key building blocks for such strategies are identified and important alternatives of how these building blocks can look like are described. For this structuring approach, a distinction is made between so-called *global strategies* where routing decisions are based on a full knowledge of the network status, and so-called *hop-by-hop strategies* where each node has only knowledge of its own status and the status of its outgoing links. The final section of this chapter presents the specific strategies used for the studies within this thesis.

Before a quantitative evaluation of routing strategies becomes possible, suitable network scenarios have to be defined. To achieve this, an appropriate modelling has first to be done, and this is the subject of the first part of Chapter 5. It describes the network model which takes the different possibilities for realising routing mechanisms into account, the node model which allows to consider different wavelength conversion functionalities, and the traffic model which also allows to create non-Poisson traffic behaviour. This modelling forms the basis for the dimensioning of example networks which is described in Section 5.3. Different regular and irregular network topologies are dimensioned, partly using an optimisation approach based on a *threshold accepting* mechanism.

---

These example networks are used for the performance evaluation of routing strategies. The studies are done using discrete event simulation based on the modelling approach described in Section 5.1. The results of this evaluation are presented in Chapter 6. In Section 6.1 linear chains are investigated to extract typical effects in WDM networks while excluding possible influence from routing strategies. For the results shown in Section 6.2 more complex networks were used, so the impact of different routing strategies is also considered.

The results show that an efficient routing strategy for WDM networks has to comprise several components. Of central importance is a sufficiently large set of alternative routes to be searched. However, as shown in the Appendix for different network topologies, a full investigation of all possible path alternatives is only possible for smaller networks. A limitation of path lengths is necessary to guarantee stability even under high network load. Ideally, such a limitation takes into account both, the present network load and the distance between source and destination of a connection request. If available, the full network knowledge should be considered: global strategies achieve, in general, better results than hop-by-hop strategies. Connections between nodes with a longer distance usually experience higher blocking, so mechanisms to improve the fairness between node pairs with different distances are required. The results show that wavelength converters can significantly improve this fairness since long connections benefit most from conversion in the network. Finally, the strategy to use converters has to be adapted to the specific situation in a network, taking network topology, present load, and conversion capabilities into account. The routing strategies which are presented in this thesis combine these building blocks.

All the results presented in sections 6.1 and 6.2 were derived for Poisson traffic arrivals and negative-exponentially distributed holding times. Although it cannot be predicted how traffic in future WDM networks will behave, it can be expected that such simple traffic models – which are also used in almost all available literature – will not be able to appropriately describe those networks. Thus, it is of high interest to evaluate the potential impact of different traffic characteristics. Section 6.3 addresses this topic and reveals some counter-intuitive results. In conclusion, the results in this section show that traffic behaviour has a very strong and sometimes unexpected impact on network performance and therefore more knowledge on traffic behaviour is essential in the future.

Section 6.4 illustrates a possible interaction between network dimensioning and performance evaluation. Insights from the dynamic network behaviour can be used to identify either bottlenecks or locations with more resources than required. In such a case, the network dimensioning can be adapted so that the dynamic network behaviour can also be significantly improved.

Finally, Chapter 7 summarises the main results of this thesis and gives an outlook on possible extensions that leverage on the presented results.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Summary</b> .....	<b>i</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>v</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>ix</b>
<b>Formelzeichen</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Photonische Kommunikationsnetze .....	2
1.2 Übersicht über die Arbeit .....	3
<b>2 Photonische Netze mit WDM-Technologie</b> .....	<b>6</b>
2.1 Grundlagen .....	6
2.1.1 Physikalische Grundlagen .....	6
2.1.2 Multiplexverfahren .....	9
2.1.3 Komponenten optischer Netze .....	11
2.1.3.1 Faserstrecken .....	11
2.1.3.2 Optische Sender .....	13
2.1.3.3 Optische Empfänger .....	15
2.1.3.4 Verstärker .....	16
2.1.3.5 Schaltelemente .....	17
2.1.3.6 Wellenlängenkonverter .....	20
2.1.3.7 Regeneratoren .....	23
2.1.3.8 Filter, Multiplexer und Demultiplexer .....	24
2.1.4 Systeme für WDM-Netze .....	25
2.1.4.1 Übertragungssysteme .....	26
2.1.4.2 Vermittlungssysteme .....	27
2.1.5 Relevante Standards und Empfehlungen .....	31
2.2 Architekturen für photonische Netze .....	33
2.2.1 Schichtenmodelle für optische Transportnetze .....	33
2.2.1.1 OTN-Modell nach G.872 .....	34
2.2.1.2 Beziehung zwischen dem OSI-Modell und dem OTN-Modell .....	37
2.2.1.3 Begriffe und Netzmodell für die vorliegende Arbeit .....	37

---

2.2.2	Optische Transportnetze . . . . .	39
2.2.2.1	Anwendungsgebiete und Netzstrukturen. . . . .	39
2.2.2.2	Wellenlängenkonversion. . . . .	41
2.2.2.3	Knotenarchitekturen für optische Transportnetze . . . . .	44
2.2.3	Passive optische Netze . . . . .	46
2.2.4	Weitere Netzarchitekturen und Netzkonzepte. . . . .	48
2.3	Schutzmechanismen. . . . .	49
2.3.1	Grundlagen . . . . .	50
2.3.2	Schutzmechanismen in elektronisch vermittelnden Transportnetzen . . . . .	52
2.3.3	Schutzmechanismen in photonischen Netzen . . . . .	53
2.4	Aktueller Einsatz und zukünftige Entwicklungen photonischer Netze . . . . .	55
2.4.1	Einsatz faserbasierter Kommunikationsnetze . . . . .	55
2.4.2	Absehbare technologische Weiterentwicklungen . . . . .	57
<b>3</b>	<b>Netzplanung und Verkehrslenkung . . . . .</b>	<b>59</b>
3.1	Aspekte des Netzbetriebs. . . . .	59
3.2	Ziele und Methoden der Netzplanung . . . . .	60
3.2.1	Ablauf und Hauptaufgaben der Netzplanung . . . . .	61
3.2.2	Methoden der Netzplanung. . . . .	66
3.2.2.1	Modellierung . . . . .	66
3.2.2.2	Optimierungsverfahren . . . . .	68
3.2.2.3	Weitere Methoden. . . . .	70
3.3	Grundlagen der Verkehrslenkung . . . . .	71
3.3.1	Begriffsdefinitionen . . . . .	71
3.3.2	Klassifizierungsmöglichkeiten für Verkehrslenkungsverfahren. . . . .	74
3.3.3	Optimierungsziele für Verkehrslenkungsstrategien . . . . .	79
3.4	Beispiele für Verkehrslenkungsverfahren . . . . .	80
3.4.1	Verkehrslenkungsverfahren für durchschaltevermittelnde Netze. . . . .	81
3.4.2	Verkehrslenkungsverfahren für paketvermittelnde Netze. . . . .	84
3.4.2.1	Verkehrslenkungsverfahren für IP-basierte Netze . . . . .	84
3.4.2.2	Verkehrslenkungsverfahren für ATM-Netze . . . . .	87
3.4.3	Verkehrslenkungsverfahren in MPLS-basierten Netzen. . . . .	88
<b>4</b>	<b>Verkehrslenkung in WDM-Netzen mit dynamischem Verbindungsauf- und abbau. . . . .</b>	<b>90</b>
4.1	Spezifika der Verkehrslenkung für WDM-Transportnetze . . . . .	90
4.1.1	WDM-Technik . . . . .	90
4.1.2	Wellenlängenkonversion. . . . .	93
4.1.3	Dienste und Verkehrsverhalten. . . . .	95
4.1.4	Technologische Aspekte und Netztopologie. . . . .	96
4.2	Übersicht bekannter Untersuchungen für WDM-Netze. . . . .	97

4.2.1	Tabellarische Klassifikation der Arbeiten . . . . .	97
4.2.2	Allgemeine Abschätzungen und Grenzwert-Betrachtungen . . . . .	101
4.2.3	Untersuchung von starren Verkehrslenkungsschemata . . . . .	102
4.2.4	Untersuchung von alternativen Verkehrslenkungsschemata . . . . .	104
4.2.5	Untersuchung von dynamischen Verkehrslenkungsschemata . . . . .	106
4.2.6	Absuchstrategien zur Belegung von Wellenlängenkanälen . . . . .	109
4.2.7	Strategien zur Platzierung und Verwendung von Konvertern . . . . .	110
4.2.8	Kombinierte Verkehrslenkung für Arbeits- und Schutzpfade . . . . .	113
4.2.9	Abschnittsweise Verfahren . . . . .	114
4.2.10	Weitere Arbeiten . . . . .	116
4.2.11	Bewertung der bisherigen Arbeiten . . . . .	119
4.3	Entwurf von Verkehrslenkungsstrategien . . . . .	120
4.3.1	Grundausrichtung von Strategien für die Verkehrslenkung . . . . .	120
4.3.2	Bestandteile globaler Strategien . . . . .	121
4.3.3	Bestandteile abschnittsweiser Strategien . . . . .	123
4.3.4	Interaktion zwischen Verkehrslenkung und Verbindungsannahme . . . . .	126
4.4	Beschreibung von Verkehrslenkungsstrategien . . . . .	127
4.4.1	Globale Strategien . . . . .	127
4.4.2	Abschnittsweise Strategien . . . . .	136
<b>5</b>	<b>Modellierung und Dimensionierung . . . . .</b>	<b>138</b>
5.1	Modellierung für die Leistungsbewertung und Netzdimensionierung . . . . .	139
5.1.1	Modellierung des WDM-Netzes . . . . .	139
5.1.1.1	Netzmodell für die Untersuchung globaler Strategien . . . . .	139
5.1.1.2	Netzmodell für die Untersuchung abschnittsweiser Strategien . . . . .	142
5.1.2	Knotenmodell . . . . .	143
5.1.3	Verkehrsmodell für die Dimensionierung der Beispielnetze . . . . .	145
5.1.4	Verkehrsmodell für die Untersuchung der Verkehrslenkungsverfahren . . . . .	145
5.2	Klassifizierung wesentlicher Einflussparameter . . . . .	147
5.3	Dimensionierung der Beispielnetze . . . . .	150
5.3.1	Verfahren und Regeln für die Dimensionierung . . . . .	150
5.3.2	Beschreibung der Beispielnetze . . . . .	152
<b>6</b>	<b>Leistungsbewertung der Strategien zur Ressourcen-Belegung und Verkehrslenkung . . . . .</b>	<b>157</b>
6.1	Untersuchungen an linearen Ketten . . . . .	158
6.1.1	Absuchstrategie für Wellenlängenkanäle . . . . .	159
6.1.2	Wellenlängenkonversion . . . . .	162
6.1.3	Faserzahl . . . . .	166
6.1.4	Anzahl der Kanäle . . . . .	168
6.1.5	Verfahren zur Verbesserung der Fairness . . . . .	172

---

6.1.6	Konzentration des Verkehrs auf einen Knoten . . . . .	176
6.1.7	Diskussion der Ergebnisse für lineare Ketten . . . . .	177
6.2	Untersuchung von Verkehrslenkungsverfahren. . . . .	179
6.2.1	Einfluss der Netztopologie . . . . .	179
6.2.2	Einfluss des Verkehrslenkungsschemas . . . . .	180
6.2.3	Einfluss der dynamischen, adaptiven Pfadberechnung . . . . .	185
6.2.4	Abschnittsweise Verfahren . . . . .	190
6.2.5	Einfluss von Strategien zur Pfadlängenbegrenzung . . . . .	193
6.2.6	Einfluss des Konversionsgrades im Netz . . . . .	201
6.2.7	Schlussfolgerungen . . . . .	207
6.3	Auswirkungen des Verkehrsverhaltens . . . . .	208
6.3.1	Untersuchungen am G/G/n-System. . . . .	209
6.3.2	Untersuchung der linearen 9-Knoten-Kette . . . . .	210
6.3.3	Untersuchung des Gitternetzes . . . . .	214
6.4	Auswirkungen auf die Netzdimensionierung. . . . .	216
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>	<b>221</b>
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>225</b>
	<b>Anhang: Anzahl von Wegen und Pfaden in optischen Netzen . . . . .</b>	<b>250</b>
A.1	Anzahl möglicher Wege und Pfade für ein Knotenpaar bei vollvermaschten Netzen. . . . .	251
A.2	Anzahl möglicher Wege und Pfade für ein Knotenpaar bei bidirektionalen Ringnetzen . . . . .	253

# Abkürzungen

ACTS	Advanced Communications Technologies and Services (Forschungsprogramm der Europäischen Union)
ADM	Add-Drop-Multiplexer
AGR-LD	Alternative Global Routing (alternative, globale Verkehrslenkung) mit link-disjunkten Alternativwegen
AGR-x	Alternative Global Routing (alternative, globale Verkehrslenkung), <i>x</i> vorgegebene Alternativwege
AlGaInAs	Aluminium-Gallium-Indium-Arsenid
AOTF	Acousto-Optic Tunable Filter, akusto-optischer verstellbarer Filter
APD	Avalanche Photo Diode, Lawinenphotodiode
ARPA	Advanced Research Projects Agency
As	Arsen
AS	Autonomous System
ASE	Amplified Spontaneous Emission, verstärkte spontane Emission
ASON	Automatic Switched Optical Network
ASTN	Automatic Switched Transport Network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AWG	Arrayed Waveguide Grating, Vielkanal Wellenlängen-Multiplexer
BGP	Border Gateway Protocol
BPP	Bernoulli-Poisson-Pascal-Näherung
CAC	Connection Admission Control, Verbindungsannahmesteuerung
CC	Cross-Connect
CDM	Code Division Multiplexing, Codemultiplex
DAR	Dynamic Alternative Routing
DBR-Laser	Distributed Bragg Reflection Laser, Laser mit verteiltem Bragg-Reflektionsgitter
DCF	Dispersion Compensating Fibre, dispersionskompensierende Faser
DCR	Dynamically Controlled Routing
DFB-Laser	Distributed Feedback Laser, Laser mit verteilter Rückkopplung

DFG	Difference Frequency Generation, Differenzfrequenz-Bildung
DGR	Dynamic Global Routing (vollständig dynamische globale Verkehrslenkung)
DGR-x	Dynamic Global Routing with $x$ pre-calculated alternatives (dynamische globale Verkehrslenkung mit $x$ vorgegebenen Alternativwegen)
DNHR	Dynamic Nonhierarchical Routing
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing, dichtes Wellenlängenmultiplex
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier, Erbiumfaser-Verstärker
EGP	Exterior Gateway Protocol
FDM	Frequency Division Multiplexing, Frequenzmultiplex
FF	First-Fit (Absuchstrategie für Wellenlängenkanäle)
FGR	Fixed Global Routing (starre globale Verkehrslenkung)
FTTB	Fiber To The Building
FTTH	Fiber To The Home
FWM	Four Wave Mixing, Vierwellen-Mischung
Gbit/s	Gigabit pro Sekunde ( $10^9$ Bit pro Sekunde)
Ga	Gallium
GaAs	Gallium-Arsenid
Ge	Germanium
GMPLS	Generalized Multi-Protocol Label Switching
ICMP	Internet Control Message Protocol
IETF	Internet Engineering Task Force
IGP	Interior Gateway Protocol
In	Indium
InP	Indium-Phosphid
IP	Internet Protocol
ISO	International Organisation for Standardisation
ITU	International Telecommunication Union
ITU-T	International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector
KE	Kosteneinheit (Maß bei der Netzoptimierung)
LA	Leistungsanpassung
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung
LDC	Linear Divider Combiner
LED	Light Emitting Diode, Leuchtdiode
LL	Least-Loaded (Absuchstrategie für Wellenlängenkanäle)
LLN	Linear Lightwave Network
LLR	Least Loaded Routing
LSP	Label Switched Path

---

LU	Least-Used (Absuchstrategie für Wellenlängenkanäle)
MAC	Media Access Control
MAN	Metropolitan Area Network, Regionalnetz/Stadtnetz
MEMS	Micro Electro Mechanical System
MHVP	Multi Hop Virtual Path
MPLS	Multi-Protocol Label Switching
MP $\lambda$ S	Multi-Protocol Lambda Switching
MS	Minimum Sum (Absuchstrategie für Wellenlängenkanäle)
MU	Most-Used (Absuchstrategie für Wellenlängenkanäle)
NP	Non-deterministic Polynomial-time problem
NSF	National Science Foundation
OADM	optischer Add-Drop-Multiplexer
OAM	Operation, Administration and Maintenance
OBS	Optical Burst Switching
OCC	optischer Cross-Connect
OCh	Optical Channel
ODSI	Optical Domain Service Interconnect Initiative
OEIC	Opto-Electronic Integrated Circuit
OFDM	Optical Frequency Division Multiplexing, Optisches Frequenzmultiplex
OIF	Optical Internet Forum
OLS	Optical Label Switching
OMS	Optical Multiplex Section
OOC-x	Originating Office Control ( <i>x</i> Alternativen pro Knoten)
OPS	Optical Packet Switching
OSI	Open Systems Interconnection
OSPF	Open Shortest Path First
OTN	Optisches Transportnetz
OTS	Optical Transmission Section
P	Phosphor
PDH	Plesiochrone Digitale Hierarchie
PIN	p-doped, intrinsic, n-doped
PNNI	Private Network-Network Interface
PON	Passive Optical Network
QoS	Quality of Service
Rand	Random (Absuchstrategie für Wellenlängenkanäle)
RCC	Routing Control Center
RCL	Relative Capacity Loss (Absuchstrategie für Wellenlängenkanäle)
RIP	Routing Information Protocol
RTNR	Real Time Network Routing

SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDM	Space Division Multiplexing, Raummultiplex
SHVP	Single Hop Virtual Path
Si	Silizium
SLM	Spatial Light Modulator, räumlicher Lichtmodulator
SNMP	Simple Network Management Protocol
SOA	Semiconductor Optical Amplifier, Halbleiterverstärker
SOC-x	Sequential Office Control ( <i>x</i> Alternativen pro Knoten)
SOCc-x	Sequential Office Control with Crankback ( <i>x</i> Alternativen pro Knoten)
SP	Shortest Path, kürzester Weg
STR	State- and Time-Dependent Routing
TA	Threshold Accepting
Tbit/s	Terabit pro Sekunde ( $10^{12}$ Bit pro Sekunde)
TCP	Transmission Control Protocol
TDM	Time Division Multiplexing, Zeitmultiplex
VA	Verbindungsanforderung
VC	Virtual Connection, virtuelle Verbindung
VCC	Virtual Channel Connection
VP	Virtual Path, virtueller Pfad
VPC	Virtual Path Connection
VWP	Virtual Wavelength Path
XGM	Cross Gain Modulation
XPM	Cross Phase Modulation, Kreuzphasenmodulation
WAN	Wide Area Network, Weitverkehrsnetz
WDM	Wavelength Division Multiplexing, Wellenlängenmultiplex
WDMA	Wavelength Division Multiple Access, Wellenlängen-Vielfachzugriffsverfahren
WI	Wavelength Interchanging (volle Wellenlängenkonversion im Netz)
WL	Wellenlänge / Wellenlängenkanal
WP	Wavelength Path
WR	Wavelength Routing (keine Wellenlängenkonversion im Netz)

# Formelzeichen

## Formelzeichen zur Beschreibung des Lichtes

$c$	Lichtgeschwindigkeit im leeren Raum ( $c = 2,99792458 \cdot 10^8$ m/s)
$f$	Frequenz
$n$	Brechzahl eines optischen Mediums
$v$	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes in einem optischen Medium
$v_g$	Gruppengeschwindigkeit
$v_{ph}$	Phasengeschwindigkeit
$\lambda$	Wellenlänge

## Formelzeichen zur Beschreibung optischer Netze

$\lfloor x \rfloor$	Die größte ganze Zahl, die kleiner oder gleich $x$ ist: $\lfloor x \rfloor = \max\{i \in \mathbf{Z} : i \leq x\}$
$A_{i,j}$	Angebot vom Knoten $\kappa_i$ zum Knoten $\kappa_j$
$B$	Verlustwahrscheinlichkeit
$B_{dist}(d)$	Verlustwahrscheinlichkeit für Verbindungsanforderungen zwischen Knotenpaaren der Distanz $d$
$B_{i,j}$	Verlustwahrscheinlichkeit für Verbindungsanforderungen zwischen Knoten $\kappa_i$ und Knoten $\kappa_j$
$B^{WI}, B^{WR}$	Verlustwahrscheinlichkeit für das Konversionsszenario WI bzw. WR
$c$	Variationskoeffizient ( $c = \sigma_X/E[X]$ )
$c_A$	Variationskoeffizient für die Ankunftsabstände von Wellenlängenkanal-Anforderungen
$c_H$	Variationskoeffizient für die Haltedauern von Wellenlängenkanal-Verbindungen

$d_{ij}$	Distanz zwischen den Knoten $i$ und $j$ , ausgedrückt als Anzahl der Verbindungsabschnitte entlang des kürzest möglichen Weges
$D$	Durchmesser eines Graphen (größte Distanz eines Knotenpaares im Netz)
$f$	Anzahl der Fasern
$f_i$	Anzahl der am Knoten $K_i$ angeschlossenen Fasern
$G_{Konv}$	Konversionsgewinn, es gilt: $G_{Konv} = 1 - B^{WI}/B^{WR}$
$h$	mittlere Haltedauer einer Verbindung ( $h = E[T_H]$ )
$K_i$	Knoten Nr. $i$
$L$	Anzahl der gerichteten Links eines Netzes
$L_{i,j}$	(gerichteter) Link zwischen den Knoten $K_i$ und $K_j$
$n$	Anzahl der Kanäle
$N$	Anzahl der Knoten im Netz
$p_{ij}$	Anzahl der Pfade zwischen den Knoten $K_i$ und $K_j$ , $i \neq j$
$r_l$	Anzahl der Wege (Routen) mit genau $l$ Abschnitten
$r_{ges}$	Gesamtanzahl der möglichen Wege für ein Knotenpaar
$S$	Schwellwert (Auslastungsgrenze) für adaptive Begrenzungsverfahren
$T$	Anzahl der Trassen eines Netzes
$T_A$	Zufallsvariable für den Ankunftsabstand zweier Wellenlängenkanal-Anforderungen eines Knotenpaares (von $K_i$ nach $K_j$ )
$T_H$	Zufallsvariable für die Haltedauer („Belegungsdauer“, „Bedienzeit“) einer erfolgreich aufgebauten Wellenlängenkanal-Verbindung
$v_{i,j}$	statische Verbindungsanforderungen zwischen Knoten $K_i$ und $K_j$
$w$	Anzahl der Wellenlängen
$\mathbf{Z}$	Menge der ganzen Zahlen
$\gamma_i$	Konversionsgrad im Knoten $K_i$
$\kappa$	Anzahl von Konvertern
$\kappa_i$	Anzahl der Konverter im Knoten $K_i$
$\lambda_i$	Wellenlängenkanal Nr. $i$

# Kapitel 1

## Einführung

Der momentan stattfindende Übergang von der Industrie- zur Wissensgesellschaft bewirkt, dass *Information* inzwischen ein Wirtschaftsfaktor von entscheidender Bedeutung für die moderne Gesellschaft ist. Als direkte Folge ist neben der Datenverarbeitung auch die dem Transport von Information dienende Kommunikationstechnik zu einer Schlüsseltechnologie geworden. Sie übertrifft in vielen industrialisierten Ländern inzwischen bereits herkömmliche Industriezweige an Bedeutung.

Die Anforderungen an Kommunikationsnetze steigen in vielerlei Hinsicht, beispielsweise in Bezug auf die erforderliche Übertragungsrate oder Ausfallsicherheit. Dies wird von zahlreichen Faktoren verursacht. So nimmt die Anzahl der an Kommunikationsnetze angeschlossenen Teilnehmer weiter zu. Für leitungsgebundene Telefoniedienste findet dieses Wachstum vor allem außerhalb der Industrieländer statt, während für die industrialisierten Länder das Hauptwachstum bei den Mobilfunk- und Datennetzen erfolgt. Insbesondere die starke Zunahme der Nutzung des *Internet*, eines weltweiten Verbundes von IP-basierten Netzen (*internet protocol*, IP), steigert die Nachfrage nach Übertragungsbandbreite.

Dies gilt sowohl für die private wie auch für die geschäftliche Nutzung der Netze. In beiden Fällen nimmt neben der Teilnehmeranzahl auch die Anzahl verfügbarer und für den Benutzer lukrativer Dienstangebote zu, wobei neue Dienste häufig erhöhte Anforderungen an die Kommunikationsnetze stellen. Umgekehrt erlauben die technischen Fortschritte auch die kostengünstige Realisierung neuer Dienste, was ein wesentlicher Aspekt für den Erfolg solcher Innovationen darstellt. Außerdem folgt aus der zunehmenden Globalisierung der Wirtschaftsbeziehungen auch ein wachsender Bedarf, Informationen jederzeit weltweit verfügbar zu haben. Die Informationen selbst können wiederum an beliebigen Lokationen gespeichert sein.

Ein signifikanter und in Zukunft noch zunehmender Anteil des Datenverkehrs in Kommunikationsnetzen wird durch den automatisierten – ohne menschliche Beteiligung erfolgenden – Datenaustausch zwischen Rechnern verursacht. Bedeutende Beispiele sind der automatische

Abgleich verteilter Datenbanken oder die Sicherung großer Datenmengen an entfernten Lokationen (*backup services*).

Auch die seit einigen Jahren vorangetriebene Deregulierung des Kommunikationsmarktes hat die Entwicklung der Kommunikationsnetze positiv beeinflusst. Diese Aufzählung der Faktoren für steigende Anforderungen an Kommunikationsnetze ist sicher nicht vollständig, zeigt aber, dass das Wachstum der Informations- und Kommunikationstechnologie auf einer breiten Basis beruht.

Alle heute bekannten Prognosen stimmen darin überein, dass die genannten Faktoren in den kommenden Jahren eine bedeutende Rolle beibehalten werden. Dadurch wird auch in Zukunft ein wachsender Bedarf an Bandbreite in Kommunikationsnetzen vorhanden sein. In diesem Zusammenhang kommt der Entwicklung photonischer Kommunikationsnetze, die im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen, eine besondere Bedeutung zu. Dabei umfasst der Begriff Photonik nicht nur rein optische Systeme, sondern in einem erweiterten Sinn die Übertragung und Verarbeitung von Informationen mit optischen und optoelektronischen Mitteln. Im Rahmen dieser Arbeit schließt der Begriff „optisches System“ deshalb auch die Verwendung von optoelektronischen Komponenten, beispielsweise für die Steuerung eines Systems, mit ein.

## 1.1 Photonische Kommunikationsnetze

Insbesondere seit der Entwicklung der WDM-Technik (*wavelength division multiplexing*, Wellenlängenmultiplex), bei der mehrere Wellenlängen über eine Faser übertragen werden, ist die optische Kommunikationstechnik eine der sich am schnellsten weiterentwickelnden Technologien. Wurde bisher die Entwicklung bei der Integrationsdichte von Schaltelementen auf Siliziumchips mit einer Verdopplung ungefähr alle 18 bis 24 Monate (das sogenannte *Moore'sche Gesetz*<sup>1</sup> [75]) für kaum steigerbar gehalten, erreicht die Zunahme der Übertragungsrate über eine Glasfaser deutlich höhere Werte: Hier wurde in den letzten Jahren bei kommerziell verfügbaren WDM-Systemen im Mittel eine Verdopplung jeweils nach weniger als neun Monaten erreicht (von 5 Gbit/s im Jahr 1994 bis zu über 1,6 Tbit/s im Jahr 2000).

Durch diese hohe Steigerungsrate sind heute bereits Systeme realisierbar, die über eine einzelne Glasfaser ein Terabit pro Sekunde und mehr übertragen können. Verbunden mit weiteren vorteilhaften Eigenschaften der Glasfaser als Übertragungsmedium hat dies dazu geführt, dass heute nahezu alle Kommunikationsnetze im Fern- und Regionalbereich (*wide area network*, WAN bzw. *metropolitan area network*, MAN) auf optischer Übertragungstechnik beruhen. Dabei kann die WDM-Technik prinzipiell als Transporttechnik für alle heute bekannten Netze dienen. Dies schließt beispielsweise SDH- und SONET-Netze (*synchronous digital hierarchy*,

---

1. In seiner ersten Veröffentlichung mit einer Prognose für diese Wachstumsrate [193] war Moore noch von einer Verdopplung ungefähr alle 12 Monate ausgegangen. Dieser Wert wurde von ihm später auf die oben genannten 18 bis 24 Monate modifiziert.

---

SDH und *synchronous optical network*, SONET), ATM-Netze (*asynchronous transfer mode*, ATM) und IP-basierte Netze wie das Internet mit ein.

Die WDM-Technik wurde zuerst in sogenannten Punkt-zu-Punkt-Konfigurationen eingesetzt, bei denen statische WDM-Strecken zur Verbindung von elektronisch vermittelnden Netzknoten dienen. Der nächste Entwicklungsschritt geht nun hin zu optisch vermittelnden Netzknoten, die einzelne Wellenlängenkanäle verschalten können. Dadurch wird es möglich, eine flexible photonische Netzebene zu realisieren. Den entsprechenden Fragestellungen hinsichtlich geeigneter Netzarchitektur, erforderlicher Komponenten und Systeme sowie Betriebsweisen eines solchen Netzes ist in den letzten Jahren großer Raum in zahlreichen Veröffentlichungen eingeräumt worden, beispielsweise durch IEEE Sonderhefte [3, 4, 5, 6, 7] oder durch eigens diesem Thema gewidmeten Zeitschriftenreihen [1, 2] und Konferenzen.

Durch die großen Fortschritte bei den optischen Schaltelementen einerseits sowie den stark zunehmenden Anforderungen an die flexible Konfigurierbarkeit hochbitratiger Kanäle andererseits werden momentan vermehrt flexible optische Netzelemente in Transportnetzen eingeführt. Heute bestehen die Verbindungen in diesen Netzen meist für sehr lange Zeiträume, die Netze sind also noch weitgehend statisch. Allerdings besteht breite Übereinkunft – beispielsweise auch in allen relevanten Standardisierungsgremien – darüber, dass in naher Zukunft die Dynamik in diesen Netzen stark zunehmen wird.

Im Wesentlichen sind zwei Gründe hierfür ausschlaggebend: Einerseits werden vermehrt Ersatzschaltemechanismen in der optischen Netzebene realisiert, wodurch der Bedarf an schnell schaltbaren Wellenlängenkanälen steigt. Andererseits wird erwartet, dass Transportnetze in Zukunft vermehrt hochbitratige Verbindungen innerhalb kurzer Zeit bereitstellen können müssen. Zur Zeit wird in der Standardisierung bereits an Mechanismen für Wählverbindungen auf Wellenlängen-Ebene gearbeitet (*wavelength on demand*). Beispiele für Applikationen, die solche Mechanismen erfordern, sind sogenannte „Bandbreite-Makler“ (*bandwidth broker*) oder große Vermittlungsknoten im Internet (*IP router*), die Transportkanäle zu anderen Vermittlungsknoten bei Bedarf sehr schnell aufbauen – und gegebenenfalls auch wieder abbauen – können. Vor diesem Hintergrund gewinnt die Untersuchung dynamischer WDM-Netze, zu der auch diese Arbeit beiträgt, immer größere Bedeutung.

## 1.2 Übersicht über die Arbeit

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf dem Entwurf und der Bewertung von Verfahren zur Ressourcen-Belegung und Verkehrslenkung in WDM-Netzen mit dynamischem Auf- und Abbau von Wellenlängenkanälen. Es werden Transportnetze betrachtet, bei denen als Vermittlungsprinzip die Durchschaltevermittlung zu Grunde liegt. Daraus ergeben sich die folgenden Hauptziele für diese Arbeit:

- Beschreibung der grundlegenden Konzepte und Architekturen von WDM-Transportnetzen einschließlich einer Darstellung des momentanen Standes der Technik sowie der zu erwartenden Entwicklungen.
- Übersicht und Einordnung der bekannten Verfahren sowie Entwurf neuer und verbesserter Verfahren zur Verkehrslenkung und Ressourcen-Belegung in WDM-Netzen.
- Entwurf eines geeigneten Modells zur Beschreibung der betrachteten Systeme und Verfahren.
- Leistungsbewertung der entworfenen Verfahren sowie die Umsetzung des Modells in hierfür erforderliche Programmwerkzeuge.

Im folgenden Kapitel werden zunächst die erforderlichen Grundlagen für das Verständnis photonischer Netze vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Komponenten und Systemen für WDM-Netze. Darauf aufbauend wird eine Übersicht der wichtigsten Knoten- und Netzarchitekturen solcher Netze gegeben. Der Beschreibung von Schutzmechanismen ist ein eigener Abschnitt gewidmet, da diesen in photonischen Netzen auf Grund der großen transportierten Datenmengen eine zentrale Bedeutung zukommt. Das Kapitel schließt mit einem kurzen Ausblick auf die in naher Zukunft zu erwartenden Weiterentwicklungen.

Das dritte Kapitel stellt weitere Grundlagen bereit. Neben einer kurzen Einführung in Aspekte des Netzbetriebs werden Planungsverfahren für den Entwurf und die Dimensionierung von Kommunikationsnetzen vorgestellt. Solche Verfahren werden im Rahmen dieser Arbeit benötigt, um Beispielnetze für die in Kapitel 6 folgenden Leistungsuntersuchungen zu erhalten. Das Kapitel enthält auch eine Einführung in die Verfahren der Verkehrslenkung. Da es hierzu bereits zahlreiche Untersuchungen für elektronisch vermittelnde Netze gibt, wird zunächst eine Klassifizierung der bekannten Verfahren durchgeführt. Anschließend wird die Verkehrslenkung für die wichtigsten Vertreter elektronisch vermittelnder Netze beleuchtet: die durchschaltungsvermittelnden Telefonnetze sowie die paketvermittelnden IP-basierten und ATM-basierten Netze.

Mit zunehmendem Einsatz der WDM-Technik in Kommunikationsnetzen nimmt auch die Anzahl der Arbeiten zur Verkehrslenkung in solchen Netzen stark zu. Es ist charakteristisch für die rasche Entwicklung einer neuen Technologie, dass in den Arbeiten hierzu die Begriffe oft nicht einheitlich verwendet werden und die Abgrenzung zu bereits bekannten Untersuchungen und Erkenntnissen nur undeutlich vorhanden ist. Daher werden in Kapitel 4 zunächst die spezifischen Aspekte für die Verkehrslenkung in WDM-Netzen herausgearbeitet. Daran schließt sich eine Klassifizierung und ausführliche Übersicht über die Literatur zu diesem Thema an. Aufbauend auf den Erkenntnissen hieraus wird ein neues Entwurfsschema mit einer strukturierten Darstellung der wesentlichen Komponenten von Verkehrslenkungsverfahren in WDM-Netzen vorgeschlagen. Unter Verwendung dieses Schemas werden dann neue Verfahren vorgestellt. Hierbei werden zwei Klassen unterschieden: Bei den *globalen* Verfahren steht der Ver-

kehrslenkungssteuerung eine vollständige Netzsicht zur Verfügung, während bei den *abschnittsweisen* Verfahren in jedem Netzknoten nur eine lokale Sicht auf den betreffenden Knoten und die daran angeschlossenen Übertragungsstrecken vorhanden ist.

Um die Verkehrslenkungsverfahren untersuchen zu können, ist eine geeignete Modellierung der betrachteten Systeme notwendig. Diese Modellierung, welche die Basis der Implementierung sowohl des Dimensionierungsprogramms als auch des verwendeten Simulationsprogramms bildet, ist in Kapitel 5 enthalten. Sie umfasst das Netzmodell, das Modell eines vermittelnden Netzknotens sowie die Modellierung des Verkehrsverhaltens. Außerdem enthält das Kapitel auch die Dimensionierung der Beispielnetze, die für die weiteren Untersuchungen erforderlich sind. Hierfür wird zunächst das Vorgehen für die Dimensionierung beschrieben, und anschließend werden die in dieser Arbeit verwendeten Beispielnetze mit ihren wesentlichen Eigenschaften vorgestellt.

Gegenstand von Kapitel 6 sind Studien zur Leistungsbewertung der entworfenen Verfahren. Die Hauptschwierigkeit besteht darin, trotz der großen Anzahl von Parametern, welche die Güte einer Verkehrslenkung in WDM-Netzen beeinflussen, aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Um dies zu erreichen, werden zunächst lineare Ketten untersucht. Bei diesen existieren keine Alternativwege für die Realisierung von Verbindungsanforderungen. Dies erlaubt es, zahlreiche Parameter isoliert zu untersuchen. Anschließend werden die Untersuchungen auf größere und stärker vermaschte Netze ausgedehnt und der Schwerpunkt auf die Bewertung der unterschiedlichen Verkehrslenkungsverfahren gelegt. Daran schließt sich eine vertiefte Abhandlung zur Auswirkung des Verkehrsverhaltens auf die Leistungsfähigkeit optischer Kommunikationsnetze an. Das Kapitel wird mit einer Betrachtung zur möglichen Rückkopplung zwischen der gezeigten Leistungsbewertung und der im Kapitel 5 beschriebenen Netzdimensionierung abgeschlossen.

# Kapitel 2

## Photonische Netze mit WDM-Technologie

In diesem Kapitel werden die Grundlagen glasfasergebundener photonischer Netze beschrieben. In der Literatur finden sich weitere spezielle Varianten photonischer Netze, die im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden. Dazu zählen insbesondere „drahtlose optische Netze“ [114, 115] sowie „optische Verbindungsnetzwerke“ zur Verbindung von Multiprozessorsystemen oder zur optischen Signalverarbeitung [98, 146, 160, 205, 290]. Der erste Abschnitt dieses Kapitels beschreibt einige physikalische und technologische Grundlagen photonischer Netze. Der zweite Abschnitt stellt Architekturen optischer Netze vor, wobei optische Transportnetze im Mittelpunkt stehen. Im Abschnitt 2.3 folgen einige Betrachtungen zu Schutzmechanismen. Abschließend wird in Abschnitt 2.4 ein kurzer Überblick zum heutigen Stand und zur absehbaren Weiterentwicklung photonischer Netze gegeben.

### 2.1 Grundlagen

Dieser Abschnitt stellt die Grundlagen bereit, die zum Verständnis optischer Netze erforderlich sind. Nach einer kurzen Beschreibung physikalischer Grundlagen sowie der für die vorliegende Arbeit zentralen WDM-Technik folgt eine Übersicht über wichtige Komponenten und Bauelemente. Daran schließt sich eine kurze Darstellung von Übertragungs- und Vermittlungssystemen für optische Netze an. Der Abschnitt schließt mit einem Überblick über relevante Standardisierungsarbeiten.

#### 2.1.1 Physikalische Grundlagen

Mit dem Begriff *Licht* werden in der optischen Nachrichtentechnik elektromagnetische Wellen mit einer Frequenz in der Größenordnung von 100 THz bis 1000 THz bezeichnet, obwohl dieser Bereich für das menschliche Auge nicht vollständig sichtbar ist. An Stelle der *Frequenz*

( $f$ ) wird häufig die *Wellenlänge* ( $\lambda$ ) zur Beschreibung des Lichtes verwendet, da im Vakuum beide über die einfache Formel

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.1)$$

zueinander in Beziehung stehen.  $c$  ist dabei die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Der oben angegebene Frequenzbereich entspricht damit einem Wellenlängenbereich von 300 nm bis 3000 nm.

*Optik* bezeichnet ein Teilgebiet der Physik, das sich mit den Eigenschaften von Licht beschäftigt. Es hat sich gezeigt, dass viele Fragen zur Ausbreitung des Lichtes mit einem *Wellenmodell* behandelt werden können. Wenn die Wellenlänge deutlich kleiner als die zu untersuchenden Abmessungen sind, kann teilweise auch die vereinfachte *Strahlenoptik* angewandt werden, bei der das Licht in Form geradliniger, sich ungestört kreuzender Strahlen modelliert wird.

In der optischen Nachrichtentechnik wird Licht meist nicht im Vakuum geführt, sondern in optischen Medien, d. h. Stoffen, in denen eine Lichtausbreitung erfolgt. Die Eigenschaften dieser Stoffe beeinflussen verschiedene Parameter der Ausbreitung, insbesondere die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$ . Zur Charakterisierung eines Materials wird die Brechzahl  $n$  definiert als

$$n = c/v \quad (2.2)$$

Die Brechzahl vieler Medien kann dabei durch ein äußeres elektrisches Feld beeinflusst werden (elektro-optischer Effekt, Pockels-Effekt). Dies wird bei vielen Komponenten für optische Netze ausgenutzt. Breitet sich Licht nicht im Vakuum, sondern in Stoffen aus, so bleibt die Frequenz  $f$  konstant, während sich  $\lambda$  und damit  $v$  ändert. Deshalb wird im Folgenden mit  $\lambda$  immer die Wellenlänge im Vakuum bezeichnet.

In Gleichung 2.2 ist zu beachten, dass  $v$  (und damit auch  $n$ ) in allen optischen Medien außer im Vakuum von der Wellenlänge  $\lambda$  abhängt. Für  $v$  wird häufig auch der Begriff *Phasengeschwindigkeit* ( $v_{ph}$ ) verwendet. Wird – wie in der Nachrichtentechnik praktisch immer der Fall – die Überlagerung mehrerer Wellen betrachtet, so wird die *Gruppengeschwindigkeit* ( $v_g$ ) eine wichtige Größe. Diese ist definiert als die Geschwindigkeit der Hüllkurvenwelle einer Wellengruppe [121]. Sie entspricht der Geschwindigkeit des Energietransports und damit auch der Geschwindigkeit optischer Impulse beispielsweise in einer Glasfaser.

Nur im Vakuum sind  $v_{ph}$  und  $v_g$  gleich groß. Dann ist die Brechzahl frequenzunabhängig und das Medium wird *dispersionsfrei* genannt. Die meisten Materialien sind *dispersionsbehaftet*, d. h. die Phasengeschwindigkeit ist frequenzabhängig. In diesem Fall sind  $v_{ph}$  und  $v_g$  unterschiedlich.  $v_g$  ist dabei von der Vakuumwellenlänge abhängig:

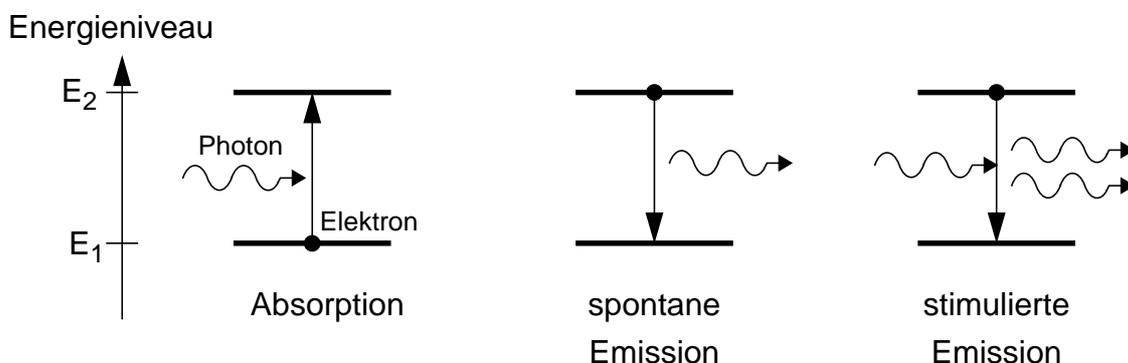
$$v_g = c / \left( n - \lambda \cdot \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad (2.3)$$

Außer im Vakuum tritt in allen optischen Medien bei der Ausbreitung von Licht ein Energieverlust durch Interaktion mit den Atomen des Mediums auf, d. h., das Licht wird gedämpft. Neben der Dämpfung ist die Interferenz ein weiterer, für die optische Nachrichtentechnik wichtiger Effekt. Er beschreibt die Erscheinungen, die durch Überlagerung mehrerer Lichtwellen an derselben Stelle des Raumes hervorgerufen werden [121].

Für die Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Licht und atomaren Stoffen ist an Stelle des Wellenmodells ein Teilchenmodell erforderlich, bei dem Licht als Summe von *Lichtquanten* oder *Photonen* betrachtet wird<sup>1</sup>. Drei Mechanismen lassen sich für die Wechselwirkung zwischen Licht und Atomen unterscheiden (siehe auch vereinfachte Darstellung in Bild 2.1 nach [116]):

- *Absorption*: Unter Anhebung eines Elektrons vom Energieniveau  $E_1$  auf das Niveau  $E_2$  wird ein Photon absorbiert.
- *Spontane Emission*: Unter Aussenden eines Photons geht ein Elektron vom Niveau  $E_2$  in das Niveau  $E_1$  über.
- *Stimulierte Emission*: Ein Photon stimuliert ein Elektron zum Übergang von  $E_2$  nach  $E_1$ . Dabei wird das ursprüngliche Photon durch ein weiteres, nach Frequenz und Phase identisches Photon verstärkt.

Die Energiedifferenz zwischen  $E_2$  und  $E_1$  (der sogenannte Bandabstand oder die Bandlücke des Atoms) muss der Energie des Photons entsprechen, damit eine Interaktion möglich ist. Die Energie eines Photons steht wiederum in direktem Zusammenhang mit dessen Wellenlänge. Deshalb lassen sich Materialien je nach vorhandenem Bandabstand gewissen Wellenlängenbereichen zuordnen, für die sie eingesetzt werden können. Im Bereich der optischen Nachrichtentechnik sind dabei Germanium (Ge, ca. 1,5-2  $\mu\text{m}$ ), Silizium (Si, ca. 0,8-0,9  $\mu\text{m}$ ), Indium-Phos-



**Bild 2.1:** Prinzipielle Wechselwirkungsmechanismen zwischen Licht und Atomen [116]

1. Prinzipiell sind die Darstellungen des Lichtes als Welle oder als Teilchen gleichberechtigt. In diesem Zusammenhang wird auch von der *Dualität Welle – Teilchen* gesprochen.

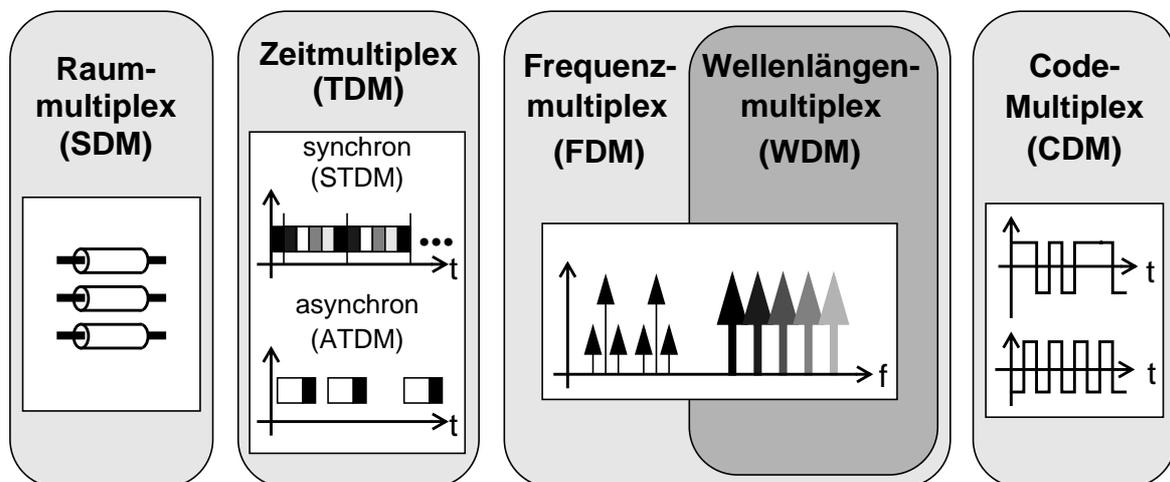
phid (InP, ca.  $0,9 \mu\text{m}$ ), Gallium-Arsenid (GaAs, ca.  $0,9 \mu\text{m}$ ) und Aluminium-Gallium-Indium-Arsenid (AlGaInAs, ca.  $0,7\text{-}3 \mu\text{m}$ ) von besonderem Interesse. Durch Variation der Halbleiterkomposition können sowohl die angegebenen Wellenlängenbereiche als auch große Arbeitsbereiche in deren Umgebung abgedeckt werden [116, 121].

## 2.1.2 Multiplexverfahren

Diese Arbeit konzentriert sich auf optische Netze basierend auf der Verwendung von Wellenlängenmultiplex (*wavelength division multiplexing*, WDM). Aus physikalischer Sicht handelt es sich dabei um die gleichzeitige Übertragung von Signalen unterschiedlicher Wellenlänge über eine einzelne Glasfaser. Aus Sicht des Netzbetriebs handelt es sich bei WDM um ein Multiplexverfahren, also um ein Verfahren zur gleichzeitigen Übermittlung von Signalen oder Elementen mehrerer Nachrichten.

Bild 2.2 zeigt eine Übersicht der gebräuchlichen Multiplexverfahren. Der Begriff Raummultiplex (*space division multiplexing*, SDM) wird verwendet, wenn die Signale in räumlich getrennten Kanälen geführt werden. Beim Zeitmultiplex (*time division multiplexing*, TDM) werden die Signale verschiedener Nachrichten zeitlich verschachtelt übertragen, wobei die Zeitschlitze beim synchronen Zeitmultiplex jedem Signal periodisch zugeteilt werden, beim asynchronen Zeitmultiplex dagegen in unregelmäßigen Abständen. Beim Frequenzmultiplex (*frequency division multiplexing*, FDM) steht jedem Signal ein eigener Frequenzbereich zur Verfügung. Beim Codemultiplex (*code division multiplexing*, CDM) werden die Signale über orthogonale Codewörter repräsentiert.

WDM (*wavelength division multiplexing*) ist der Begriff für die Variante des FDM, bei dem die Trägerfrequenzen im optischen Bereich liegen. Hierfür ist auch der Begriff optisches Fre-

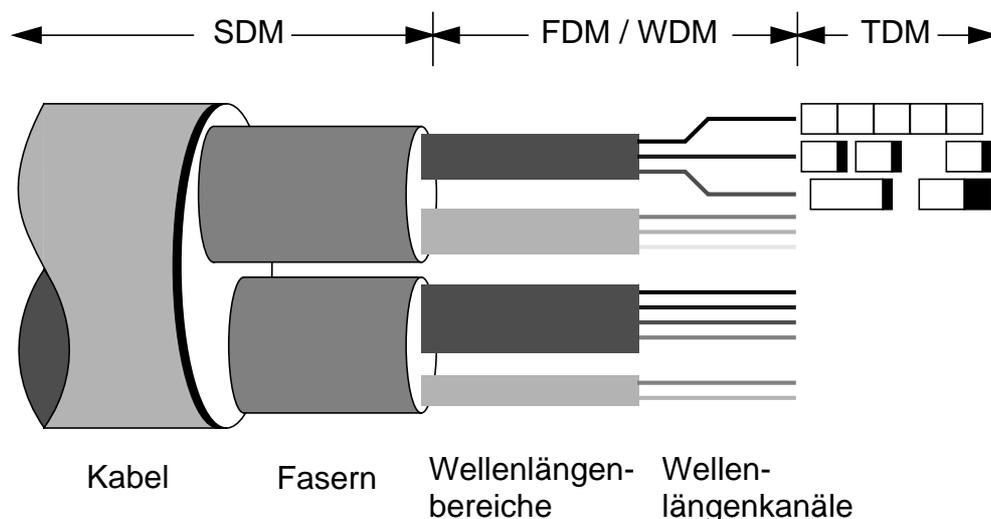


**Bild 2.2:** Schematische Darstellung der Multiplexverfahren

quenzmultiplex (*optical frequency division multiplexing*, OFDM) gebräuchlich. Je nach Realisierung des Multiplexverfahrens werden häufig die Begriffe „Fenstermultiplex“ (wenn die Frequenzen in verschiedenen optischen Fenstern liegen, siehe Abschnitt 2.1.3.1) oder „dichtes Wellenlängenmultiplex“ (DWDM, *dense wavelength division multiplexing*) bei geringem Abstand der optischen Trägerfrequenzen eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Oberbegriff WDM unabhängig von den genauen Abständen der Trägerfrequenzen verwendet.

Durch die WDM-Technik wird es möglich, die auf einem Netzabschnitt verfügbare Bandbreite in einer mehrstufigen Multiplexhierarchie aufzuteilen (Bild 2.3). Raummultiplex findet in zwei Stufen statt: Auf einem Netzabschnitt (Trasse) können mehrere Kabel verlegt sein, jedes Kabel kann mehrere Glasfasern beinhalten. Im Frequenzbereich können auf jeder Faser mehrere Wellenlängenbereiche (*waveband*) unterschieden werden, die wiederum aus mehreren Wellenlängenkanälen bestehen können. Schließlich kann jeder Wellenlängenkanal im Zeitbereich durch synchrones oder asynchrones Zeitmultiplex weiter unterteilt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird meist davon ausgegangen, dass alle Wellenlängenkanäle auf einer Faser in einem einzigen Wellenlängenbereich zusammen gefasst sind. Dieses Bündel von Wellenlängenkanälen wird als *WDM-Signal* bezeichnet.

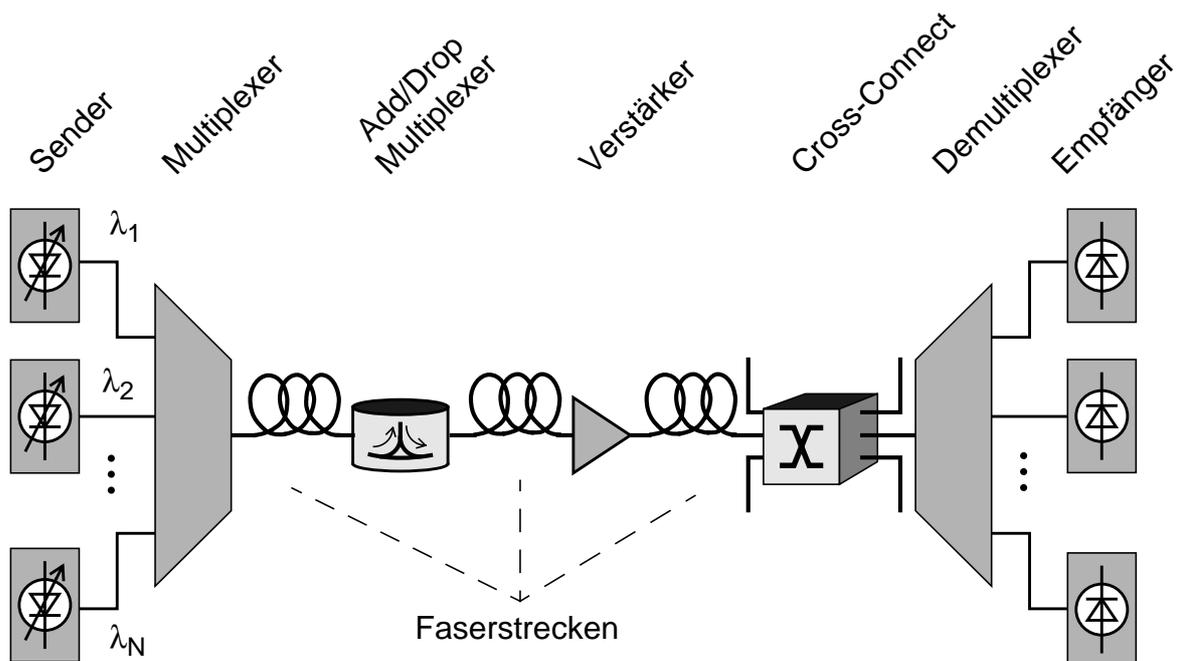
Zu den beschriebenen Multiplexverfahren gibt es jeweils ein entsprechendes Duplexverfahren zur Beschreibung der gleichzeitigen Übertragung in beide Richtungen über ein Medium sowie ein entsprechendes Vielfach-Zugriffsverfahren, beispielsweise WDMA (*wavelength division multiple access*) zu WDM. Die Zugriffsverfahren werden dann verwendet, wenn es um das Verfahren zur zeitlichen Zuteilung der entsprechenden Ressource (bei WDM der Wellenlänge) geht. In der Literatur wird der Begriff WDMA allerdings häufig auch zur Beschreibung des gemeinsamen Zugriffs mehrerer Stationen auf eine Faser verwendet, während WDM die gleichzeitige Verwendung mehrerer Wellenlängen durch eine Station kennzeichnet.



**Bild 2.3:** Multiplexhierarchie bei Verwendung von WDM

### 2.1.3 Komponenten optischer Netze

Die typischen Komponenten eines WDM-Systems zeigt Bild 2.4. Die Einzelkomponenten werden in den Abschnitten 2.1.3.1 bis 2.1.3.8 näher beschrieben, während Übertragungs- und Vermittlungssysteme in Abschnitt 2.1.4 vorgestellt werden. Detailliertere Betrachtungen sowie die Beschreibung weiterer zur Realisierung von WDM-Netzen erforderlicher Komponenten finden sich in der Literatur [47, 100, 121, 184, 199].



**Bild 2.4:** Grundelemente eines WDM-Systems

#### 2.1.3.1 Faserstrecken

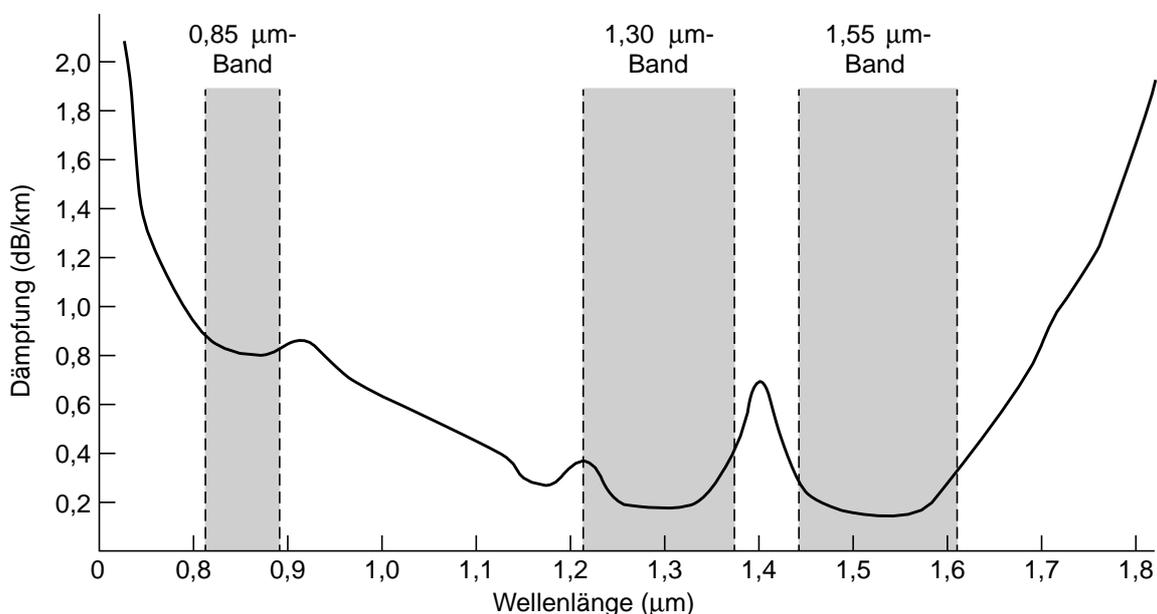
Zur Übertragung optischer Signale über größere Entfernungen kommt für terrestrische Anwendungen eine freie Übertragung (analog zum Richtfunk) wegen der unvermeidlichen Strahlaufweitung sowie der relativ starken und wetterabhängigen Signaldämpfung in Luft nicht in Frage. Daher werden Wellenleiter benötigt, für die sich dielektrische Lichtleiter als geeignet erwiesen haben. Hierbei wird die Lichtwelle entlang eines Mediums (dem sogenannten Kern) geführt, dessen Brechzahl größer als die der Umgebung (des sogenannten Mantels) ist.

Glasfasern sind ein Beispiel für einen solchen optischen Wellenleiter mit einem kreisförmigen Querschnitt. Je nach Brechzahlverlauf vom Kern zum Mantel spricht man von ein- oder mehrstufigen Stufenwellenleitern (*step-index fibre*) oder von Gradientenfasern (*graded-index fibre*). Ist der Kerndurchmesser im Vergleich zur Betriebswellenlänge relativ groß, können sich mehrere Moden, d. h. Wellen mit unterschiedlichen Feldverteilungen ausbreiten. Solche Fasern

werden als Mehrmodenfasern (*multimode fibre*) bezeichnet. Bei sehr kleinem Kerndurchmesser kann sich nur eine Mode ausbreiten<sup>2</sup>, wobei der hierfür maximal mögliche Durchmesser von der Lichtwellenlänge und den Brechzahlen von Kern und Mantel abhängt [121]. Die entsprechenden Fasern werden als Einmodenfasern (*single-mode fibre*) bezeichnet und haben meist einen Kerndurchmesser kleiner als 10  $\mu\text{m}$  [224].

Im praktischen Einsatz dominieren Einmodenfasern mit Stufenprofil, da bei Mehrmodenfasern die Modendispersion, d. h. die Pulsverbreiterung durch Laufzeitunterschiede der einzelnen Moden, zu einer starken Beschränkung der erzielbaren Übertragungsraten führt. Dagegen haben heutige Einmodenfasern sehr gute Übertragungseigenschaften und erlauben hohe Übertragungsraten bis in den Tbit/s-Bereich über große Entfernungen (siehe Abschnitt 2.1.4.1).

Allerdings gibt es eine Reihe von Effekten, welche die erzielbare Bandbreite begrenzen und entsprechende Komponenten für Gegenmaßnahmen erforderlich machen. So wird der Signalpegel in einer Faser abhängig von der Wellenlänge gedämpft. Bild 2.5 zeigt den Dämpfungsverlauf für die heute im Einsatz dominierenden Standard-Einmodenfasern sowie die drei am häufigsten für optische Übertragung genutzten Wellenlängenbereiche (sogenannte „Bänder oder Fenster für die optische Übertragung“). Inzwischen wurden andere Fasertypen entwickelt, deren Dämpfungsverhalten weiter verbessert wurde. So können beispielsweise durch die Reduktion der Dämpfungsspitze bei 1400 nm oder durch einen flacheren Verlauf bei 1600 nm zwei weitere Übertragungsbänder genutzt werden [224].



**Bild 2.5:** Dämpfungsverlauf einer Glasfaser mit „Sendefenstern“ (nach [264])

2. Diese einzelne Mode kann in zwei Polarisierungen auftreten, so dass der Begriff „Einmodenfaser“ streng genommen falsch ist [121]. Da er sich aber in der Literatur eingebürgert hat, wird er auch in dieser Arbeit verwendet.

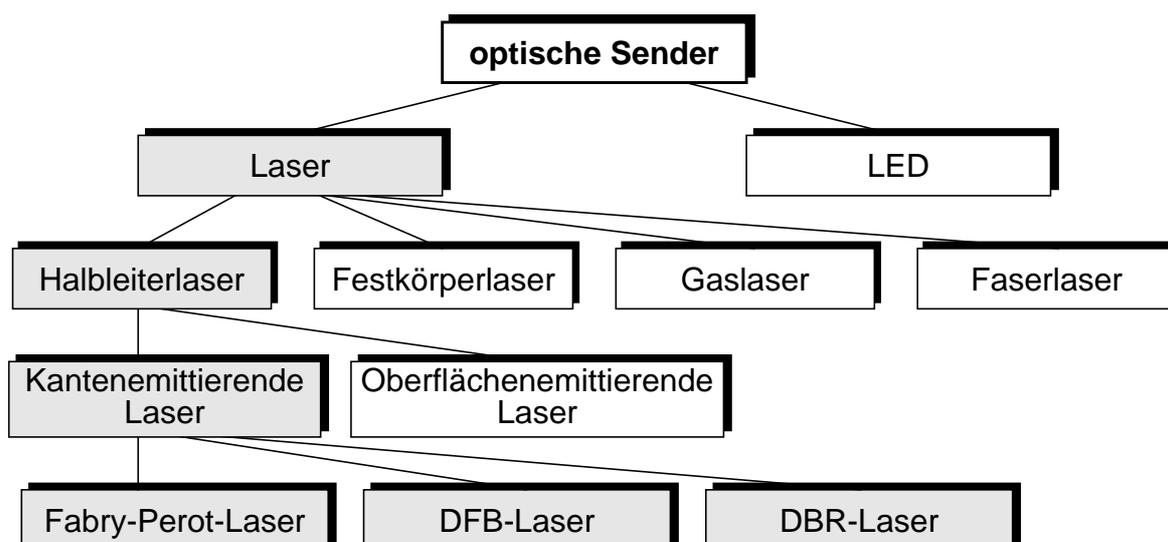
Die Summe aus leitungslängenabhängiger Dämpfung der Faser selbst sowie der unvermeidlichen Dämpfung an Faserspleißen beim Verketteten von Einzelfasern zu sehr langen Faserstrecken macht bei längeren Strecken Verstärker erforderlich. Da für das 1,55  $\mu\text{m}$ -Band Verstärker mit sehr guten Eigenschaften vorhanden sind (siehe Abschnitt 2.1.3.4), ist dieses Band mit einer Dämpfung in der Größenordnung von 0,2 dB/km zur Zeit für WDM-Systeme am besten geeignet.

Außerdem treten weitere Dispersionsarten (z. B. Materialdispersion) und zahlreiche nichtlineare Effekte (z. B. stimulierte Brillouin- und Ramanstreuung, Vierwellenmischung) auf, die bei hohen Bitraten über größere Entfernungen eine Signalregeneration erforderlich machen [47, 116, 252]. Dabei kann diese Regeneration teilweise auch durch Einfügen entsprechender Fasertypen erzielt werden (siehe Abschnitt 2.1.3.7).

In der Praxis werden im Allgemeinen mehrere Fasern in einem Kabel zusammengefasst und gemeinsam verlegt. Dadurch kann nicht nur die Übertragungskapazität einer Strecke stark gesteigert werden, sondern es steigen auch die Anforderungen an entsprechende Schutzmaßnahmen gegen einen Kabelbruch (siehe Abschnitt 2.3).

### 2.1.3.2 Optische Sender

Bild 2.6 zeigt eine beispielhafte Klassifizierung ausgewählter Sende-Elemente für optische Übertragungssysteme. Für die Überbrückung größerer Entfernungen dominieren Laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*), während Lumineszenzdiode (*light emitting diode*, LED) nur bei sehr kurzen Entfernungen wie z. B. in Fahrzeugkommunikationssystemen [150, 206] oder bei drahtlosen optischen Freiraumsystemen [114] eine gewisse Bedeutung erlangt haben. Die Hauptvorteile von Lasern sind die starke Strahlbündelung, die große



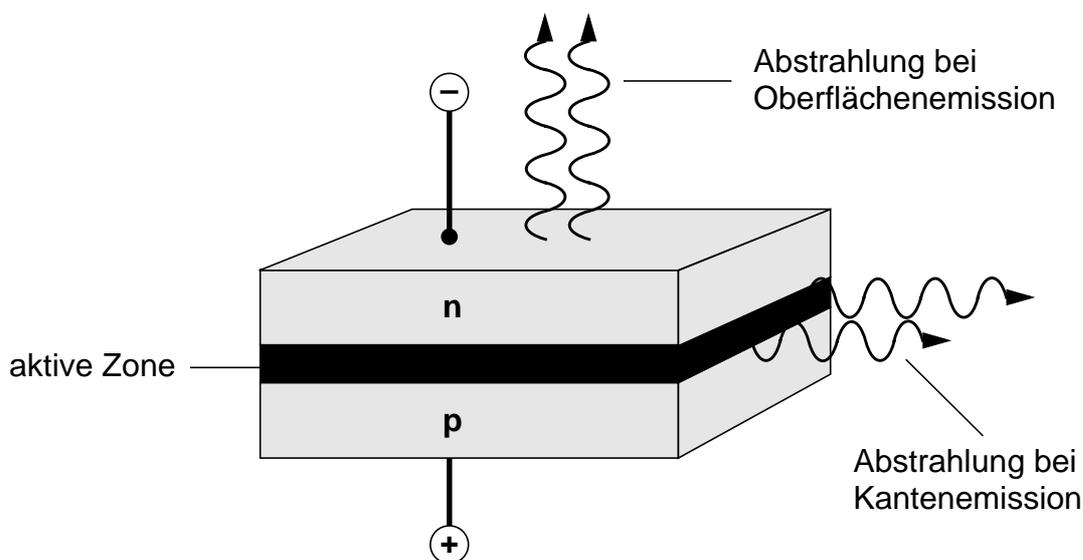
**Bild 2.6:** Klassifizierung optischer Sender (Auswahl)

Ausgangsleistung und die Möglichkeit eines schmalen Frequenzspektrums des abgegebenen Signals. Von den zahlreichen existierenden Lasertypen werden in heutigen Systemen hauptsächlich Halbleiterlaser verwendet, welche nachfolgend etwas genauer beschrieben werden. Andere Arten wie Festkörper-, Faser- oder Gaslaser kommen meist nur für spezielle Anwendungen zum Einsatz.

Die prinzipielle Funktionsweise eines Halbleiterlasers beruht auf stimulierter Emission in einer aktiven Zone eines elektrisch angeregten Halbleiters (siehe schematische Darstellung in Bild 2.7). Zusätzlich ist ein als Resonator ausgebildeter Wellenleiter erforderlich, da erst diese Rückkopplung eine stimulierte Emission und damit die Abstrahlung kohärenter Lichtwellen in einem schmalen Frequenzbereich erlaubt. Bei einem Halbleiterlaser kann der Resonator durch die Grenzflächen des Halbleiterkristalls gebildet werden.

In vielen Lasern werden zusätzlich in der zwischen einem n- und einem p-Halbleiter liegenden sehr dünnen aktiven Zone verschiedene Quanteneffekte ausgenutzt, welche beispielsweise eine Verbesserung der Temperaturstabilität, eine geringere spektrale Breite des abgegebenen Signals oder ein besseres Verstärkungsverhalten in Abhängigkeit von der Stromdichte erlauben [116]. Dies wird mit Schichten erreicht, die nur wenige Atomlagen dick sind und als „Quantenfilme“ oder „Quantentöpfe“ bezeichnet werden. Dieses Prinzip kann bei allen nachfolgend beschriebenen Lasern angewendet werden, man spricht dann von *Quantum Well*-Lasern.

Wie in Bild 2.7 gezeigt, kann die Abstrahlung bei einem Halbleiterlaser sowohl an der Oberfläche als auch an der Kante des Kristalls erfolgen. Zwar erlauben oberflächenemittierende Laser eine gute Einkopplung in die Glasfaser, allerdings sind mit dem heutigen Stand der Technik noch keine befriedigenden Sendeleistungen im interessierenden Frequenzbereich möglich, so dass vor allem kantenemittierende Laser zum Einsatz kommen.



**Bild 2.7:** Schematische Darstellung eines Halbleiterlasers

Für diese gibt es zahlreiche alternative Strukturen. Die drei wichtigsten sind Fabry-Perot-Laser, Distributed Feedback Laser (DFB-Laser) und Distributed Bragg Reflector Laser (DBR-Laser). Die Selektion der dominierenden Resonanzwellenlänge erfolgt dabei auf unterschiedliche Weise. Während bei Fabry-Perot-Lasern die Grenzflächen des Halbleiterkristalls als optische Spiegel zur Rückkopplung verwendet werden, werden bei DFB- und DBR-Lasern Beugungsgitter zur Selektion der gewünschten Wellenlänge in den Resonatorwellenleiter eingebracht. Alle drei Arten können in WDM-Systemen eingesetzt werden, wobei häufig zusätzliche Elemente wie externe Resonatoren benötigt werden, um das Sendespektrum den hohen Anforderungen bei kleinen Kanalabständen anzupassen.

Für viele WDM-Netzarchitekturen sind Sender mit verstellbarer Sendewellenlänge erforderlich, wobei je nach Anwendungsszenario eine unterschiedlich schnelle Verstellbarkeit gefordert wird. Die erforderliche Flexibilität kann dabei auf zwei grundsätzliche Arten erreicht werden. Einerseits können direkt verstellbare Laser realisiert werden, wobei die Steuerung beispielsweise über die Temperatur oder über den Injektionsstrom erfolgen kann [76]. Andererseits kann auch ein Laser-Array bestehend aus einer Gruppe nicht verstellbarer Laser zum Einsatz kommen. Mit optisch integrierten Laser-Arrays können dabei mehrere Dutzend Laser auf einer Fläche von wenigen Quadratmillimetern untergebracht werden [252].

Sowohl für feste als auch für verstellbare Laser existieren zahlreiche Untervarianten. Dazu kommen zahlreiche Möglichkeiten für die Modulation der Laser, wobei nach heutigem Kenntnisstand eine externe Modulation in einem dem Laser nachgeschalteten Element die besten Sendereigenschaften erlaubt. Für eine genaue Diskussion der jeweiligen Vor- und Nachteile wird auf weiterführende Literatur verwiesen [121, 184, 200].

### 2.1.3.3 Optische Empfänger

Zur Umwandlung der optischen Signale in elektrische Signale werden Photodetektoren benötigt. Für optische Übertragungssysteme kommen praktisch ausschließlich Halbleiter-Sperrschichtdioden zum Einsatz, deren prinzipielle Aufgabe darin besteht, aus Lichtquanten Elektron-Loch-Paare zu erzeugen. Zwei unterschiedliche Ansätze sind möglich:

- PIN-Diode: Der Name leitet sich von der verwendeten Halbleiterstruktur ab, da zwischen einer p-leitenden und einer n-leitenden Zone eine eigenleitende (intrinsische) Schicht eingefügt wird (*p-doped, intrinsic, n-doped*). Die Diode wird mit einer Sperrspannung betrieben, so dass die bei der Absorption eines Lichtquants entstehenden Elektron-Loch-Paare rasch getrennt und zu den Anschlüssen hin „abgesaugt“ werden. Der dadurch entstehende Strom ist im Arbeitsbereich der Photodiode annähernd proportional zur eingestrahlten Lichtintensität.
- Lawinenphotodiode (*avalanche photodiode, APD*): Diese Dioden enthalten im Vergleich zu PIN-Dioden eine zusätzliche Zone, die mit einer hohen Sperrspannung betrieben

wird. Dadurch können von einem Lichtquant erzeugte Ladungsträger durch Stoßionisation weitere Ladungsträger erzeugen, was bei geeignet gewählten Parametern zu einer lawinenartigen Verstärkung des Photostroms führen kann. Verglichen mit PIN-Dioden kann dadurch zwar eine deutlich größere Verstärkung erreicht werden, allerdings ist das Verstärkungsverhalten nichtlinear, die erforderliche Betriebsspannung ist wesentlich größer, und es tritt ein höheres Rauschen auf.

Beide Diodenarten können mit verschiedenen Materialien realisiert werden. Silizium eignet sich für das sogenannte erste Fenster (ca.  $0,8\ \mu\text{m}$  –  $0,9\ \mu\text{m}$ ), während für alle größeren, d. h. auch für die im zweiten und dritten Fenster liegenden Wellenlängen, hauptsächlich Germanium oder Indium-Gallium-Arsenid (InGaAs) Verwendung finden.

#### **2.1.3.4 Verstärker**

Erst die Verfügbarkeit von geeigneten signaltransparenten Verstärkern ermöglichte den Erfolg optischer Übertragungssysteme über größere Entfernungen. Als Verstärkerelemente kommen sowohl Faserverstärker als auch Halbleiterverstärker zum Einsatz. Beide Verstärkerarten werden nachfolgend kurz vorgestellt, für eine detaillierte Diskussion wird auf weitere Literatur verwiesen [121, 184, 262].

#### **Faserverstärker**

Zum Ausgleich der Faserdämpfung bei längeren Übertragungsstrecken werden heute praktisch ausschließlich Faserverstärker eingesetzt. Diese basieren auf einer meist mehrere Dutzend Meter langen dotierten Glasfaser. Diese wird mit optischer Pumpenergie versorgt, so dass Elektronen in höhere Energieniveaus angehoben werden. Dadurch können einfallende Lichtsignale mittels stimulierter Emission verstärkt werden.

Eine zentrale Rolle spielen Erbiumfaser-Verstärker (*erbium doped fibre amplifier*, EDFA), bei denen die Glasfaser mit Erbium-Atomen dotiert wird. EDFAs weisen einige Vorteile auf, die eine wesentliche Grundlage für den Erfolg von WDM-Systemen darstellen. Herausragend ist dabei die Eigenschaft, dass nicht nur eine einzelne Wellenlänge, sondern ein ganzer Bereich verstärkt wird. Dieser umfasst bei heutigen EDFAs etwa 30 nm im Bereich von 1530 nm – 1560 nm. Weitere Vorteile sind geringe Koppelverluste zwischen Verstärker und Faser auf der Übertragungsstrecke sowie geringes Übersprechen zwischen den einzelnen Kanälen eines WDM-Systems.

Neben diesen Vorteilen gibt es auch eine Reihe von Nachteilen und Problemen von Faserverstärkern. So besitzen Faserverstärker eine geringe Integrierbarkeit. Außerdem werden für heutige WDM-Systeme vermehrt Wellenlängenbereiche außerhalb des Bereichs um 1550 nm genutzt. Für Verstärker in einigen dieser Bereiche gibt es zwar bereits Ansätze (z. B. durch Dotierung mit Praseodym, Neodym oder Ytterbium), allerdings sind die erreichten Verstärker-

eigenschaften noch nicht mit EDFA-Eigenschaften vergleichbar. Ein weiteres Problem stellt das unvermeidliche Verstärkerrauschen durch spontane Emission dar. Durch eine Kaskadierung von Verstärkern, wie sie bei längeren Übertragungsstrecken erforderlich ist, wird dieses Eigenrauschen in jedem Faserverstärker weiter verstärkt (*amplified spontaneous emission*, ASE). Zusätzlich ist bei EDFAs das Verstärkungsverhalten abhängig von der Wellenlänge: Im genutzten Verstärkungsbereich werden die Kanäle unterschiedlich stark verstärkt. Schließlich ist das Verstärkerverhalten von der Gesamtleistung aller Kanäle abhängig, so dass sich in dynamischen WDM-Systemen mit zeitlich variierender Anzahl aktiver Kanäle zusätzlich die Aufgabe einer Leistungsregelung ergibt.

Gegen diese die erzielbare Übertragungsleistung begrenzenden Faktoren wurden eine Reihe von Gegenmaßnahmen wie beispielsweise aufwändige Regelungsmechanismen oder spezielle Dotierungen entwickelt. Durch die hiermit erzielten Verbesserungen können Faserverstärker – neben den Glasfasern – als das zentrale Element für optische Übertragungssysteme gelten.

### **Halbleiterverstärker**

Halbleiterverstärker (*semiconductor optical amplifier*, SOA) sind den in Abschnitt 2.1.3.2 beschriebenen Halbleiterlasern bezüglich Struktur und Funktionsweise sehr ähnlich. Hauptunterschied ist der nicht vorhandene Resonator, so dass eintreffendes Licht den Halbleiterbaustein nur einmal durchläuft und dabei durch stimulierte Emission verstärkt wird. Die erforderliche Pumpenergie wird im Unterschied zu Faserverstärkern elektrisch zugeführt.

Halbleiterlaser sind für die Wellenlängenbereiche sowohl bei 1,3  $\mu\text{m}$  als auch bei 1,5  $\mu\text{m}$  verfügbar. Da sie leicht in opto-elektronische Schaltungen integrierbar sind, können sie damit vorteilhaft in optischen Vermittlungsknoten eingesetzt werden. Für den Einsatz bei Mehrkanal-Übertragungssystemen ist ihre Bedeutung im Vergleich zu Faserverstärkern gering. Der Grund liegt in einigen bei Faserverstärkern nicht vorhandenen negativen Eigenschaften wie beispielsweise dem starken Übersprechen zwischen verschiedenen Frequenzen oder der polarisationsabhängigen Verstärkung.

#### **2.1.3.5 Schaltelemente**

In diesem Abschnitt werden nur aktive, d. h. dynamisch schaltbare Elemente betrachtet. Daneben existieren zahlreiche passive Komponenten für den Einsatz in speziellen Netzarchitekturen. Teilweise werden diese in Abschnitt 2.1.3.8 kurz vorgestellt, teilweise handelt es sich auch um statische Varianten der hier beschriebenen Elemente. Es werden nur *relationale* Bauelemente betrachtet. Diese besitzen – im Unterschied zu logischen Elementen – eine reine Vermittlungsfunktionalität, die nur von Steuersignalen, nicht aber vom Nutzsignal abhängig ist.

Für den Einsatz in WDM-Netzen existieren Schaltelemente für drei verschiedene Anwendungsebenen bzw. Granularitätsstufen:

- Schalten einzelner Wellenlängenkanäle: Die einzelnen Kanäle eines WDM-Systems werden zuerst separiert und dann einzeln geschaltet (*wavelength channel switching*).
- Schalten von Wellenlängen-Bändern: Es findet ein Schalten für Frequenzbereiche statt, die mehrere Kanäle umfassen (*waveband switching*).
- Schalten auf Faserebene: Hier wird das auf einer Eingangsfaser transportierte Signal vollständig auf eine Ausgangsfaser geschaltet (*fibreswitching*).

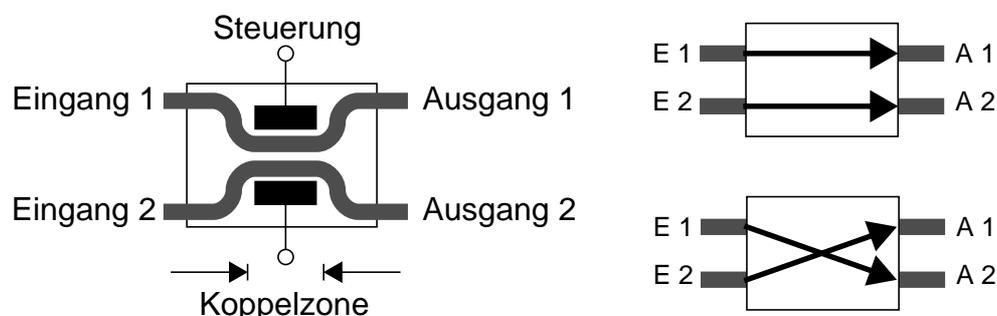
Das Schalten von Frequenzbereichen stellt den allgemeinen Fall dar. Die beiden anderen Granularitätsebenen ergeben sich, falls der Frequenzbereich nur einen Kanal umfasst (Wellenlängenkanalebene) oder falls der Frequenzbereich alle auf der Faser transportierten Kanäle umfasst (Faserebene).

Nachfolgend werden wichtige Grundtypen für Schaltelemente kurz vorgestellt. Basierend auf diesen Elementen können durch entsprechende Strukturen dann größere Koppelanordnungen realisiert werden (siehe [118] und Abschnitt 2.1.4.2).

### Richtkoppler oder 2x2-Schalter

Dieses Element stellt den Grundbaustein für zahlreiche Koppelanordnungen dar. Die Funktionsweise beruht auf der Übertragung optischer Leistung zwischen zwei sehr eng benachbarten Wellenleitern (siehe Bild 2.8). Die Koppelzone ist mit einer elektrischen Steuerung versehen. Mit deren Hilfe können unterschiedliche Effekte (Temperaturänderung, Längenänderung, Brechzahländerung) zur Beeinflussung des Koppelverhaltens ausgenutzt werden. Dadurch können nahezu beliebige Koppelverhältnisse zwischen den ebenfalls in Bild 2.8 gezeigten Grenzzuständen erzielt werden.

Zur Realisierung können entweder integrierte Wellenleiter in Halbleiterbausteinen oder entsprechend eng zusammengeführte Faserkerne (z. B. durch Verdrillen und Verschmelzen) verwendet werden [121]. Die Schalter unterscheiden sich je nach Realisierungsart und genutztem Effekt stark in den wichtigen Parametern Schaltzeit, Einfügedämpfung, Herstellungsaufwand



**Bild 2.8:** Schematische Darstellung eines Richtkopplers (2x2-Schalter) und seiner beiden Grenzzustände

und Integrierbarkeit. Keine Variante erreicht dabei hinsichtlich aller Parameter optimale Eigenschaften. Ist eine geringe Einfügedämpfung erforderlich, sind Faserschalter vorteilhaft. Optoelektronische Schalter auf Wellenleiterbasis haben zwar eine größere Einfügedämpfung, dafür können aber geringe Schaltzeiten unterhalb 1 ns und eine kompakte monolithische Integration erreicht werden [223, 252].

### **Schalter für Freiraum-Vermittlung**

Bei Freiraum-Vermittlung wird der Verlauf von Lichtstrahlen in Luft bzw. im Vakuum gesteuert. Gute Ergebnisse konnten mit Konzepten erreicht werden, die auf einer Strahlablenkung durch mechanisch bewegliche Spiegel basieren. Spiegelbasierte Schalter haben hervorragende optische Eigenschaften: Die Einfügedämpfung ist gering, es gibt praktisch kein Übersprechen zwischen benachbarten Kanälen, der Schaltvorgang kann entweder auf Faser- oder auf Einzelkanalebene durchgeführt werden, und es gibt praktisch keine Einschränkungen bezüglich der Transparenz. Problematisch ist allerdings die Sicherstellung der mechanischen Stabilität.

Neben spiegelbasierten Konzepten gibt es eine ganze Reihe weiterer, beispielsweise auf Linsensystemen, Beugungsgittern oder holografischen Strukturen beruhende Ansätze für Freiraum-Vermittlung [118]. Diese erreichen aber entweder nicht die erwähnten Eigenschaften spiegelbasierter Schalter oder sind nur sehr aufwändig herzustellen. Mit Spiegel-Schaltern wurden dagegen inzwischen auch äußerst kompakte und zuverlässige Realisierungen erreicht. So wird in [171] ein auf einem Halbleiterbaustein integriertes 4x4-Schaltelement mit Schaltzeiten unterhalb einer Millisekunde vorgestellt und [43] enthält die Beschreibung eines 256x256-Elementes mit 256 Spiegeln, die jeweils 0,5 mm Durchmesser haben und auf wenigen Quadratzentimetern untergebracht sind. Auf Grund der verwendeten kleinen Strukturen wird häufig von mikro-elektro-mechanischen Systemen (MEMS, *micro electro mechanical system*) gesprochen. Aufgrund all der genannten Vorteile sind solche Schalter zur Zeit die aussichtsreichsten Schaltelemente für künftige optische Netze.

### **Weitere Schaltelemente**

Eine verallgemeinerte Form der oben beschriebenen 2x2-Koppler stellen  $N \times M$ -Koppler dar. Gebräuchliche Sonderformen sind Koppellemente, bei denen die Signale aller Eingänge jeweils auf alle Ausgänge gleichmäßig aufgeteilt werden, Koppler mit nur einem Ausgang (*combiner*) sowie Koppler mit nur einem Eingang (*splitter*).

Neben Richtkopplern und spiegelbasierten Schaltern existieren eine Reihe weiterer Konzepte. Dazu zählen Schalter, die aus einer Kombination von Teilern (*splitter*) und Filtern bestehen. Das Grundprinzip besteht darin, das Eingangssignal auf alle möglichen Ausgänge gleichmäßig aufzuteilen und am gewünschten Ausgang das Signal passieren zu lassen, während bei allen anderen Ausgängen das Signal ausgefiltert, d. h. blockiert wird (sogenanntes „Broadcast &

Select“-Prinzip). Beispiele sind passive Sternkoppler mit nachgeschalteten Filtern oder Kreuzschalter basierend auf räumlichen Lichtmodulatoren (*spatial light modulator*, SLM). Bei einem solchen Kreuzschalter wird das Signal räumlich aufgeweitet (beispielsweise durch einen Faser-Teiler) und auf die Elemente einer optischen Matrix gegeben. Diese Elemente (z. B. Flüssigkristalle oder SOAs) können nun so angesteuert werden, dass sie entweder transparent oder undurchlässig sind. Dadurch können gezielt einzelne Ausgänge angewählt werden [118].

Schalter, die mehrere Wellenlängen gleichzeitig und unabhängig schalten können, besitzen ebenfalls ein großes künftiges Anwendungspotenzial. Eine Realisierungsmöglichkeit besteht in der Verwendung eines verstellbaren akusto-optischen Filters (*acousto-optic tunable filter*, AOTF). Bei einem AOTF kann durch akustische Anregung eines Halbleiterelements der Ausgang für ein Signal ausgewählt werden, wenn Anregungsfrequenz und Signalfrequenz aufeinander abgestimmt werden. Da mehrere Anregungsfrequenzen überlagert werden können, lassen sich mehrere Wellenlängen unabhängig steuern. Eine ähnliche Funktionalität kann mit Flüssigkristall-Schaltern erreicht werden, bei denen der Schaltvorgang durch eine Polarisationsänderung in einem Flüssigkristall gesteuert wird [252].

Ein weiterer innovativer Ansatz für die Realisierung von integrierten Schaltern basiert auf einer ursprünglich für Tintenstrahldrucker entwickelten Technologie. Für die Ablenkung der Lichtsignale in den Kreuzungspunkten wird eine monolithisch integrierte Schaltmatrix verwendet, in deren Kreuzungspunkten Flüssigkeit in den Wellenleiter eingebracht ist. Wird die Flüssigkeit durch eine Luftblase verdrängt, so wird das Signal durch die nun geänderten optischen Eigenschaften auf einen anderen Ausgang umgeleitet. Die erzielbaren Schaltzeiten liegen im Bereich einiger Millisekunden [9].

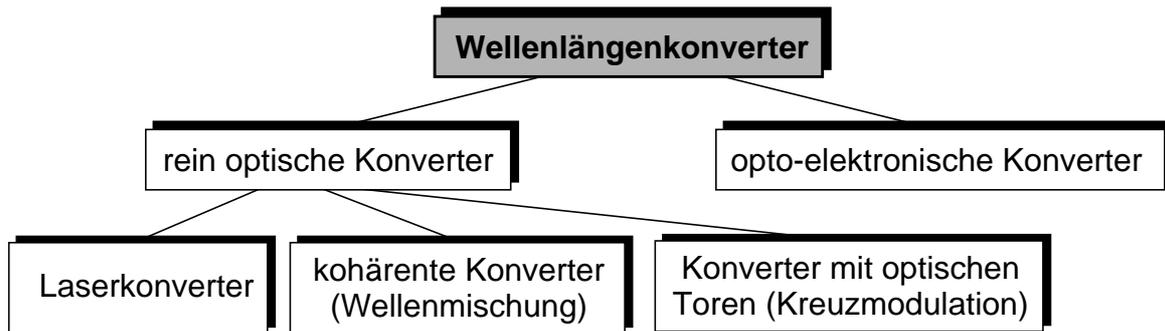
Trotz der Vielzahl der hier vorgestellten Konzepte besteht noch großer Bedarf an sehr schnellen, im Mikro- oder Nanosekunden-Bereich arbeitenden Schaltern mit guten optischen Eigenschaften und damit großer Kaskadierbarkeit, ehe sich die rein optische Vermittlungstechnik für hochdynamische Systeme in großem Umfang durchsetzen kann.

### **2.1.3.6 Wellenlängenkonverter**

Die Grundaufgabe eines Wellenlängenkonverters<sup>3</sup> ist die Umsetzung eines auf einer bestimmten Wellenlänge ankommenden Signals auf eine andere Wellenlänge. Damit kommt der Konversion in einem WDM-basierten Netz aus funktionaler Sicht eine dem Zeitlagenumstieg in einem TDM-Netz entsprechende Rolle zu. In späteren Abschnitten dieser Arbeit werden System- und Netzaspekte der Wellenlängenkonversion näher betrachtet. Nachfolgend werden die wichtigsten Arten von Konvertern jeweils kurz bezüglich der Funktionsweise, der Transparenz und des möglichen Konversionsbereiches vorgestellt. Die vielen Realisierungsmöglich-

---

3. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff *Konverter* synonym zum Begriff *Wellenlängenkonverter* verwendet.



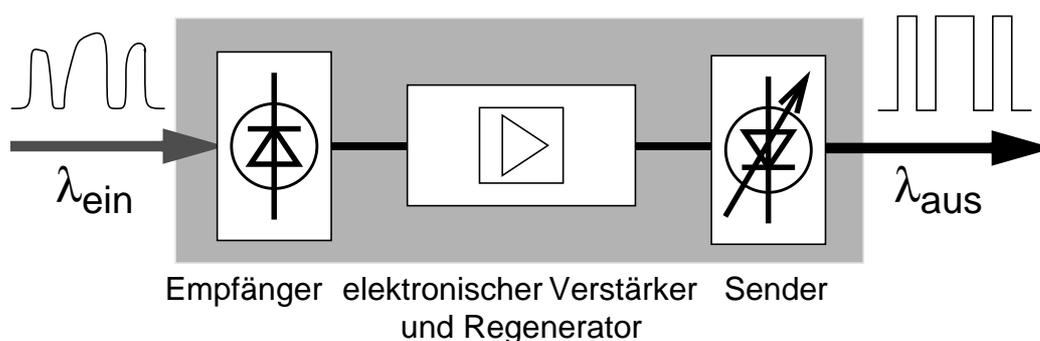
**Bild 2.9:** Realisierungsmöglichkeiten für Wellenlängenkonverter

keiten werden gemäß Bild 2.9 in die beiden Hauptgruppen „opto-elektronische“ und „rein optische Konverter“ mit den Untergruppen „Laserkonverter“, „kohärente Konverter“ und „Konverter mit optischen Toren“ in Anlehnung an [48, 216, 252, 255] klassifiziert. In diesem Zusammenhang bedeutet rein optisch, dass das Datensignal nicht in ein elektronisches Signal gewandelt wird.

### Opto-elektronische Konverter

Bei diesem Konversionsprinzip wird das Eingangssignal in ein elektronisches Signal gewandelt, gegebenenfalls verstärkt und regeneriert, und dann zur Modulation eines – möglicherweise verstellbaren - Lasers mit der gewünschten Ausgangswellenlänge verwendet (Bild 2.10). Dieses Prinzip hat den großen Vorteil, dass ausgereifte Standardkomponenten für eine einfache und kompakte Realisierung verwendet werden können [255]. Außerdem kann eine Signalregeneration einfach integriert werden (siehe auch Abschnitt 2.1.3.7). Nachteile sind die eingeschränkte Transparenz (meist können nur digitale Signale einer bestimmten Bitrate verarbeitet werden), die schlechte Integrierbarkeit, die Beschränkung auf nur eine gleichzeitig konvertierbare Wellenlänge, sowie die Schwierigkeit, geeignete elektronische Komponenten für Bitraten oberhalb von 10 Gbit/s zu realisieren.

Aus diesen Gründen gibt es zahlreiche Forschungsaktivitäten zur Entwicklung rein optischer Konverter. Nachfolgend werden die wichtigsten Ansätze kurz skizziert.



**Bild 2.10:** Schematische Darstellung eines opto-elektronischen Konverters

## **Laserkonverter**

Bei Laserkonvertern wird ein verstellbarer oder fester Laser direkt durch ein optisches Eingangssignal moduliert, indem das Sättigungsverhalten des Lasers durch dieses Signal gesteuert wird. Hierzu muss das Eingangssignal nicht in den elektronischen Bereich gewandelt werden. Hauptvorteil dieses Verfahrens ist der einfache Aufbau bestehend aus nur einem Element. Bisher treten vor allem für Bitraten oberhalb von 10 Gbit/s noch große Realisierungsprobleme auf. Außerdem ist die Kaskadierung solcher Elemente auf Grund der starken Signalbeeinflussungen nur begrenzt möglich: Einzig bei Intensitätsmodulation konnte bisher die Kaskadierung einiger weniger Elemente erfolgreich gezeigt werden [255].

## **Kohärente Konverter**

Das Grundprinzip dieser Konverter, die auch als *Wave-Mixing*-Konverter (Wellenmischung) bezeichnet werden, besteht in einer Überlagerung mehrerer Frequenzen (meist der Signalfrequenz und einer Pumpfrequenz) an einem nichtlinearen Element. Dadurch wird die gewünschte Mischfrequenz für das Ausgangssignal erzeugt. Gebräuchliche Varianten sind die Vierwellen-Mischung (*four wave mixing*, FWM) und die Differenzfrequenz-Bildung (*difference frequency generation*, DFG). Als nichtlineares Element kann sowohl eine Glasfaser als auch ein Halbleiterverstärker verwendet werden.

Dieses Verfahren bietet größtmögliche Transparenz der Konverter, da die Konversion völlig unabhängig von der Signalmodulation ist. Es können außerdem mehrere Wellenlängen gleichzeitig konvertiert werden, und es gibt praktisch keine Beschränkung für die Bitrate der konvertierten Kanäle. Diesen Vorteilen steht als Nachteil insbesondere die geringe Konversionseffizienz und die dadurch bedingte geringe Kaskadierbarkeit solcher Elemente gegenüber. Weiter ist die Ausgangswellenlänge sowohl von der Pump- als auch der Eingangswellenlänge abhängig, wodurch eine variable Pumpquelle selbst bei fixer Ausgangswellenlänge erforderlich wird. Trotz dieser und weiterer Nachteile versprechen insbesondere die guten Transparenzeigenschaften Vorteile für einige Einsatzgebiete [216, 255].

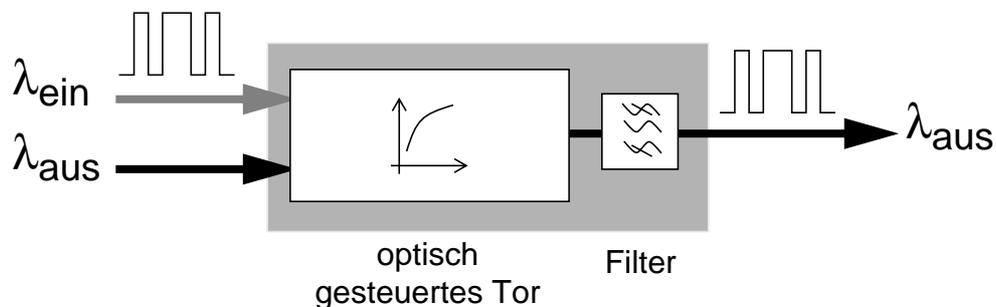
## **Konverter basierend auf optisch gesteuerten Toren**

Dieses Prinzip bietet nach momentanem Kenntnisstand die vielversprechendsten Möglichkeiten zur rein optischen Realisierung von Wellenlängenkonvertern. Wie in Bild 2.11 gezeigt, wird ein kontinuierliches Signal mit der gewünschten Ausgangsfrequenz gemeinsam mit dem Eingangssignal an den Eingängen des optisch gesteuerten Tores angelegt. Das Eingangssignal dient nun als Schalter für das Tor und lässt die Ausgangswellenlänge damit im „gewünschten Takt“ passieren. Als Tor dient ein nichtlineares Element, meist ein Halbleiterverstärker.

Zur Konversion können verschiedene nichtlineare Effekte ausgenutzt werden. Überwiegend werden entweder Nichtlinearitäten durch Sättigung bei der Kreuzamplitudenmodulation (*cross*

*gain modulation*, XGM) oder Phasenunterschiede durch leistungsabhängige Brechzahländerungen bei Kreuzphasenmodulation (*cross phase modulation*, XPM) genutzt. Nach heutigem Kenntnisstand lassen sich dabei mit XPM-Konvertern oder mit einer Kombination aus XGM- und XPM-Konvertern die besten Ergebnisse erzielen [123, 147, 255].

Die wesentlichen Vorteile liegen in der effizienten und polarisationsunabhängigen Konversion, dem einfachen, teilweise monolithisch integrierbaren Aufbau und der Eignung für die Konversion hochbitratiger Signale bis über 100 Gbit/s. Nachteilig ist die Beschränkung auf die Konversion einer einzelnen Wellenlänge und auf die Verwendung intensitätsmodulierter Signale. Aktuelle Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf Verbesserungen bei der Integration sowie die weitere Reduktion der Störeinflüsse auf das Datensignal, um eine bessere Kaskadierbarkeit zu erreichen. Weitere Details und Vergleiche der vielen Varianten für diese Konversionsart finden sich in der Literatur [48, 123, 147, 255].



**Bild 2.11:** Schematische Darstellung eines Konverters basierend auf einem optisch gesteuerten Tor

### 2.1.3.7 Regeneratoren

Bei heutigen optischen Übertragungssystemen können mit optischen Faserverstärkern Entfernungen bis zu einigen hundert Kilometern überbrückt werden [121]. Für längere Strecken muss zur Kompensation der auftretenden Störfaktoren eine Regeneration durchgeführt werden. Abhängig vom Umfang der Regeneration spricht man dabei vereinfachend von 1R-, 2R- oder 3R-Regeneration [131]:

- 1R: Es findet nur eine Verstärkung des Signals statt (*reamplification*). Zu dieser Klasse zählen die weiter oben beschriebenen optischen Verstärker. Nach [131] zählen hierzu auch Funktionen, die eine analoge Dispersionskompensation und damit eine eingeschränkte Pulsformung bieten.
- 2R: Zusätzlich zur 1R-Regeneration wird die Pulsform digitaler Signale wiederhergestellt (*reshaping*), was auch eine Unterdrückung vorhandener Rauschsignale beinhalten kann.

3R: Zusätzlich zur 2R-Regeneration wird die zeitliche Pulslage wiederhergestellt, beispielsweise durch Taktrückgewinnung und Entfernung von Jitter (*retiming*). 3R-Regeneration wird auch als vollständige Regeneration bezeichnet.

Ein gewisser Teil der bei optischer Übertragung auftretenden Störfaktoren kann durch 1R-Regeneratoren kompensiert werden. Ein Beispiel für solche Regeneratoren sind dispersionskompensierende Fasern (*dispersion compensating fibre*, DCF). Diese besitzen einen großen negativen Dispersionskoeffizienten für den interessierenden Wellenlängenbereich. Dadurch können kurze DCF-Strecken die Dispersion längerer Strecken mit Standardfasern kompensieren und so eine rein optische, passive Signalformung durchführen. Dieser Ansatz stellt nur eine von vielen Möglichkeiten aus dem großen Bereich des „Dispersionsmanagements“ dar [121].

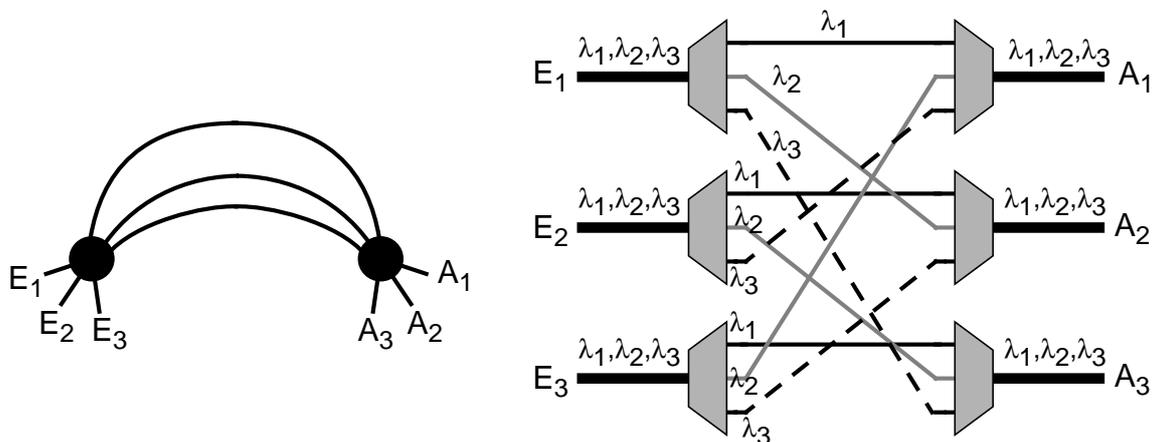
Mit Hilfe von 3R-Regeneratoren können für binäre Signale prinzipiell beliebige Entfernungen überbrückt werden. Bisher verfügbare 3R-Regeneratoren basieren praktisch ausschließlich auf opto-elektronischer Wandlung, während Ansätze für rein optische 3R-Regeneratoren Gegenstand der Forschung sind [65]. Bei opto-elektronischer Regeneration besteht kein grundlegender Unterschied zu opto-elektronischer Wellenlängenkonversion. Vielmehr können 3R-Regeneratoren die Konversion ohne Mehraufwand beinhalten bzw. entsprechende Konverter stellen zusätzlich eine Signalregeneration zur Verfügung. Daher werden in künftigen Netzen Konversions- und Regenerationsfunktionalität häufig in einer Komponente integriert sein. Diese Komponenten entsprechen auch den in der Literatur häufig erwähnten „Transpondern“, welche beispielsweise zur Anpassung der Wellenlängen zwischen WDM-Systemen verschiedener Hersteller oder zwischen „optischen Nicht-WDM-Systemen“ (z. B. heutigen Systemen der Synchronen Digitalen Hierarchie, SDH [129]) und WDM-Systemen verwendet werden [97].

### **2.1.3.8 Filter, Multiplexer und Demultiplexer**

Neben den in Abschnitt 2.1.3.5 beschriebenen, unabhängig von der Wellenlänge des Signals arbeitenden Kopplern kommt Filterelementen zur Auswahl eines Wellenlängenkanals oder eines Kanalbandes eine große Bedeutung zu. Grundsätzlich können für die Realisierung eines Filters verschiedene Kombinationen der Effekte Interferenz, Beugung, Reflexion oder Brechung ausgenutzt werden. Filter lassen sich sowohl mit Hilfe von Glasfasern als auch mit Hilfe von Halbleiter-Wellenleitern herstellen. Für dynamische Systeme sind insbesondere verstellbare Filter erforderlich, für deren Realisierung zahlreiche Möglichkeiten existieren, die Einstellzeiten bis in den Nanosekunden-Bereich erlauben [76].

Spezielle Koppel- bzw. Filterelemente mit großer Bedeutung in WDM-Systemen sind sogenannte Multiplexer bzw. Demultiplexer. Diese dienen dazu, mehrere getrennte Wellenlängenkanäle auf einer Faser zusammenzuführen bzw. das Kanalbündel einer Faser in Einzelkanäle aufzutrennen. Zur Realisierung solcher Elemente gibt es viele Möglichkeiten basierend auf den auch für Filter nutzbaren Effekten [121, 252]. Gute Eigenschaften wurden beispielsweise

mit einem integrierten Vielkanal-Wellenlängen-Multiplexer (*arrayed waveguide grating*, AWG) erzielt. Ein AWG leitet die Wellenlängen eines Eingangs abhängig von der jeweiligen Wellenlänge zu den Ausgängen. Dadurch lässt sich auf einfache Weise eine statische Führung der Wellenlängen gemäß dem Schema in Bild 2.12 erreichen.



**Bild 2.12:** Schematische Darstellung (links) und Funktionsprinzip (rechts) eines AWGs mit jeweils drei Ein- und Ausgängen sowie WDM-Signalen mit jeweils drei Wellenlängen

### 2.1.4 Systeme für WDM-Netze

In diesem Abschnitt werden WDM-Systeme beschrieben, die mit den im vorigen Abschnitt vorgestellten Komponenten realisiert werden können. Die Betrachtungen werden für Übertragungssysteme und für Vermittlungssysteme getrennt durchgeführt und beschränken sich auf digitale Systeme, da analoge optische Systeme nur für spezielle Anwendungsfälle wie beispielsweise optische TV-Verteilssysteme zum Einsatz kommen [121].

Ein in der Literatur häufig diskutierter Parameter ist die *Transparenz* eines optischen Systems. Mit Beginn der optischen Übertragungstechnik entstand das Ziel, möglichst vollständig transparente Systeme zu realisieren, die völlig unabhängig von den übertragenen Signalen sein sollten. Aufgrund der großen Schwierigkeiten bei der Realisierung zielen heutige Entwicklungen praktisch ausschließlich auf teilweise transparente Systeme. Dazu wurden mehrere Transparenzebenen definiert [42, 243]. Die wichtigsten Forderungen an heutige Systeme umfassen Protokoll-Transparenz und Bitraten-Transparenz (zumindest innerhalb bestimmter Bereiche). In diesem Sinn wird der Transparenzbegriff auch in dieser Arbeit verwendet. Weitergehende Transparenzforderungen führen zu deutlich höheren Systemanforderungen und werden deshalb nur bei konkretem Bedarf realisiert werden.

### 2.1.4.1 Übertragungssysteme

Die WDM-Technik bietet eine ganze Reihe von Vorteilen gegenüber einem Einkanal-System:

- Die Gesamt-Übertragungsrate pro Faser ergibt sich aus der Summe aller einzelnen Kanalraten. Damit lässt sich durch Verwendung mehrerer Kanäle eine große Gesamtrate bei kleiner Einzelrate erreichen. Durch die geringeren Einzelraten reduzieren sich übertragungstechnische Probleme, und es ergeben sich Kostenvorteile durch günstigere elektronische Komponenten.
- Die einzelnen Kanäle eines WDM-Systems sind – abgesehen von einigen übertragungstechnischen Effekten – weitgehend unabhängig voneinander. Damit kann beispielsweise die Übertragungsrate und das Übertragungsformat für jeden Kanal separat gewählt werden. Dies erlaubt die Errichtung mehrerer virtueller, physikalisch getrennter Netze auf nur einer Faser. Außerdem können dadurch WDM-Systeme relativ leicht aufgerüstet werden, da im Wesentlichen nur die Endgeräte eines Kanals angepasst werden müssen.
- WDM-Systeme machen optimalen Gebrauch der optischen Mehrkanalverstärker durch die gleichzeitige Verstärkung einer Vielzahl von Kanälen. Damit wird ein WDM-System bezüglich Faser- und Verstärkerkosten deutlich günstiger als ein entsprechendes System mit mehreren parallelen Fasern.
- WDM-Systeme können stufenweise bestückt werden. Damit ergibt sich eine bessere Skalierbarkeit als bei TDM-Systemen, die sofort auf die höchste auftretende Bitrate ausgelegt werden müssen.

Diese Vorteile haben es ermöglicht, die enorme theoretische Übertragungskapazität einer Glasfaser besser auszunutzen und führten zu einer großen Verbreitung von WDM-Systemen in den letzten Jahren. Zur Realisierung eines WDM-Systems gibt es zwei grundsätzliche Alternativen [184]:

- Direktempfang oder Geradeausempfang (*direct detection*): Die Empfängerstufe erkennt das Vorhandensein bzw. Fehlen eines Lichtsignals im zu einem Bit gehörenden Zeitschlitz. Die übertragenen optischen Signale werden hierzu in der Intensität moduliert, während auf der Empfängerseite im Wesentlichen die Anzahl ankommender Photonen ausgewertet werden muss.
- Kohärenter Empfang oder Überlagerungsempfang (*coherent detection*): Bei diesen Systemen wird der optische Träger bezüglich seiner Amplitude, Frequenz oder Phasenlage moduliert. Beim Empfänger findet eine Überlagerung mit einem lokal erzeugten Signal und die Auswertung des Interferenzsignals mit einer Photodiode statt. Sind dabei die Trägerfrequenz und die Frequenz des lokalen Signals identisch, spricht man von Homodyn-Empfang, ansonsten von Heterodyn-Empfang.

Obwohl auch für kohärente Systeme zahlreiche Forschungsarbeiten durchgeführt wurden [145], dominiert bei heutigen Systemen der Direktempfang, da im Vergleich zum kohärenten Empfang vergleichbare Systemleistungen mit deutlich geringerem Aufwand erreicht werden können.

Für die Bewertung und den Vergleich von WDM-Systemen sind folgende Parameter von großer Bedeutung:

- Kanalabstand, d. h. Differenz der Frequenzen benachbarter Kanäle.
- Übertragungsrate.
- Reichweite: hier muss unterschieden werden zwischen der Reichweite mit bzw. ohne Zwischenverstärker sowie der mit bzw. ohne Regeneration erzielbaren Reichweite.
- Bitfehlerrate: hier wird bei heutigen Systemen bereits eine Rate  $< 10^{-10}$  gefordert, für künftige Systeme sollen  $< 10^{-12}$  gefordert werden [121].

Die genannten Parameter sind abhängig voneinander. Beispielsweise bedingt eine Erhöhung der Bitrate eine Reduktion der erzielbaren Reichweite auf Grund der Dispersion. Insbesondere die auf einer Faser erzielbare Übertragungsrate von optischen Übertragungssystemen hat in den letzten Jahren stark zugenommen: 1994 wurden mit kommerziellen WDM-Systemen 5 Gbit/s erreicht (2 Kanäle mit je 2,5 Gbit/s), 1996 waren es bereits 40 Gbit/s und 1998 ca. 100 Gbit/s [229]. 1999 wurden bereits 320 Gbit/s realisiert [61] und im Jahr 2000 wurden mit 80-Kanal-Systemen 400 Gbit/s erzielt [107], während inzwischen bereits Systeme im Tbit/s-Bereich verfügbar sind. Auf Grund der bei Laborsystemen bereits erzielten großen Verbesserungen (beispielsweise durch ein System mit 80 Kanälen zu je 40 Gbit/s in [96]) ist auch für die absehbare Zukunft eine unveränderte Fortführung dieses Trends zu erwarten.

#### 2.1.4.2 Vermittlungssysteme

WDM-Vermittlungssysteme können die räumliche Dimension, den Frequenzbereich, den Zeitbereich oder Kombinationen hiervon umfassen. Für die zeitliche Vermittlung optischer Signale ohne Wandlung in den elektronischen Bereich gibt es eine Reihe von Ansätzen zu optischer Paketvermittlung, die aber im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden (siehe Angaben zu weiterführender Literatur in Abschnitt 2.4.2). Wird die zeitliche Vermittlung im elektronischen Bereich durchgeführt, so lassen sich die entsprechenden Ansätze den nachfolgend beschriebenen optischen Vermittlungssystemen ohne weitere Änderungen überlagern. Deshalb wird hier nur die Vermittlung im Raum und im Frequenzbereich näher betrachtet.

Die Vermittlung im Frequenzbereich geschieht mit Hilfe von Wellenlängenkonvertern und findet praktisch immer in Kombination mit räumlicher Vermittlung für einzelne Wellenlängkanäle statt. Für die räumliche Vermittlung gibt es neben der aus der klassischen Vermittlungstechnik bekannten Vielfalt an Koppelanordnungen zusätzliche Möglichkeiten bei optischer

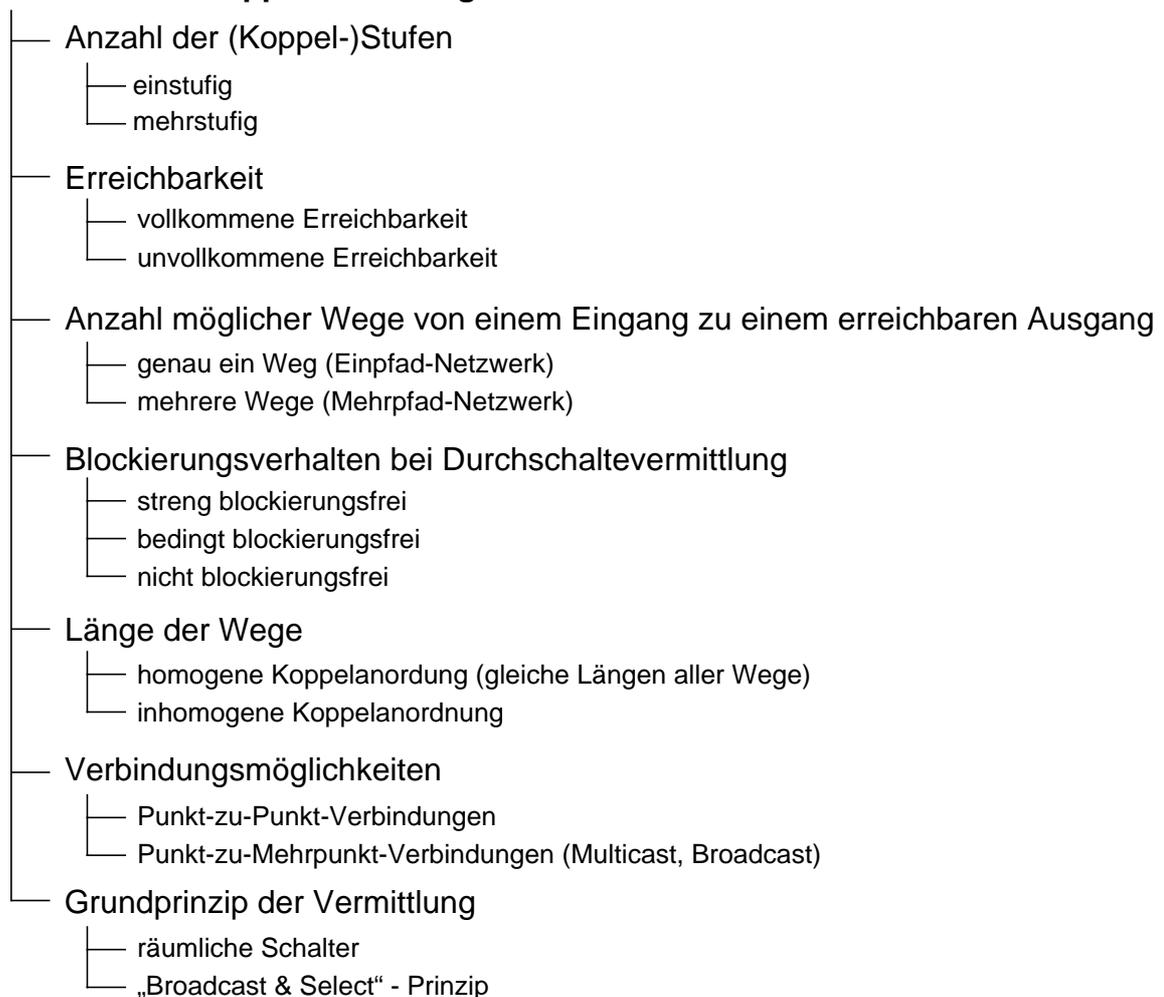
Vermittlung. Die entsprechenden Koppelanordnungen werden nachfolgend kurz vorgestellt, ehe die darauf aufbauenden Knotentypen „Add-Drop-Multiplexer“ (ADM) und „Cross-Connect“ (CC) vorgestellt werden.

## Koppelanordnungen

Bild 2.13 zeigt mögliche Klassifizierungsmerkmale für optische Koppelanordnungen. Ein großer Teil dieser Merkmale wird auch zur Klassifizierung von elektronischen Koppelnetzen beispielsweise für Telefonnetze oder für ATM-Netze verwendet [159, 265].

Für die Realisierung mit räumlichen Schaltern kommen neben Schaltmatrizen (realisierbar beispielsweise mit den in Abschnitt 2.1.3.5 beschriebenen spiegelbasierten Schaltern) auch die auf 2x2-Schaltern beruhenden bekannten Topologien für Einpfad- und Mehrpfadnetzwerke in Frage (siehe Beispiel in Bild 2.14). Außerdem ist es in der Optik prinzipiell möglich, dreidimensionale Koppelnetzstrukturen durch Verbindung von zweidimensionalen Strukturen mit

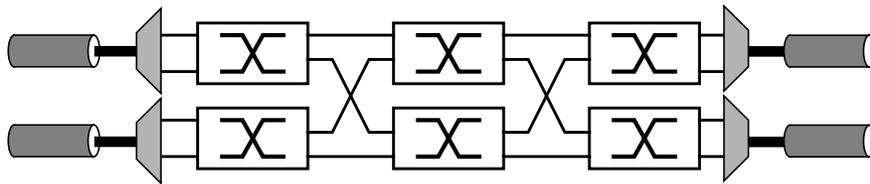
### Merkmale von Koppelanordnungen



**Bild 2.13:** Merkmale zur Klassifizierung von optischen Koppelanordnungen

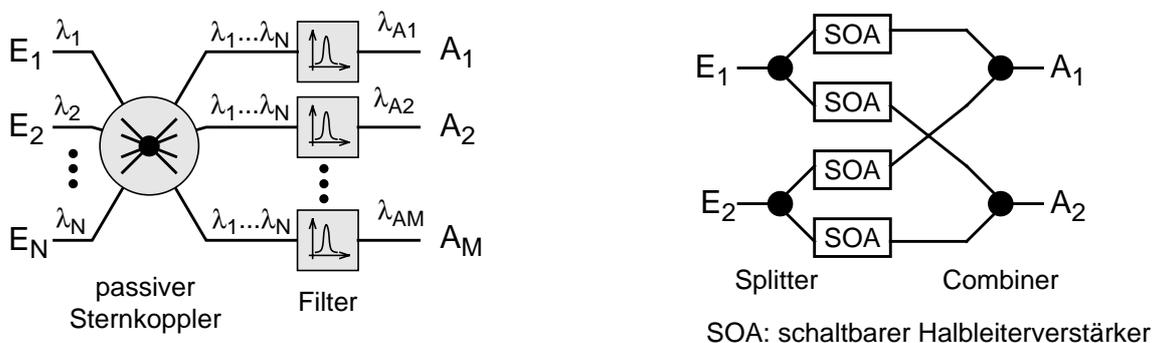
Freiraumzwischenleitungen zu realisieren [118]. Dabei können diese 3D-Strukturen äquivalent zu bekannten 2D-Strukturen sein.

Bei diesen Topologien entstehen aber aufgrund der optischen Eigenschaften der Schaltelemente deutlich größere Realisierungsschwierigkeiten als bei elektronischen Koppelnetzen. So ist beispielsweise die Kaskadierbarkeit der Elemente beschränkt, und es muss auf das Übersprechen zwischen den Kanälen geachtet werden. Obwohl bereits größere Koppelnetze erfolgreich in Laborsystemen demonstriert werden konnten (beispielsweise ein 48x48-Koppelnetz bestehend aus 6x6-Elementen [43]), wird augenblicklich spiegelbasierten MEMS-Systemen eine größere Zukunftschance eingeräumt.



**Bild 2.14:** Beispiel für eine Koppelanordnung basierend auf 2x2-Schaltelementen

Die zweite grundsätzliche Möglichkeit zur Realisierung optischer Koppelanordnungen nutzt das sogenannte „Broadcast & Select“-Prinzip („Verteilen und Auswählen“): Ein Eingangssignal wird für jeden möglichen Ausgang kopiert und anschließend bei allen ungewünschten Ausgängen herausgefiltert. Diesem Prinzip kommt bei optischer Vermittlung eine große Bedeutung zu, da das Kopieren durch rein passive optische Teiler sehr einfach realisiert werden kann. Der Hauptnachteil liegt in der unvermeidlichen Signalabschwächung an den Teilern. „Broadcast & Select“-Vermittlungssysteme können mit passiven Sternkopplern, mit SOA-basierten Strukturen (siehe Bild 2.15), mit SLM-basierten Architekturen oder mit 2x2-Kopplern, bei denen die Eingangssignale jeweils auf beide Ausgänge aufgeteilt werden, realisiert werden.



**Bild 2.15:** Beispiele für „Broadcast & Select“-Koppelanordnungen

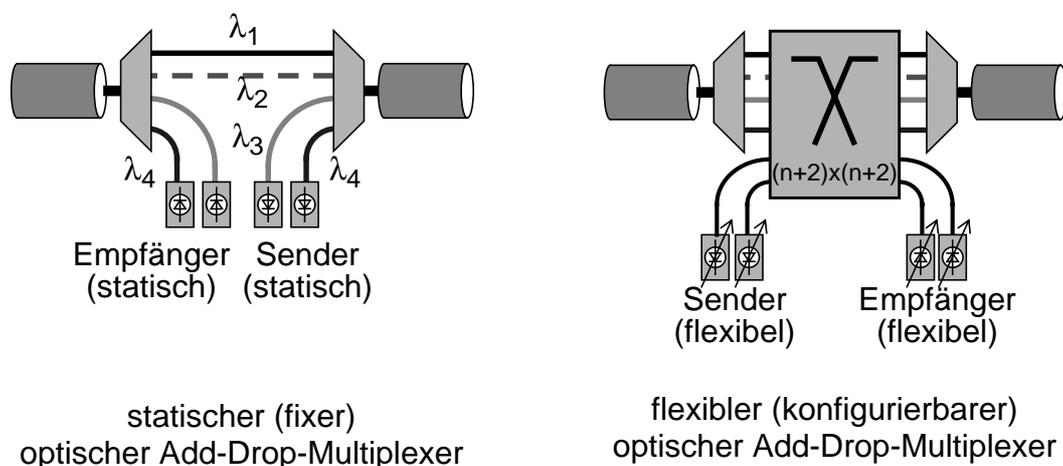
Die beschriebenen Strukturen und Topologien können nicht nur für Koppelanordnungen verwendet werden, sie entsprechen auch häufig verwendeten Netztopologien (siehe Abschnitt 2.2).

### Add-Drop-Multiplexer und Cross-Connect

Ein Add-Drop-Multiplexer (ADM) besteht prinzipiell aus jeweils einem externen Ein- und Ausgang sowie jeweils einem lokalen Eingang (Quelle) und Ausgang (Senke). Ein Teil des Eingangssignals kann an der lokalen Senke terminiert werden, während der restliche Teil direkt zum externen Ausgang durchgeleitet wird. Zusätzlich kann ein Signal von der lokalen Quelle in das Ausgangssignal eingespeist werden. In WDM-Netzen sind vor allem Add-Drop-Multiplexer bedeutend, die auf Wellenlängenkanälen arbeiten. Bild 2.16 zeigt die Grundstruktur der beiden Hauptvarianten für optische ADMs (OADM). ADMs werden hauptsächlich zur Realisierung von Ringnetzen eingesetzt.

Ein statischer OADM ist einfach aufgebaut. Das Eingangssignal einer Faser wird durch einen Demultiplexer in einzelne Wellenlängenkanäle aufgeteilt. Ein Teil dieser Kanäle wird zu einem lokalen Empfänger geführt, während die anderen Kanäle direkt zum Ausgang geleitet werden. Dort werden sie zusammen mit lokalen Signalen in einem Multiplexer auf die abgehende Faser zusammengefasst.

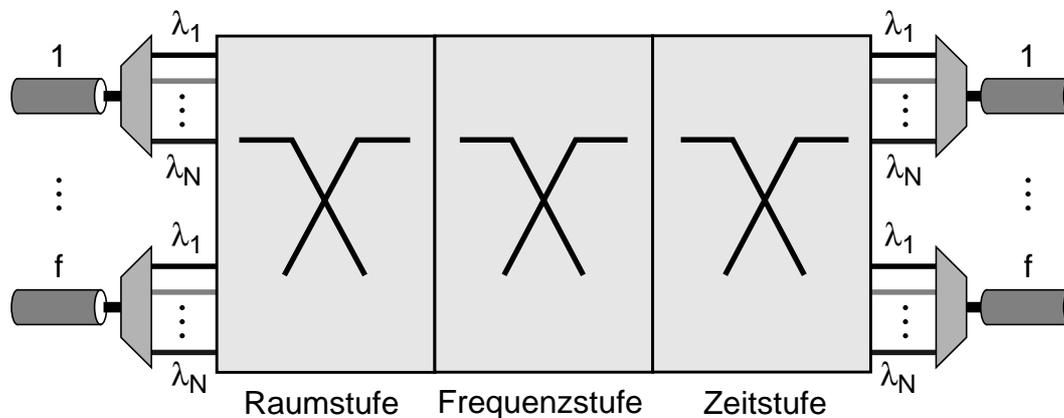
Bei einem konfigurierbaren OADM können die zu terminierenden Kanäle flexibel gewählt werden. Dazu sind konfigurierbare lokale Sender und Empfänger sowie eine Koppelanordnung erforderlich, um die Eingangssignale wahlweise auf den Ausgang oder die lokalen Empfänger zu schalten. Es sind unterschiedliche Stufen der Flexibilität denkbar entsprechend der Anzahl von Kanälen, für die eine Schaltmöglichkeit besteht. Neben der im Bild gezeigten Möglichkeit einer einzelnen, großen Koppelanordnung für alle Kanäle ist es auch möglich, einen 2x2-Schalter für jede Wellenlänge zu verwenden.



**Bild 2.16:** Add-Drop-Multiplexer für WDM-Netze

Ein ADM kann auch mehrere Ein- und Ausgangsfasern besitzen, wobei aber keine Vermittlung zwischen den Fasern möglich ist. Dagegen ist ein Cross-Connect (CC) im Wesentlichen ein erweiterter ADM mit mehreren Ein- und Ausgängen, zwischen denen eine vom Netzmanagement gesteuerte Vermittlung möglich ist. In WDM-Systemen sind dabei drei Stufen denkbar: eine räumliche Stufe zur Vermittlung der Wellenlängen auf die gewünschte Ausgangsfaser, eine Frequenzstufe zur Wellenlängenkonversion und eine Zeitstufe für die zeitliche Vermittlung (siehe Bild 2.17). Zusätzlich sind auch hier lokale Ein- und Ausgänge möglich, die aber bei einem CC gleich wie externe Anschlüsse behandelt werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein solcher CC als optischer Cross-Connect (OCC) bezeichnet.

Zur dargestellten Grundstruktur gibt es mehrere Varianten, die sich beispielsweise hinsichtlich der vorhandenen Stufen oder der Funktionalität einzelner Stufen unterscheiden. Für die Anwendung in optischen Transportnetzen wird meist eine intern blockierungsfreie räumliche Stufe in Kombination mit einer (möglicherweise nur teilweise bestückten) Frequenzstufe ohne eine optische Zeitstufe verwendet. Solche zweistufigen OCCs liegen auch den späteren Untersuchungen in dieser Arbeit zu Grunde. Jede dieser Strukturen kann auf unterschiedliche Weise realisiert werden. Einige Beispiele für Strukturen und Realisierungen von OCCs finden sich im Abschnitt 2.2.2.3. CCs werden zur Verbindung von Ringnetzen und zur Realisierung von vermaschten Netzen benötigt.



**Bild 2.17:** Prinzipielle Struktur eines Cross-Connects für WDM-Netze

## 2.1.5 Relevante Standards und Empfehlungen

Die Entwicklung optischer Netze war zu Beginn stark durch firmenspezifische Lösungen geprägt, da die Geschwindigkeit der Standardisierung nicht mit den Innovationen Schritt halten konnte. Inzwischen wurde aber die Notwendigkeit übergreifender Standards erkannt [179] und eine Reihe von Gremien arbeiten an Standards bzw. Empfehlungen für die Realisierung optischer Netze:

- *International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)*: Von der ITU-T wurden bereits einige für optische Netze bedeutende Standards verabschiedet, von denen eine Auswahl weiter unten kurz vorgestellt wird.
- *Internet Engineering Task Force (IETF)*: Hier entstehen erste Empfehlungen zur Realisierung von WDM-basierten IP-Netzen (*Internet Protocol*), die in der vorliegenden Arbeit nicht speziell betrachtet werden. Allerdings ist zu erwarten, dass Architekturen und Protokolle für künftige optische Netze stark von diesen Arbeiten beeinflusst werden.
- *Optical Internet Forum (OIF)*: Das OIF ist ein von der Industrie gegründetes Gremium mit dem Ziel, die Integration von Photonik und Internet-Technologie zu fördern. Inzwischen sind praktisch alle namhaften Hersteller und Netzbetreiber vertreten. Welche Bedeutung die Arbeit dieses Gremiums haben wird, ist momentan noch nicht abzusehen.
- *Optical Domain Service Interconnect Initiative (ODSI)*: Diesem zu Beginn des Jahres 2000 neu gegründeten Forum sind bereits mehr als 100 Firmen beigetreten [64]. Das Hauptziel ist die Definition von Signalisier- und Steuerungsmechanismen an der Grenze zwischen künftigen optischen Netzen und bestehenden elektronischen Netzen. Die Bedeutung dieses Gremiums ist im Vergleich zu den oben genannten Gruppen deutlich geringer.

Von der ITU-T wurden eine Reihe von Empfehlungen (*recommendations*, im Folgenden wird der Begriff *Standard* synonym verwendet) verabschiedet, die sich mit verschiedenen Aspekten digitaler Netze beschäftigen. Die meisten der Betrachtungen beziehen sich auf SDH-Netze (*Synchronous Digital Hierarchy*). Einige allgemeinere Aspekte lassen sich auch auf digitale optische Netze übertragen. Dies gilt insbesondere für die in G.805 [130] dargestellte funktionale und technologieunabhängige Beschreibung einer Transportnetzarchitektur sowie die hier von abgeleitete Beschreibung der Architektur von SDH-Netzen in G.803 [129].

Eine ganze Reihe von Standards beschäftigt sich mit Aspekten optischer Übertragungstechnik. Hierzu zählen beispielsweise Standards zu physikalischen und technischen Aspekten von optischen Glasfaserkabeln und Einkanal-Übertragungssystemen (G.650, G.651, G.652, G.653, G.654, G.661) oder zu Unterseekabelsystemen (G.971, G.972, G.974, G.981). In G.911 [132] werden Parameter für die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit (*reliability, availability*) von Fasersystemen und Methoden zur Berechnung von Kenngrößen aus diesen Parametern angegeben.

Zwei weitere Standards sind speziell für WDM-Netze von Bedeutung: G.872 [131] und G.692 [128]. In G.872 wird die Architektur optischer Transportnetze unter funktionalen Gesichtspunkten beschrieben. Die Modellierungskonzepte und die Darstellung basieren dabei ebenfalls auf dem Standard G.805. Eine detailliertere Auswertung dieses Standards erfolgt in Abschnitt 2.2.1. Aufbauend auf dieser technologieunabhängigen Beschreibung optischer Netze wird zur Zeit in einigen Arbeitsgruppen an zahlreichen weiteren Standards gearbeitet

[45, 179]. Hauptarbeitsgebiete sind die Realisierung einer verteilten Netzsteuerung, Managementaspekte, Komponenten und Systeme sowie Schnittstellen für optische Netze.

Im Standard G.692 wird hauptsächlich ein Frequenzgitter für Übertragungskanäle in optischen WDM-Systemen definiert. Es wird die Frequenz (anstelle der Wellenlänge) als Bezugsgröße für die Abstände zwischen den Kanälen verwendet. Dafür gab bei der ITU-T vor allem der physikalische Grund den Ausschlag, dass die Frequenz eines Signals in verschiedenen Medien gleich bleibt, während sich die Wellenlänge (und die Ausbreitungsgeschwindigkeit) ändert [85]. Neben Frequenzgittern mit Abständen von 50 oder 100 GHz zwischen zwei Kanälen für den Bereich von 192,1 bis 196,1 THz wird auch die Referenzfrequenz (193,1 THz) festgelegt. Weiter werden Belegungspläne für verschiedene Anwendungen definiert, da nicht immer alle möglichen Kanäle gleichzeitig belegt sein müssen. Inzwischen sind bereits zahlreiche Hersteller vom vorgegebenen Kanalraster und Frequenzbereich abgewichen, um eine höhere Kanalzahl in ihren WDM-Systemen zu erreichen.

## 2.2 Architekturen für photonische Netze

In diesem Abschnitt wird zunächst das von der ITU-T entwickelte funktionale Modell eines optischen Netzes vorgestellt. Danach werden verschiedene Netzarchitekturen näher beschrieben, wobei der Schwerpunkt auf Architekturen für Weitverkehrs-Transportnetze liegt. Aufgrund der Bedeutung in photonischen Netzen folgt abschließend eine separate Betrachtung der Wellenlängenkonversion aus Netzgesichtspunkten.

### 2.2.1 Schichtenmodelle für optische Transportnetze

Um die Schnittstellen und Funktionen von komplexen Kommunikationssystemen standardisieren zu können, wurde von der Internationalen Organisation für Standardisierung (ISO) ein Basisreferenzmodell für die Verbindung offener Systeme vorgestellt [127], das auch von der ITU-T im Standard X.200 übernommen wurde [133] und als OSI-Modell (OSI für *open systems interconnection*) bezeichnet wird. Es unterteilt die Funktionen eines Kommunikationssystems in sieben Schichten (s. Bild 2.18). Grundprinzip bei der Unterteilung in Schichten war die Zerlegung eines komplexen Systems in einfachere funktionale Einheiten, die voneinan-

Application (A) Verarbeitung
Presentation (P) Darstellung
Session (S) Steuerung
Transport (T) Transport
Network (N) Vermittlung
Data Link (DL) Sicherung
Physical (Ph) Bitübertragung

**Bild 2.18:** Schichtenmodell für Kommunikationsnetze gemäß OSI

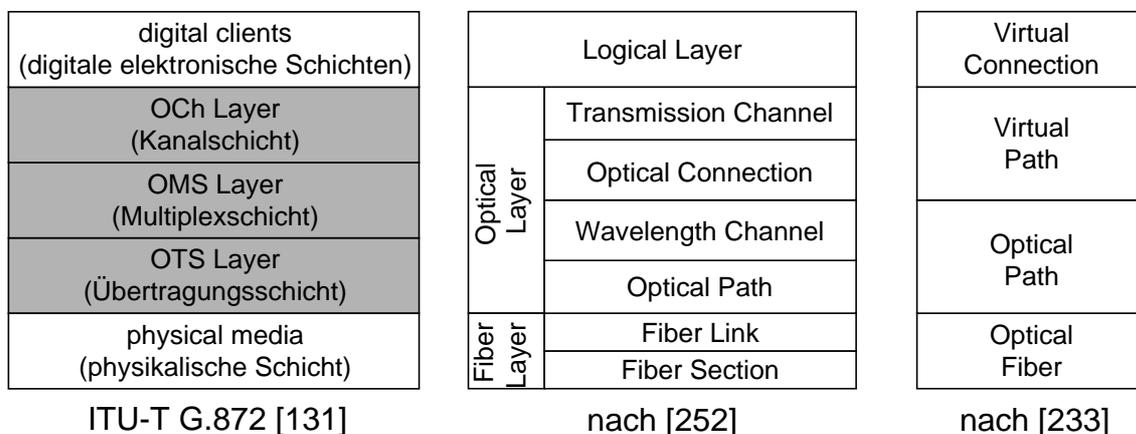
der unabhängig sind und zwischen denen definierte Schnittstellen bestehen. Weitere Informationen zu den Funktionen der einzelnen Schichten, den Schnittstellen sowie den Protokollen finden sich beispielsweise in [127, 133, 188, 264].

Auch zur Beschreibung der Architektur optischer Transportnetze bietet sich die Verwendung eines Schichtenmodells an. Von der ITU-T wurde im Standard G.872 ein Architekturmodell für optische Transportnetze (im Folgenden *OTN-Modell* genannt) vorgeschlagen, das auf einer Unterteilung der optischen Schicht in drei Unterschichten beruht [131]. Eine Darstellung des im folgenden Abschnitt beschriebenen OTN-Modells sowie weiterer Schichtenmodelle für optische Kommunikationsnetze aus der Literatur finden sich in Bild 2.19, wobei sich die Schichten der verschiedenen Modelle nicht direkt entsprechen.

### 2.2.1.1 OTN-Modell nach G.872

Es konzentriert sich auf die funktionale Beschreibung eines optischen Transportnetzes, das digitale Signale (beispielsweise PDH, SDH oder ATM) unterstützt. Weder die digitalen Schichten oberhalb der optischen Transportschicht noch die Schicht des physikalischen Mediums (Glasfasern) werden näher betrachtet. Die Betrachtungen sind speziell auf WDM-Netze ausgelegt, obwohl einige Aspekte auch für andere optische Netze gelten. Die optische Transportschicht wird in drei Schichten aufgeteilt:

- *Optical channel layer* (Optische Kanalschicht, OCh): Diese Schicht bietet Funktionen zur netzweiten Behandlung von einzelnen optischen Kanälen (*Wellenlängenkanäle*), die für den Transport von digitalen Informationen möglichst transparent sein sollen. Im einzelnen sind in dieser Schicht Funktionen für das flexible Schalten von Kanälen (dies schließt auch Wellenlängenkonversion mit ein), zur Erzeugung von Steuer- und Überwachungsinformationen sowie für verschiedene Aufgaben des Managements definiert.



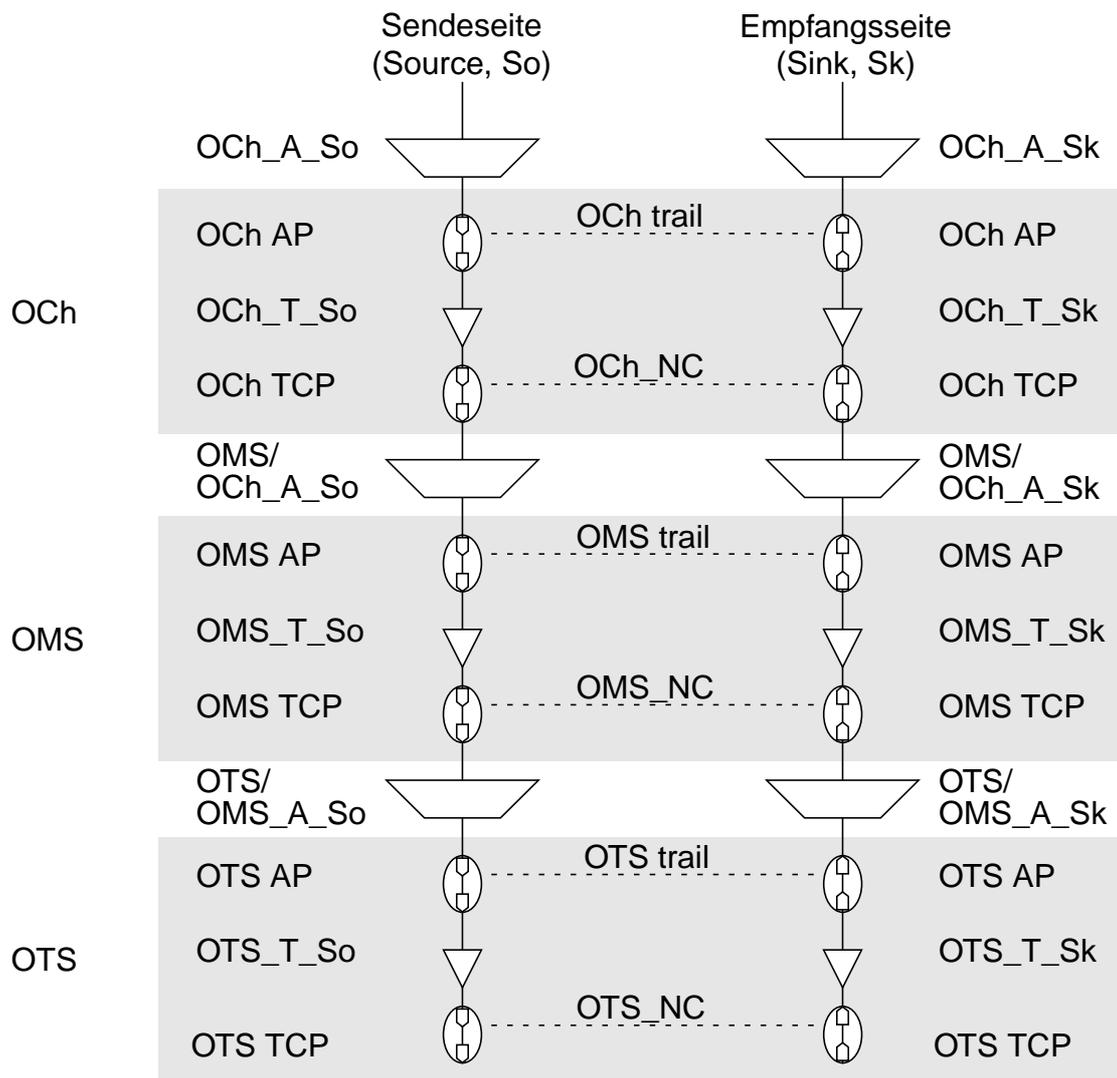
**Bild 2.19:** Übersicht über Schichtenmodelle für optische Kommunikationsnetze

- *Optical multiplex section layer* (Optische Multiplexschicht, OMS): Diese Schicht bietet Funktionen für optische Multiplexsignale bestehend aus mehreren Wellenlängenkanälen (dies schließt den Sonderfall eines einzelnen Kanals mit ein). Dabei können die verschiedenen optischen Kanäle prinzipiell unterschiedliche Datenformate unterstützen. Wichtigste Funktionen sind die Überwachung des Multiplexsignals sowie die Verarbeitung der hierfür erforderlichen Informationen.
- *Optical transmission section layer* (Optische Übertragungsschicht, OTS): Diese Schicht umfasst Funktionen, die zur Übertragung der OMS-Signale über verschiedene Glasfasern erforderlich sind.

Zwischen diesen Schichten wird konsequent eine Dienstnutzer-Diensterbringer-Beziehung definiert. Bild 2.20 zeigt eine genauere Darstellung der drei Schichten sowie der Schnittstellen zwischen den Schichten gemäß dem Standard G.872. Die erforderlichen Funktionen werden jeweils in Anpassungsfunktionen (*adaptation*) zur Anpassung der Nutzdaten zwischen Schichten und Terminierungsfunktionen (*termination*) zur Absicherung der Daten innerhalb einer Schicht unterteilt. Weiter wird jeweils die Sendeseite (*source*) von der Empfangsseite (*sink*) unterschieden.

Bild 2.20 zeigt ebenfalls die verschiedenen Verbindungen, die zwischen Instanzen einer Schicht definiert werden. Es werden „Trails“ und „Network Connections“ (NC) unterschieden. Ein Trail stellt eine Verbindung zum Transport der Daten eines Dienstnutzers dar, wobei die erforderlichen Anpassungsfunktionen zwischen Dienstnutzer und Diensterbringer bereits durchgeführt wurden. Eine NC stellt eine Verbindung dar, die zusätzlich die Terminierungsinformationen zur Absicherung der Verbindung in dieser Schicht enthält. Ist eine Schicht in mehrere Partitionen aufgeteilt, kann eine NC aus einer Verkettung von „Link Connections“ (zwischen Partitionen) und „Subnetwork Connections“ (innerhalb einer Partition) bestehen.

Im OTN-Modell werden uni- und bidirektionale Punkt-zu-Punkt-Verbindungen sowie Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen betrachtet. Dabei wird davon ausgegangen, dass auf der physikalischen Schicht jeweils Faserpaare für bidirektionale Kommunikation verwendet werden. Diese Annahme ist für Transportnetze nach heutigem Stand gerechtfertigt, obwohl prinzipiell auch bidirektionale Kommunikation über eine einzelne Faser möglich ist. Weitere Festlegungen in G.872 betreffen Netzmanagementfunktionen (*operation, administration and maintenance*, OAM), Schutzmechanismen zur Absicherung der definierten Verbindungen, Schnittstellen zur Verbindung mehrerer optischer Netzbereiche (*domains*), sowie Schnittstellen für die Verbindung mit Netzen, die nicht G.872 entsprechen.


**Abkürzungen:**

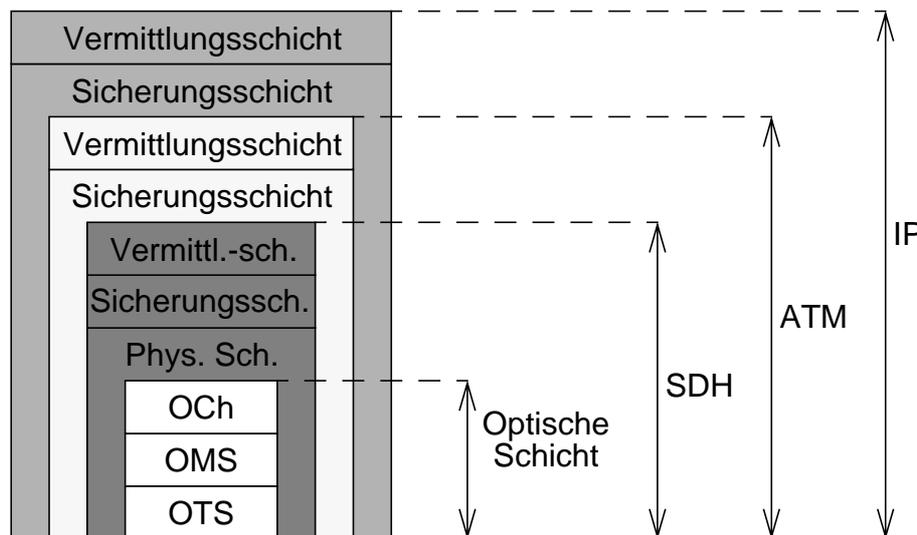
OCh_A_So(Sk)	Opt. Ch. Client Adapt. Source (Sink)	OTS/OMS_A_So(Sk):	Opt. Tr. Sect. / Mult. Sect. Adaptation Source (Sink)
OCh AP	Optical Channel Adapt. Point	OTS AP	Opt. Transm. Section Adapt. Point
OCh_T_So(Sk)	Optical Channel Term. Source (Sink)	OTS_T_So(Sk)	Opt. Transmission Sect. Term. Source (Sink)
OCh TCP	Opt. Ch. Termination Conn. Point	OTS TCP	Opt. Transm. Sect. Term. Connect. Point
OMS/OCh_A_So(Sk):	Opt. Multiplex Section/Optical Channel Adaptation Source (Sink)	NC	Network Connection
OMS AP	Opt. Multipl. Section Adapt. Point		
OMS_T_So(Sk)	Opt. Mult. Sect. Term. Source (Sink)		
OMS TCP	Opt. Mult. Sect. Term. Connect. Point		

**Bild 2.20:** Schichtenmodell eines optischen Transportnetzes gemäß G.872

### 2.2.1.2 Beziehung zwischen dem OSI-Modell und dem OTN-Modell

Die Schichten OTS, OMS und OCh des OTN-Modells lassen sich nicht vollständig den OSI-Schichten 1 bis 3 zuordnen, da gewisse Abweichungen bestehen. So sind beispielsweise Schutzmechanismen in allen drei optischen Schichten möglich.

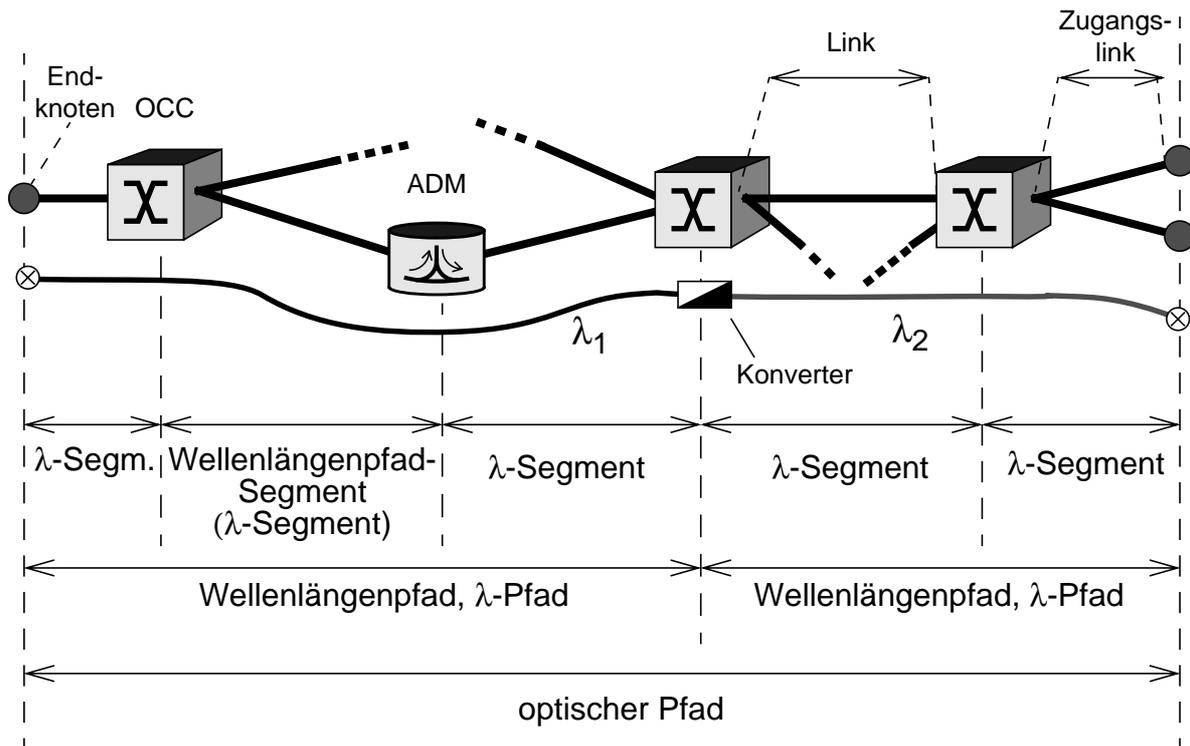
Noch größere Schwierigkeiten ergeben sich bei der Betrachtung von WDM-basierten elektronischen Netzen. Aus Sicht eines IP-Netzes beispielsweise stellt die optische Transportschicht die Schicht 1 gemäß OSI-Modell dar. Andererseits umfasst die optische Transportschicht auch Funktionen, die den OSI-Schichten 2 und 3 zuzuordnen sind. Für die Beschreibung von WDM-basierten elektronischen Netzen ergibt sich daher eine mehrstufige Schichtung abhängig von den eingesetzten Technologien. Bild 2.21 zeigt dies beispielhaft für ein Netz, bei dem IP-Pakete durch ATM-Zellen transportiert werden, die wiederum auf SDH-Pfaden in einem WDM-Netz laufen.



**Bild 2.21:** Erweitertes Schichtenmodell für ein Netz mit gleichzeitigem Einsatz von IP, ATM, SDH und WDM

### 2.2.1.3 Begriffe und Netzmodell für die vorliegende Arbeit

Für die vorliegende Arbeit sind vor allem die OCh- sowie die OMS-Schicht des OTN-Modells von Bedeutung. Einerseits werden nicht alle dort definierten Funktionsblöcke benötigt, andererseits werden für spätere Modellierungen mehrere Elemente eingesetzt, die keine direkte Entsprechung in den bisherigen Standards haben. Bild 2.22 definiert deshalb an Hand eines Netzmodells mit weitgehend aus Abschnitt 2.1 bekannten Elementen einige wesentliche Begriffe.



**Bild 2.22:** Begriffsdefinitionen für die vorliegende Arbeit

Ein *Link* bezeichnet ganz allgemein einen Abschnitt zwischen zwei benachbarten, d. h. durch Übertragungssysteme verbundenen *Netzknoten* (oder *Knoten*). Abschnitte zwischen einem Endknoten, an dem Verkehr entspringen oder enden kann, und einem vermittelnden Netzknoten (OCC oder ADM) werden als *Zugangslinks* bezeichnet.

Zur Beschreibung der optischen Verbindungen werden folgende Begriffe definiert. Ein *Wellenlängenkanal* entspricht der einer Wellenlänge zugeordneten Bandbreite und kann einen oder mehrere Links umfassen. Ein *optischer Kanal* entspricht einer Verkettung von mehreren Wellenlängenkanälen mit möglicherweise unterschiedlichen Wellenlängen. Ein Wellenlängenkanal zwischen zwei benachbarten Knoten wird mit *Wellenlängenpfad-Segment* ( $\lambda$ -Segment) bezeichnet. Ein *Wellenlängenpfad* ( $\lambda$ -Pfad) entspricht einer Verkettung von  $\lambda$ -Segmenten und damit einem Wellenlängenkanal über mehrere Links hinweg auf einer durchgehenden Wellenlänge. Ein *optischer Pfad* entspricht einer Verkettung von Wellenlängenpfaden, wobei zwischen den einzelnen  $\lambda$ -Pfad eine Wellenlängenkonversion stattfinden kann. Ein optischer Pfad umfasst damit neben dem geographischen Weg auch die Zuordnung einer Wellenlänge auf jedem Abschnitt dieses Weges.

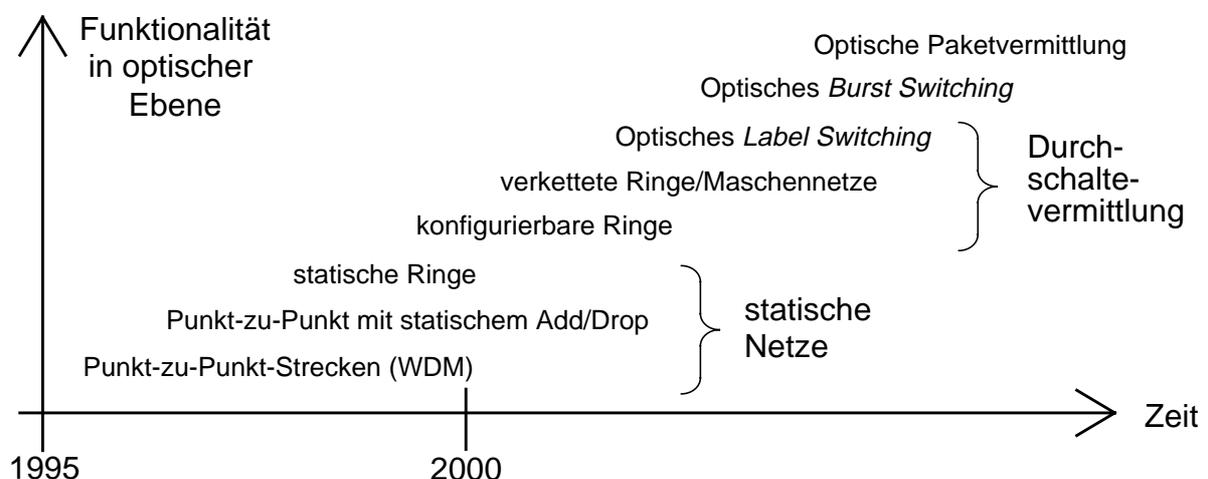
Ein *WDM-Signal* besteht aus mehreren Wellenlängenkanälen mit unterschiedlicher Wellenlänge. Ein WDM-Signal zwischen zwei Endknoten der optischen Ebene wird als *WDM-Pfad* und zwischen benachbarten Knoten als *WDM-Pfadsegment* bezeichnet.

## 2.2.2 Optische Transportnetze

Beim heutigen Stand der Technik können durch den Einsatz optischer Netze im Transportbereich in Kombination mit einer elektronischen Netzebene die Vorteile beider Technologien optimal genutzt werden. Optische Netze erlauben eine effiziente Lösung für den Transport und die Vermittlung großer Verkehrsströme, wobei die Anzahl der entsprechenden optischen Verbindungen relativ gering ist. Elektronische Netze ermöglichen andererseits eine praktisch unbegrenzte Anzahl (virtueller) Verbindungen sowie die effiziente Realisierung von Verbindungen mit relativ kleiner Bitrate, während große Verkehrsvolumina nur mit großem Aufwand bewältigt werden können. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von der unterschiedlichen „Granularität“ der beiden Technologien bzw. Netzebenen. Zur Zeit zeichnet sich ab, dass insbesondere der Transport von IP über eine optische Netzebene große Bedeutung erlangen wird (siehe Abschnitt 2.4.2). Rein optisch vermittelnde Gesamtlösungen werden erst längerfristig relevant werden. Deshalb wird in dieser Arbeit immer von einer Kombination aus optischer Transportebene und überlagerter elektronischer Netzebene ausgegangen. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt dabei auf der optischen Ebene.

### 2.2.2.1 Anwendungsgebiete und Netzstrukturen

Optische Transportnetze (OTN) werden bei der Realisierung von Regionalnetzen (*metropolitan area network*, MAN) und Weitverkehrsnetzen (*wide area network*, WAN) Verwendung finden. Beispiele für WANs sind nationale Fernnetze oder internationale Netze, welche auch Unterseekabelsysteme beinhalten können. Nach dem heutigen Kenntnisstand gilt das in Bild 2.23 gezeigte Szenario für die Evolution der optischen Netzebene – schwerpunktmäßig mit WDM-Technik – als sehr wahrscheinlich. Punkt-zu-Punkt-Strecken sowie feste Add/

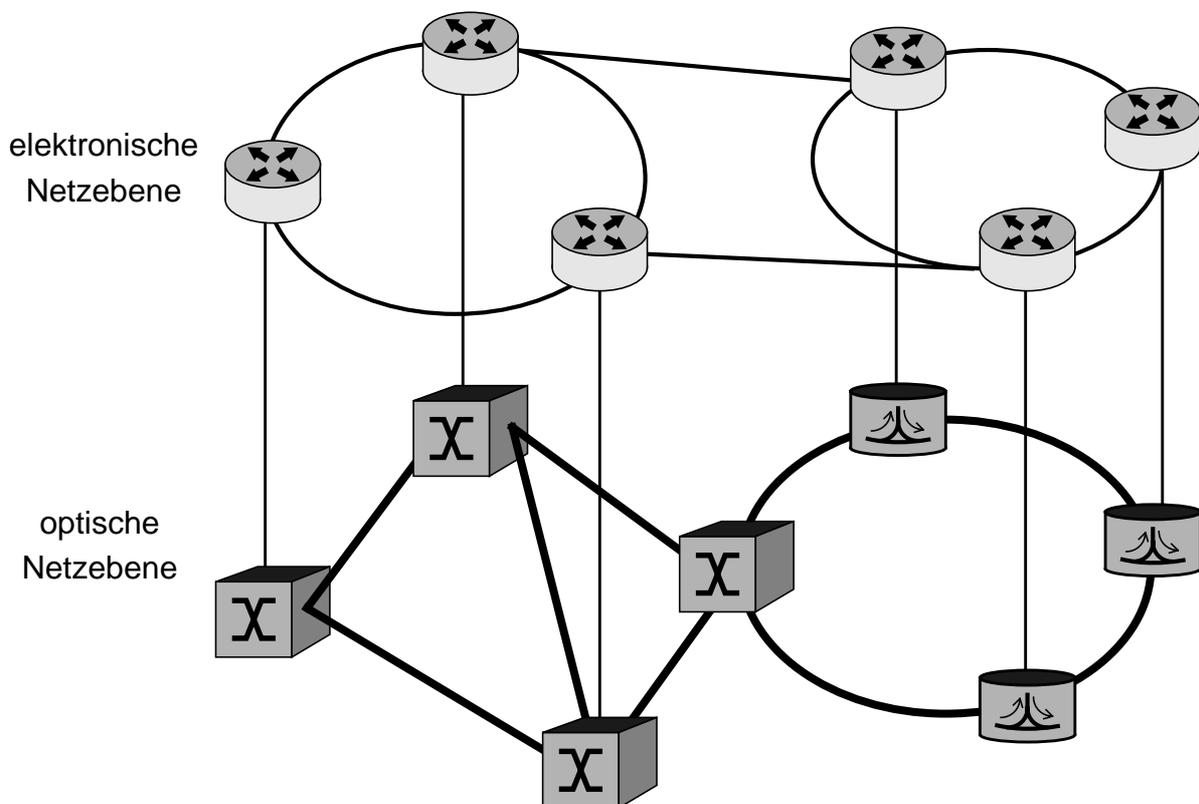


**Bild 2.23:** Szenario für die Evolution optischer Netze

Drop-Multiplexer sind bereits heute realisierbar, konfigurierbare Ring- und Maschennetze werden bereits in Feldversuchen erprobt und stehen kurz vor dem Einsatz in kommerziellen Netzen, während sich Lösungen mit schneller optischer Vermittlung im Zeitbereich noch im Laborstadium befinden. Auf diese Konzepte, deren Realisierung noch weiter in der Zukunft zu erwarten ist, wird in Abschnitt 2.4.2 kurz eingegangen.

Mit den gemäß obigem Bild in naher Zukunft zu erwartenden Möglichkeiten lässt sich das in Bild 2.24 gezeigte Transportnetz realisieren. Die optische Ebene erlaubt dabei eine vom Netzmanagement gesteuerte Durchschaltevermittlung von Wellenlängenkanälen. Sie dient als Transportebene für überlagerte, elektronisch vermittelnde Netze, beispielsweise SDH- oder IP-Netze. Im Rahmen dieser Arbeit werden insbesondere dynamische Vorgänge innerhalb der optischen Netzebene betrachtet.

Ähnliche Strukturen können auch bei Regionalnetzen (*metropolitan area network*, MAN) oder Stadtnetzen (City-Netzen) eingesetzt werden. Für dieses Anwendungsgebiet werden häufig Ringnetze eingesetzt. Die Bedeutung dieser Netze nimmt zur Zeit – bedingt sowohl durch steigenden Bandbreitenbedarf als auch durch eine im Zuge der Liberalisierung zunehmende Anzahl von lokalen Netzbetreibern – stark zu. Die Hauptunterschiede zu WANs bestehen in der kleineren Ausdehnung (wodurch häufig auf optische Regeneratoren oder auch Verstärker



**Bild 2.24:** Transportnetzarchitektur mit einer flexiblen optischen Netzebene bestehend aus OCCs und ADMs sowie einer überlagerten elektronischen Netzebene

verzichtet werden kann) sowie den kleineren Verkehrsströmen. Aufgrund dieser Unterschiede findet der Einsatz von optischen Netzen in MANs gegenüber WANs verzögert statt.

Besondere Bedeutung bei optischen Netzen kommt der sogenannten Wellenlängenkonversion zu, die deshalb im nächsten Abschnitt gesondert behandelt wird.

### 2.2.2.2 Wellenlängenkonversion

Die Betrachtung der Wellenlängenkonversion<sup>4</sup> kann auf drei Ebenen stattfinden: auf Elementebene (Betrachtung der technischen Aspekte einzelner Konverter), auf Knotenebene (Betrachtung von Architektur und Funktionalität von Netzknoten mit Konversion) sowie auf Netzebene (Betrachtung netzweiter Aspekte der Konversion). Die Elementebene wurde bereits in Abschnitt 2.1.3.6 betrachtet. Die Eigenschaften der Elemente können Auswirkungen sowohl auf die Knoten- als auch die Netzebene haben. Einige Knoten- und Netzaspekte werden nachfolgend sowie im nächsten Abschnitt betrachtet.

Wellenlängenkonversion erlaubt den Wechsel der Wellenlänge entlang eines optischen Pfades, ohne die darin transportierte Nutzinformation auswerten zu müssen. Kann in jedem Netzknoten eine beliebige Konversion für alle Kanäle durchgeführt werden (sogenannte *volle Konversion*), so entspricht ein solches WDM-Netz aus funktionaler Sicht einem TDM-Netz mit Zeitlagenumstieg. Trotz der hiermit erreichbaren Netzfunktionalität sprechen zwei wichtige Aspekte gegen eine grundsätzliche Realisierung voller Konversion:

- Die Realisierung und teilweise auch der Betrieb von Konvertern ist sehr aufwändig. Daher könnten prinzipiell kostengünstigere Gesamtlösungen erreicht werden, wenn anstelle der Konverter verstärkt andere Netzressourcen (beispielsweise Übertragungskapazitäten) eingesetzt werden.
- Alle bis heute bekannten Konversionsverfahren haben – wenn auch unterschiedlich starke – negative Eigenschaften hinsichtlich einiger übertragungstechnischer Parameter, beispielsweise der Transparenz oder der Kaskadierbarkeit. Dadurch wird beim Einsatz von Konvertern eine Abwägung zwischen vergrößerter Vermittlungsfunktionalität und verringerter Übertragungsfunktionalität erforderlich.

Daraus ergibt sich die Frage, ob die erforderliche Netzfunktionalität nicht auch unter Verzicht auf volle Konversion erreicht werden kann, und es wurden bereits zahlreiche Konzepte *partieller Konversion* vorgestellt. Hinsichtlich der Konversionsmöglichkeit lassen sich drei Freiheitsgrade unterscheiden: der Konversionsbereich eines Konverters (entspricht der Anzahl von Wellenlängen, auf die ein ankommendes Signal umgesetzt werden kann, [296]), die Anzahl der

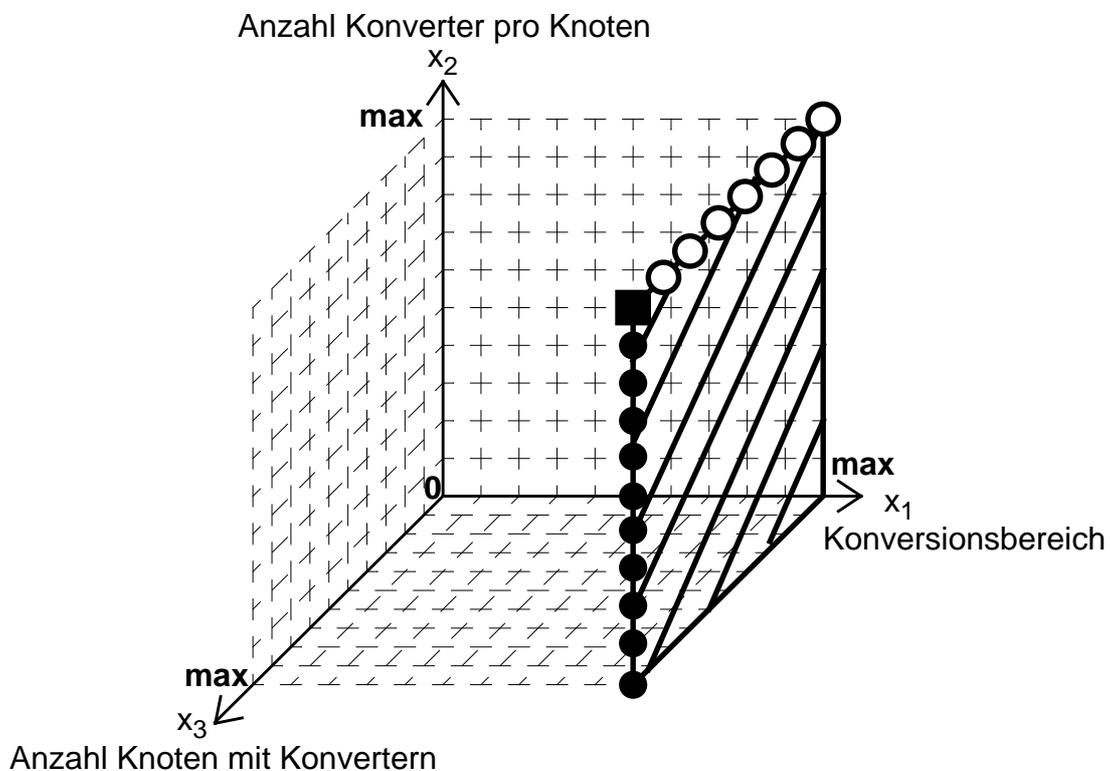
---

4. Die Begriffe Konversion bzw. Konverter werden in dieser Arbeit synonym zu den Begriffen Wellenlängenkonversion bzw. Wellenlängenkonverter verwendet.

Konverter in einem Knoten [165], sowie die Anzahl der Knoten in einem Netz mit Konversionsfunktionalität [257].

Eine schematische Darstellung mit den genannten Parametern als Achsen eines dreidimensionalen Koordinatensystems zeigt Bild 2.25. Vereinfachend wird für die Skizze angenommen, dass alle Knoten eines Netzes gleichartig hinsichtlich ihrer Konversionsfähigkeit sind, was in der Realität keineswegs gegeben sein muss. Außerdem ist zu beachten, dass die in der Skizze dargestellten Konversionsmöglichkeiten mit der jeweiligen räumlichen Vermittlungsfunktionalität der Knoten gemeinsam zu betrachten sind: Eine eingeschränkte Erreichbarkeit in der Raumstufe kann beispielsweise bewirken, dass nicht alle vorhandenen Konverter von einem optischen Pfad genutzt werden können.

Trotz dieser Vereinfachungen lassen sich einige der gebräuchlichsten und auch für die vorliegende Arbeit wichtigsten Konversionsszenarien aus Bild 2.25 entnehmen. Die Achsen des Koordinatensystems entsprechen Netzen ohne Konversion, der mit einem ausgefüllten Quadrat gekennzeichnete Punkt einem Netz mit voller Konversion (d. h. alle Knoten können beliebige Konversion für alle Kanäle durchführen). Größte Bedeutung in bisherigen Untersuchungen hat neben diesen beiden Fällen die schraffierte Fläche mit  $x_1 = x_{1max}$ . Dies entspricht einem beliebigen Konversionsbereich, wie er beispielsweise bei opto-elektronischer Konversion



**Bild 2.25:** Schematische Darstellung zur Einordnung unterschiedlicher Konversionsmöglichkeiten

erreicht werden kann. Hierbei kann eine ankommende Wellenlänge auf eine beliebige andere Wellenlänge umgesetzt werden. Die mit Kreisen dargestellten Achsen in dieser Ebene entsprechen den gängigsten Fällen der partiellen Konversion, nämlich nicht vollständig mit Konvertern bestückten Knoten (ausgefüllte Kreise) und vollständiger Bestückung eines Teils der Knoten (leere Kreise).

Zur Kennzeichnung verschiedener Konversionsszenarien werden in dieser Arbeit folgende Begriffe verwendet:

- *partielle* Konversion: Überbegriff für nicht vollständige Konversion im Netz.
- *punktueller* Konversion: Nur eine Teilmenge der Knoten ist mit Konvertern bestückt.
- *begrenzte* Konversion: Die Anzahl der Konverter in einem Knoten ist geringer als die Anzahl der durch diesen Knoten laufenden Kanäle.
- *bereichsbeschränkte* Konversion: Der Konversionsbereich der vorhandenen Konverter ist eingeschränkt.

Die Vielfalt der Konversionsmöglichkeiten erlaubt zahlreiche Konzepte einer optischen Netzebene, wobei es zwei wichtige Grundkonzepte gibt:

- Netze ohne jede Konversion werden als WR-Netz (*wavelength routing*) oder WP-Netz (*wavelength path*) bezeichnet.
- Netze mit voller Konversion werden WI-Netz (*wavelength interchanging*) oder VWP-Netz (*virtual wavelength path*) genannt.

Der Begriff VWP wurde in der Literatur gewählt, da bei solchen Netzen eine gewisse Analogie zu virtuellen Pfaden (*virtual path*, VP) bzw. virtuellen Verbindungen (*virtual connection*, VC) in ATM-Netzen besteht: Die Kennzeichner einer Verbindung (VP- bzw. VC-Nummer bei ATM, Wellenlänge bei optischen Netzen) sind jeweils nur abschnittsweise von Bedeutung [234].

Für eine weitere Gruppe von Netzen, die im Sonderfall einem WI-Netz entsprechen können, wird die Bezeichnung „opake Netze“ (*opaque networks*) verwendet [97]. Hier wird jeder Wellenlängenkanal jeweils zu Beginn und zu Ende eines Links durch einen sogenannten *Transponder* abgeschlossen. Ein Transponder ist ein spezieller Wellenlängenkonverter, der meist optoelektronisch arbeitet und relativ günstig realisiert ist. Letzteres wird vor allem durch eine feste Ausgangswellenlänge erreicht. Durch geeignete Knotenarchitekturen kann auf diese Weise ein WI-Netz realisiert werden. Wesentliche Gründe für den Einsatz von opaken Netzen sind die erreichbare Interoperabilität von Geräten unterschiedlicher Hersteller sowie die bessere Skalierbarkeit solcher Netze durch die implizit vorhandene Signalregeneration in jedem Netzknoten [97]. Nachteilig sind allerdings die im Vergleich zu einer transparenten Lösung höheren Netzkosten bedingt durch die hohe Anzahl von Transpondern in einem opaken Netz.

### 2.2.2.3 Knotenarchitekturen für optische Transportnetze

Zur Realisierung der im Abschnitt 2.1.4.2 bereits beschriebenen prinzipiellen Architektur von flexiblen optischen Netzknoten können zahlreiche unterschiedliche Technologien eingesetzt werden. Auf diese soll hier nicht näher eingegangen werden. Stattdessen werden nachfolgend einige aus der Literatur bekannte Knotenstrukturen mit unterschiedlicher Funktionalität und unterschiedlichem Realisierungsaufwand gezeigt. Tabelle 2.1 enthält eine kurze Übersicht über einige bedeutende und in umfassenden Feldversuchen erprobte Beispielrealisierungen für OCCs. Die ersten drei Beispiele wurden in europäischen Forschungsprojekten realisiert, das Beispiel der letzten Spalte in einem Projekt in den USA.

*Tabelle 2.1: Realisierungsbeispiele für flexible optische Netzknoten*

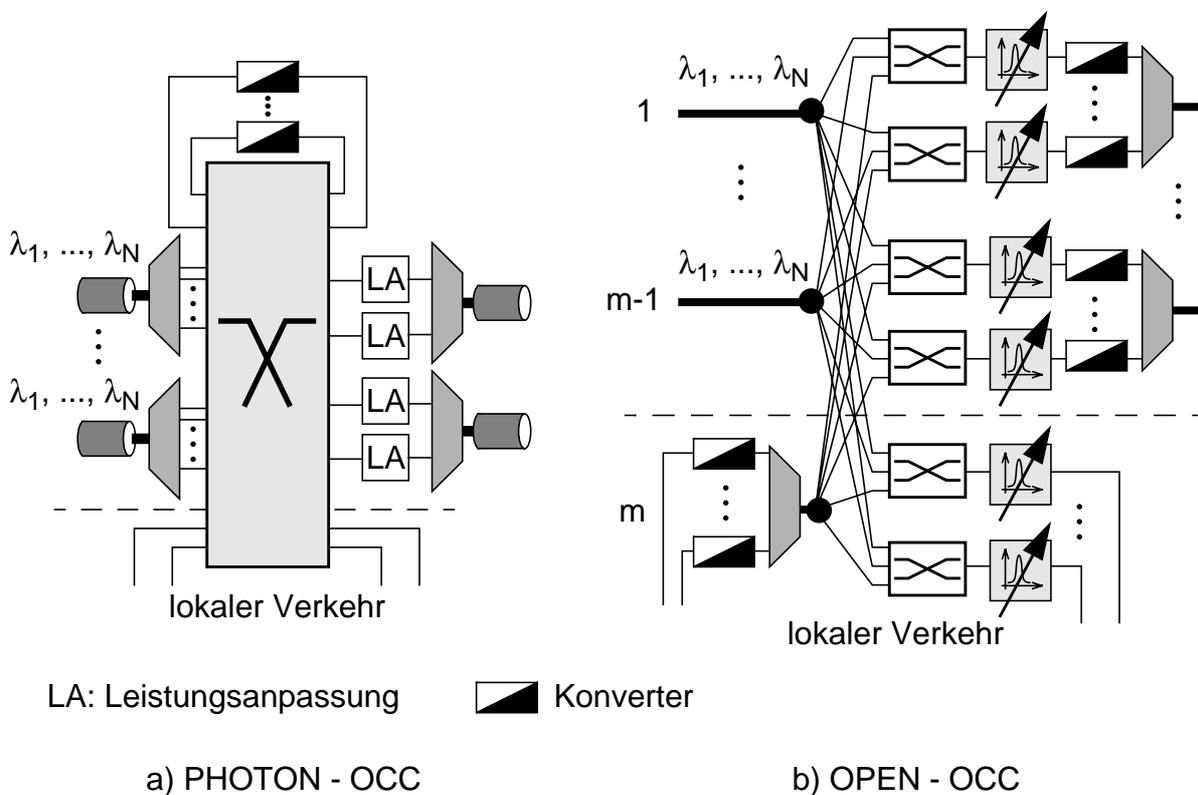
	Forschungsprojekt			
	MWTN	OPEN	PHOTON	MONET
<b>Quelle</b>	[58]	[33, 53]	[11, 33]	[88]
<b>wesentliche Merkmale der Knotenarchitektur</b>	keine Konversion; Demultiplexer als Teiler/Filter-Kombination; jeweils ein Schalter pro Wellenlänge	„Broadcast & Select“-Prinzip; einschließlich Wellenlängenkonversion	Wellenlängenkonversion optional; blockierungsfreie Raumstufe für Wellenlängenkanäle	keine Konversion; blockierungsfreie Raumstufe je Wellenlänge; zusätzlich: vereinfachter Knoten für Lokal-Netz

Zwei konkrete Beispiele aus den Feldversuchen der beiden ACTS-Projekte PHOTON und OPEN zeigt Bild 2.26 [33]. Diese beiden Vorschläge unterscheiden sich in der gewählten Realisierung der Vermittlungsstufe, was wiederum Auswirkungen auf Überwachung und Management des Knotens hat.

Beim PHOTON-OCC (Bild 2.26a) folgt auf eine Demultiplex-Stufe eine räumliche Vermittlungsstufe, die einen beliebigen Eingang (d. h. einen einzelnen Wellenlängenkanal) mit einem beliebigen Ausgang verbinden kann, ehe in einer Multiplex-Stufe die Signale wieder auf die abgehenden Fasern zusammengefasst werden. Die Vermittlungsstufe wird durch einen mechanischen Faserschalter realisiert. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, einen Pool von Wellenlängenkonvertern einzufügen, der von allen Kanälen gemeinsam genutzt werden kann. In diesem Fall muß der Faserschalter entsprechend größer ausgelegt werden. Dieses Konzept der gemeinsamen Nutzung von Konvertern wird auch als „*share-per-node*“-Konzept bezeichnet [164].

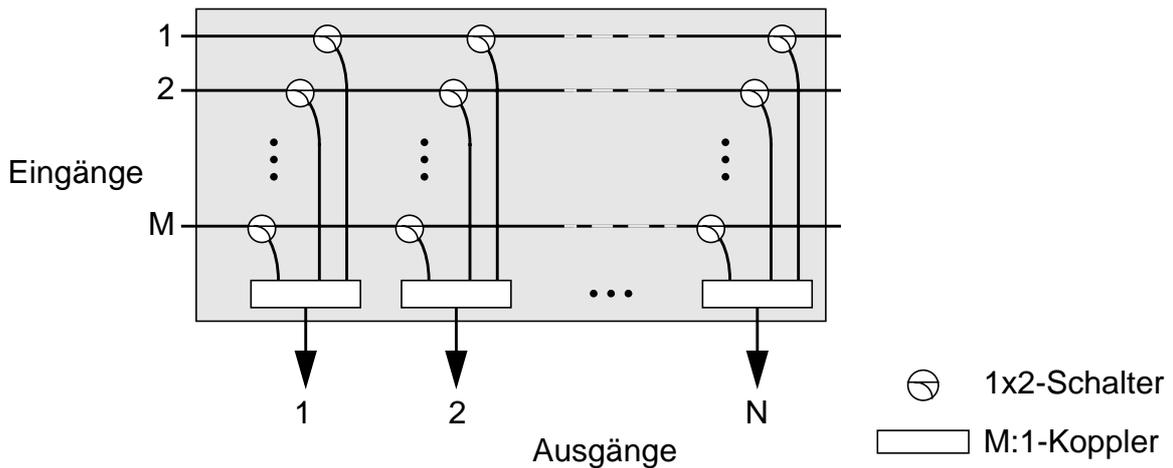
Beim OPEN-OCC (Bild 2.26b) wird ein „Broadcast & Select“-Verfahren angewendet. Dabei werden die WDM-Signale am Eingang im Verhältnis  $1 : (m \times N)$  aufgeteilt (bei  $m$  Eingängen mit jeweils  $N$  Wellenlängen). Dadurch liegt für jeden möglichen Ausgangskanal jeweils ein vollständiges Summensignal von jedem Eingang vor. Anschließend wird von jedem Eingang jeweils ein (Summen-) Signal an eine räumliche Auswahlstufe geführt. Diese lässt nur das Summensignal passieren, welches den gewünschten Kanal enthält. Dieser wird in einer Filterstufe aus dem Summensignal herausgefiltert. Abschließend folgt noch eine Konverterstufe, um jede beliebige Wellenlänge am Ausgang erhalten zu können. Vorteile dieses Konzeptes sind der modulare Aufbau, der sowohl eine leichte Skalierbarkeit des OCCs als auch eine stufenweise Erweiterung mit Wellenlängenkonvertern ermöglicht, sowie die Möglichkeit, sehr einfach Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen zu realisieren. Als Nachteil muß dafür die am Eingang erforderliche starke Aufteilung und damit Abschwächung des Signals in Kauf genommen werden.

In [139] wird eine erweiterte Knotenarchitektur vorgestellt. Die wesentliche Neuerung ist eine räumliche Vermittlungsstufe, welche nicht einzelne Wellenlängenkanäle sondern einen ganzen Wellenlängenbereich schaltet. Dadurch wird die Skalierbarkeit des Systems stark verbessert. Gleichzeitig treten nur geringe Einbußen hinsichtlich des Durchsatzes bzw. der Blockierwahrscheinlichkeit auf.



**Bild 2.26:** Beispiele für OCC-Architekturen gemäß [33]

Ein Vergleich weiterer OCC-Strukturen hinsichtlich des Aufbaus der Vermittlungsstufen, der Beeinflussung der optischen Übertragungsparameter sowie der Skalierbarkeit der Systeme findet sich in [202]. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass OCCs basierend auf sogenannten „*delivery and coupling switches*“ (siehe Bild 2.27) die besten Eigenschaften für die Anwendung in Transportnetzen bieten, da sie strikt blockierungsfrei und modular mit relativ geringen optischen Dämpfungsverlusten realisiert werden können.



**Bild 2.27:** „*delivery and coupling switch*“ gemäß [202]

Bisher ist kein den obigen OCCs entsprechendes System kommerziell in Stückzahlen erhältlich. Viele Hersteller haben aber bereits entsprechende Produkt-Ankündigungen gemacht, und die auf Prototypen basierende Durchführung von Feldversuchen bei Netzbetreibern hat bereits begonnen.

### 2.2.3 Passive optische Netze

Dieser Abschnitt enthält eine kurze Übersicht zu Netzarchitekturen, bei denen die optischen Elemente vollständig passiv und damit statisch sind (PON, *passive optical network*). Der Überblick ist nicht vollständig, weitere Beispiele finden sich in der Literatur [223, 252]. Zur Klassifizierung solcher Netze bieten sich mehrere Kriterien wie beispielsweise physikalische Topologie, Steuerung, Funktionalität oder Ressourcenbedarf an.

Einige wesentliche Topologien sind in Tabelle 2.2 mit den Hauptanwendungsgebieten und Hauptmerkmalen aufgelistet. Dabei kann es sich sowohl um physikalische Topologien als auch um sogenannte „logische Topologien“ handeln (also auf höheren Netzebenen wie beispielsweise der Wellenlängenkanal-Ebene realisierbare Topologien). Ringe und Maschen werden nicht betrachtet, da sie meist für die im vorhergehenden Abschnitt behandelten dynamischen Transportnetze mit flexiblen optischen Elementen verwendet werden.

**Tabelle 2.2:** Topologische Klassifizierung von passiven optischen Netzen

	Topologie			
	Stern	Baum	Bus	reguläre Topologie
<b>Hauptanwendungsgebiet</b>	LAN / MAN	Zugangsnetz	LAN	LAN / MAN / Rechnerverbindungsnetz
<b>Merkmale</b>	leichte Realisierbarkeit (z. B. mit passivem Koppler oder mit AWG)  Punkt-zu-Mehrpunkt (bei passivem Koppler) leicht möglich	ideal für Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen mit ausgezeichnetem Kopfelement	vergleichbar zu elektronischem Bus  zusätzliche spezifische Vorteile durch optische Übertragung (z. B. keine EMV-Probleme)	gleichartige Knoten (Realisierungs- und Kostenvorteile)  einfache Verkehrslenkung
<b>Beispiele für wichtige Fragestellungen</b>	Netzarchitektur und Medienzugriffsprotokolle für Netze mit passivem Stern [136, 207] bzw. zentralem AWG [134, 248] oder einer Kombination aus beidem [10]	Architektur und Protokolle optischer Zugangsnetze basierend auf baumförmig verketteten Stern-Netzen [81, 111]  Architektur-Design von WDM-Zugangsnetzen [187]	Design der Netzknoten und Medienzugriffsprotokoll [99, 120]	Leistungsuntersuchungen von De Bruijn-Graphen und Shuffle-Netzen [34, 242]  Netzdesign für verschiedene reguläre Topologien [244]  optimale Verbindung von Knoten in Form eines Shuffle-Netzes [30]

Eine weitere, sehr gebräuchliche Klassifizierung für optische Netze, die nicht nur für passive optische Netze anwendbar ist, unterscheidet „Singlehop“- und „Multihop“-Netze [194, 195]. Bei Singlehop-Netzen besteht zwischen jedem kommunizierenden Knotenpaar eine rein optische Verbindung. Bei Multihop-Netzen können optische Abschnitte in Zwischenknoten elektronisch verknüpft werden, um eine Verbindung zu realisieren. Tabelle 2.3 zeigt einige wesentliche Merkmale dieser beiden Netzklassen.

**Tabelle 2.3:** Passive „Singlehop-“ und „Multihop“-Netze

	<b>Singlehop-Netze</b>	<b>Multihop-Netze</b>
<b>Kurzcharakterisierung</b>	rein optische Ende-zu-Ende-Verbindungen  keine Vermittlungsfunktionalität	Vermittlungsfunktionalität in elektronischer Ebene  oft in Verbindung mit regulären Topologien
<b>Hauptvorteile</b>	einfache Realisierung, da vollständig statisch	gleichzeitig einfache optische Netzebene <i>und</i> Flexibilität
<b>zentrale Probleme und Forschungsfragen</b>	Topologie-Design für optische Ebene  MAC-Protokolle, insbesondere für Sternnetze	Design der statischen optischen Pfade  Verkehrslenkungsstrategien und -protokolle
<b>weiterführende Literatur (Auswahl)</b>	[172, 194, 228]	[29, 195, 227, 301]

Schließlich findet sich in der Literatur auch häufig eine Klassifizierung gemäß der Flexibilität von Sende- bzw. Empfangsstationen eines Netzes. Auf der Ebene einzelner Wellenlängenkanaäle können dabei sowohl Sender als auch Empfänger fest oder verstellbar sein, womit sich die vier in Tabelle 2.4 gezeigten Kombinationen ergeben. Zu jeder dieser Möglichkeiten existieren umfangreiche Untersuchungen der spezifischen Vor- und Nachteile sowie geeigneter Medienzugriffs-Protokolle [76, 194, 252].

**Tabelle 2.4:** Klassifizierung gemäß der Flexibilität von Sende- und Empfangsstationen

		<b>Empfängerseite (Receiver, R)</b>	
		<b>Fest (Fix, F)</b>	<b>Flexibel (Tunable, T)</b>
<b>Sendeseite (Transmitter, T)</b>	<b>Fest (Fix, F)</b>	FT/FR	FT/TR
	<b>Flexibel (Tunable, T)</b>	TT/FR	TT/TR

## 2.2.4 Weitere Netzarchitekturen und Netzkonzepte

Für optische Netze gibt es eine Reihe weiterer Architekturen, die sich nicht direkt einer der bisher genannten Klassen zuordnen lassen. Eine Vielzahl von Varianten ergibt sich durch die Kombination der bei passiven Netzen möglichen Strukturen mit dynamischen optischen Vermittlungselementen. Größere Beachtung haben hier vor allem reguläre Strukturen mit aktiven optischen Schaltelementen auf Wellenlängengbasis gefunden. Durch eine dynamisch konfigurierbare optische Transportebene lässt sich im Vergleich zu den im vorigen Abschnitt genann-

ten passiven Ansätzen eine erhöhte Flexibilität erreichen. Diese erlaubt sowohl die Konfigurierbarkeit von Nutzkanälen als auch flexible Schutzmechanismen in der optischen Ebene.

Eine spezielle Variante stellen sogenannte „lineare optische Netze“ (*linear lightwave network*, LLN) dar. Sie bestehen aus Knoten, die nur vollständig lineare Funktionen ausführen können [252]. Kernelemente sind sogenannte *linear divider combiner* (LDC), welche die Signale an den Eingängen kombinieren und das Summensignal in unterschiedlichen Verhältnissen auf die Ausgänge aufspalten können. Eine Trennung einmal zusammengefasster Signale ist nicht mehr möglich. Die meisten Arbeiten zu LLNs befassen sich mit den daraus resultierenden Beschränkungen für die Wegeführung der optischen Signale [25, 26, 154].

Zahlreiche weitere Netzansätze, die im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden, ergeben sich durch die Kombination einer optischen Netzebene mit einer schnellen optischen Vermittlung im Zeitbereich. Hierzu zählen auch alle Arten von optischer Paketvermittlung (*optical packet switching*, OPS). Eine Übersicht mit zahlreichen weiteren Quellen sowohl zu Netzarchitekturen als auch zu den erforderlichen Technologien findet sich beispielsweise in [273, 295]. In letzter Zeit sind unter den Namen *optical label switching* (OLS) und *optical burst switching* (OBS) zwei weitere viel versprechende Konzepte vorgestellt worden. Bei OLS werden bekannte MPLS-Konzepte [283] auf WDM-Netze übertragen [93]. Daher werden auch häufig die Begriffe *multi-protocol lambda switching* (MP $\lambda$ S) oder *generalized multi-protocol label switching* (GMPLS) verwendet. OBS wurde kürzlich von einer Reihe von Autoren vorgeschlagen und untersucht [52, 69, 213, 274, 287]. Seine Granularität liegt zwischen der von Durchschalte- und von Paketvermittlung. Dementsprechend gibt es mehrere Möglichkeiten, OBS gegenüber diesen Vermittlungsprinzipien abzugrenzen. Wesentliche Merkmale praktisch aller OBS-Konzepte sind eine zeitliche und meist auch räumliche Trennung von Nutz- und Kontrolldaten, eine variable Länge der Bursts, ein geringer Bedarf an Zwischenpuffern im Netz sowie der Verzicht auf eine explizite Zwei-Wege-Reservierung [69]. OBS lässt sich sehr effizient mit OLS-Konzepten kombinieren [212]. Hauptziel all dieser neuen Konzepte ist es, ein leistungsfähiges Transportnetz für künftige IP-Netze bereitzustellen.

## 2.3 Schutzmechanismen

In heutigen Breitbandnetzen werden von einzelnen Netzkomponenten (beispielsweise einem Vermittlungsknoten oder einer Übertragungsstrecke) große Verkehrsmengen verarbeitet. Dies gilt insbesondere für optische Transportnetze, bei denen bereits heute mehr Verkehr über einen einzelnen Link transportiert werden kann, als noch vor wenigen Jahren im nationalen Telefonnetz der USA zur Hauptverkehrsstunde insgesamt vorhanden war [252]. Parallel hierzu hat auch die gesellschaftliche und wirtschaftliche Bedeutung der Kommunikationstechnik zugenommen. Diese Entwicklungen haben dazu geführt, dass bereits eine kurzfristige Unterbrechung von Kommunikationsdiensten große Auswirkungen hat.

Deshalb hat die Bedeutung von Schutzmechanismen, die auch bei Fehlerfällen eine möglichst weitgehende Funktionsfähigkeit des Netzes erhalten sollen, stark zugenommen [7]. Die von einem Netz bereitgestellten Verfügbarkeitsgarantien stellen außerdem ein zunehmend an Bedeutung gewinnendes Unterscheidungsmerkmal zwischen konkurrierenden Netzbetreibern dar [91, 138].

### 2.3.1 Grundlagen

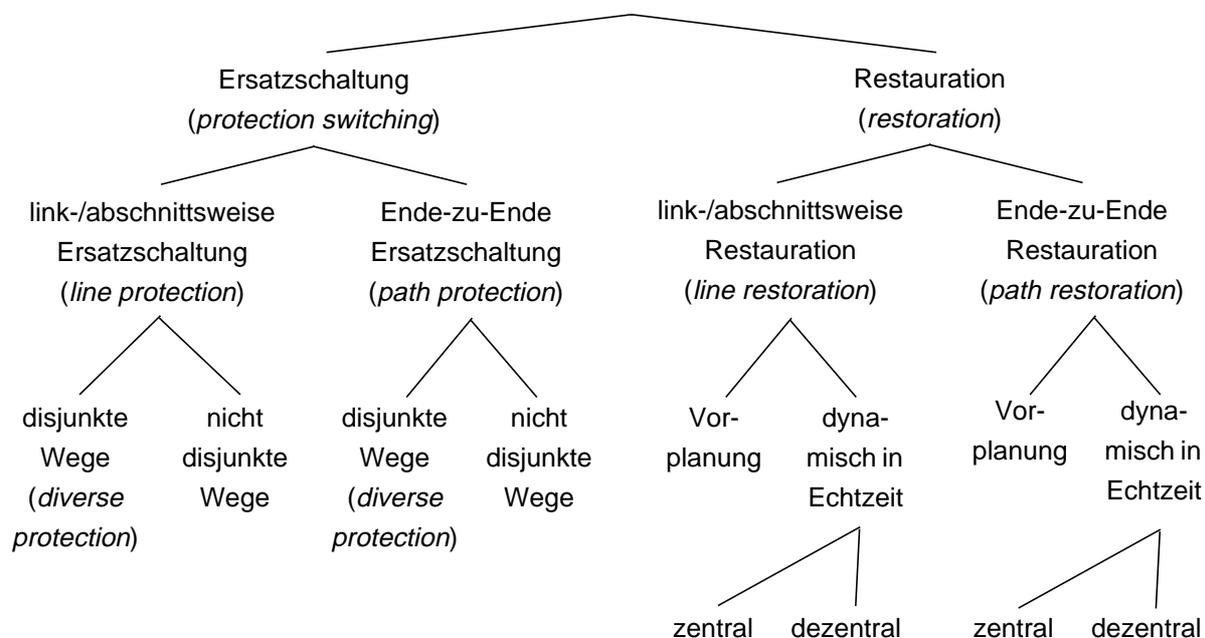
Schutzmechanismen beruhen darauf, dass in einem Netz freie Reservekapazität (*spare capacity*) vorhanden ist, die beim Auftreten eines Fehlers im Netz den betroffenen Verkehr – zumindest teilweise – übernehmen kann. Die wichtigsten möglichen Fehler sind:

- Ausfall einzelner Komponenten. Diese Fehlerursache tritt zahlenmäßig am häufigsten auf und ist deshalb entsprechend gut abgesichert [268]. Meist ist nur ein kleiner Teil des Verkehrs betroffen (beispielsweise einzelne Kanäle auf einem Link bei Ausfall des zugehörigen Sendelasers). In solchen Fällen ist ein Schutzmechanismus mit feiner Granularität vorteilhaft, der möglichst nur den betroffenen Verkehr beeinflusst. Ein wichtiges Element entsprechender Schutzmechanismen sind Redundanzkonzepte für wichtige Komponenten.
- Ausfall einer Übertragungsstrecke (Link-Ausfall). Dieser Fehler wirkt sich in heutigen Transportnetzen am häufigsten aus [268] und bewirkt eine teilweise oder vollständige Unterbrechung des Verkehrs zwischen zwei benachbarten Knoten.
- Ausfall eines Knotens. Aus Netzsicht entspricht ein Knotenausfall dem Ausfall aller an diesem Knoten angeschlossener Links sowie dem nicht vermeidbaren Verlust des an diesem Knoten entspringenden oder endenden Verkehrs.
- Logische Fehler. Zu dieser Klasse gehören alle Fehler, die bezüglich der Verbindungen in einem Netz auftreten (beispielsweise Fehlvermittlungen). Sie können meist nur auf höheren Netzebenen behoben werden.

Es werden zwei Grundklassen von Schutzmechanismen unterschieden:

- Ersatzschaltverfahren (*protection*): Den zu schützenden Arbeitskapazitäten werden die entsprechenden Reservekapazitäten bereits vor Auftreten eines Fehlers zugeordnet, so dass eine schnelle, meist ohne das Netzmanagement automatisch ablaufende Reaktion auf den Fehlerfall möglich ist.
- Restaurationsverfahren (*restoration*): Hier wird die erforderliche Reservierung der Reservekapazität erst im Fehlerfall durchgeführt. Dies bedingt höhere Umschaltzeiten als bei Ersatzschaltverfahren, erlaubt aber prinzipiell eine effiziente Nutzung aller zum Fehlerzeitpunkt im Netz vorhandenen Reservekapazitäten.

Meist werden beide Verfahren parallel eingesetzt: Ersatzschaltverfahren dienen dazu, die häufigsten und gravierendsten vorhersehbaren Fehlerfälle gut abzusichern, Restaurationsverfahren sichern zusätzlich gegen unvorhergesehene Fehler ab. Eine mögliche Klassifizierung von Schutzmechanismen in Anlehnung an [41] zeigt Bild 2.28.



**Bild 2.28:** Klassifizierung von Schutzmechanismen

Bei den Ersatzschaltverfahren gibt es jeweils mehrere Möglichkeiten zur Absicherung von Arbeits-Ressourcen durch Ersatz-Ressourcen: Mit  $m:n$  wird die Absicherung von  $n$  Arbeits-Ressourcen durch  $m$  Ersatz-Ressourcen bezeichnet. Dabei gilt meist  $m < n$ , die Ersatz-Ressourcen werden also mehrfach reserviert. Dabei wird in Kauf genommen, dass bei gleichzeitigem Ausfall mehrerer Arbeits-Ressourcen möglicherweise nicht alle geschützt werden können. Mit 1+1 wird ein Mechanismus bezeichnet, bei dem ein Duplikat des Nutzsignals auf einem Reserveweg durch das Netz geführt wird. Dieses Verfahren benötigt zwar viele Ressourcen, da keine gemeinsame Verwendung von Ersatz-Ressourcen möglich ist, bietet aber die schnellste Möglichkeit für einen Schutzmechanismus, da im Fehlerfall der Empfänger einfach auf die Signal-Kopie umschalten kann.

Ein weiteres Klassifizierungskriterium stellt die Zeit vom Auftreten eines Fehlers bis zum Abschluss des Schutzmechanismus (*Reaktionszeit*) dar. Mechanismen mit einer Reaktionszeit bis zu 50 ms werden meist den Ersatzschaltverfahren zugeordnet, langsamere Verfahren den Restaurationsmechanismen. Der Ressourcenbedarf eines Schutzverfahrens kann ebenfalls zur Klassifizierung von Verfahren dienen, wobei ein enger Zusammenhang mit der Reaktionszeit besteht: Mit sinkender Reaktionszeit steigt im Allgemeinen der Ressourcenbedarf.

### **2.3.2 Schutzmechanismen in elektronisch vermittelnden Transportnetzen**

Zum Vergleich sind nachfolgend einige wesentliche Merkmale für Schutzmechanismen in heutigen PDH-, SDH-, ATM- und IP-Netzen aufgelistet. Sind in einem Netz mehrere dieser Ebenen vorhanden, ist zusätzlich das Zusammenspiel der verschiedenen Mechanismen zu beachten. Mit dieser komplexen Fragestellung beschäftigen sich zahlreiche aktuelle Forschungsarbeiten [66].

#### **PDH**

In PDH-Netzen ist für eine Leitungsersatzschaltung ein manuelles Umschalten vorgesehen. Die Aufgabe des Netzmanagements ist es, Fehler möglichst rasch zu erkennen und zu lokalisieren. Zusätzlich gibt es automatische Ersatzschaltemechanismen, die bei entsprechender dezentraler Realisierung innerhalb einer Sekunde umschalten können sowie einen störungsfreien Mechanismus für vorherplanbare Ersatzschaltvorgänge [74]. Letzteres ist hauptsächlich für Wartungsarbeiten oder Netzerweiterungen vorgesehen.

#### **SDH**

Für SDH-Netze wurde eine ganze Reihe automatischer Ersatzschalte- und Restaurationsmechanismen definiert [291]. Dies umfasst sowohl die Definition von Protokollen als auch von Netzarchitekturen. Letztere lassen sich in die beiden Gruppen „selbsteilende Ringarchitekturen“ (mit mehreren Varianten je nach Anzahl verwendeter Fasern und uni- bzw. bidirektionaler Verkehrsführung) und „vermaschte Transportnetze“ (basierend auf digitalen Cross-Connects) unterteilen. Bei Ringen dominieren Ersatzschaltemechanismen, während Restaurationsmechanismen vor allem für vermaschte Netze geeignet sind.

Ersatzschaltemechanismen sind für zwei Ebenen definiert: die Abschnittersatzschaltung auf der Multiplexebene, für die verschiedene Redundanzkonzepte möglich sind und die in weniger als 50 ms abgeschlossen sein soll, sowie die Pfadersatzschaltung, für die das 1+1-Redundanzkonzept standardisiert wurde und die innerhalb von 250 ms (50 ms Verzögerung zur Vermeidung von Konflikten mit Abschnittersatzschaltungen und 200 ms Ausführungszeit) erfolgen soll. Insbesondere für Wartungsarbeiten ist ebenfalls ein störungsfreier Mechanismus vorgesehen [74].

Auf Grund der umfangreichen in SDH definierten Schutzmechanismen bildet diese Technologie die zentrale Schicht in den Transportnetzen vieler Netzbetreiber und die Anforderungen an künftige optische Netze werden häufig von heutigen SDH-Eigenschaften abgeleitet [137, 138, 286].

## ATM

Die Schutzmechanismen für ATM-Netze lassen sich nach [74] unterteilen in Verfahren mit zentraler Steuerung und solche mit verteilter Steuerung. Spezifisch für ATM-Netze ist die Möglichkeit, Wegewahl und Kapazitätsreservierung zu trennen. Für verteilte Verfahren gibt es die Möglichkeit zur Realisierung von Ersatzschaltungsverfahren (sowohl der Ersatzweg als auch die Reservekapazität sind vordefiniert) und von Restaurationsverfahren (die Reservierung erfolgt erst im Fehlerfall). Auch durch das PNNI-Protokoll (*private network-network interface*) wird durch die regelmäßige Verteilung aktueller Statusinformationen ein Restaurationsverfahren realisiert [17]. Alle Verfahren existieren dabei sowohl für die Ebene der virtuellen Verbindungen (*virtual connection*, VC) als auch der virtuellen Pfade (*virtual path*, VP). Wie in SDH-Netzen wurden auch für ATM-Netze verschiedene Möglichkeiten vorgestellt, eine störungsfreie Ersatzschaltung zu realisieren (siehe Übersicht in [74]).

## IP

IP-Netze sind prinzipiell sehr robust gegenüber Ausfällen im Netz. Diese Robustheit zielt allerdings nicht auf die rasche Restauration von Fehlern, dementsprechend sind auch keine spezifischen Ersatzschaltemechanismen vorgesehen. Vielmehr findet die Verkehrslenkung der einzelnen IP-Pakete abschnittsweise statt, so dass Pakete auch dann an ihr Ziel vermittelt werden können, wenn einzelne Abschnitte oder Vermittlungsknoten (Router) ausgefallen sind. Die Verkehrslenkung basiert dabei auf Tabellen in den Routern, deren Austausch in relativ großen Zeitabständen (mehrere Sekunden) erfolgt. Dadurch reagieren die IP-Verkehrslenkungsprotokolle – verglichen beispielsweise mit SDH – sehr langsam auf Fehlerfälle. In neueren Ansätzen wird versucht, durch Erweiterung der IP-Funktionalität auch schnelle Ersatzschaltemechanismen, beispielsweise mit Hilfe von MPLS (*multi-protocol label switching*), zu realisieren [19].

### 2.3.3 Schutzmechanismen in photonischen Netzen

Durch die Ähnlichkeit der Netzarchitekturen zwischen optischen Transportnetzen und SDH-Netzen ergeben sich auch für die entsprechenden Schutzmechanismen zahlreiche Parallelen [177]. Darüber hinaus gibt es für Schutzmechanismen in photonischen Netzen aber einige Besonderheiten zu beachten.

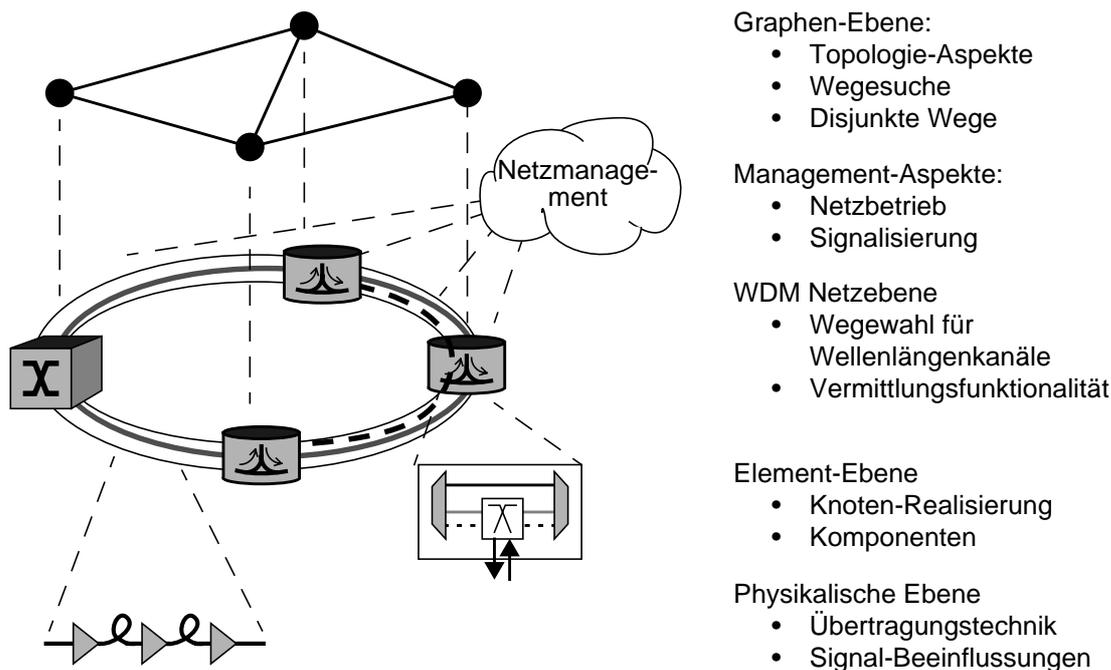
- Die einzelnen Netzelemente transportieren bzw. vermitteln sehr große Verkehrsströme. Dadurch haben Ausfälle wesentlich größere Auswirkungen, und effizienten Schutzmechanismen kommt eine höhere Bedeutung zu.
- Durch das Hinzufügen einer zusätzlichen Schicht zu den heutigen Transportnetzen ergeben sich neue Problemstellungen bezüglich der Interaktion dieser Netzschichten. Dies betrifft vor allem zwei Punkte:

- Die Schutzmechanismen der einzelnen Schichten müssen in ihrem zeitlichen Verhalten aufeinander abgestimmt sein. Insbesondere muss sichergestellt sein, dass sich bei gleichzeitiger Reaktion in mehreren Schichten auf einen aufgetretenen Fehler die eingeleiteten Maßnahmen nicht gegenseitig negativ beeinflussen.
- Die entkoppelte Betrachtung der Schichten hinsichtlich des Bedarfs an Reservekapazitäten kann zu einem unnötig hohen Ressourcen-Bedarf führen, da Reservekapazitäten höherer Schichten in den unteren Schichten erneut abgesichert werden. Die effiziente schichtenübergreifende Nutzung von Reservekapazitäten führt zu sehr komplexen Planungsproblemen.
- Falls die optische Transportebene transparente Kanäle bereitstellt, wird die Erkennung eines Fehlerfalles schwierig. Es müssen dann Mechanismen für den Transport und die Überwachung von Kontroll-Informationen vorgesehen werden, die einerseits entkoppelt vom transparenten Datenkanal arbeiten, andererseits aber eindeutige Rückschlüsse auf dort aufgetretene Fehler ermöglichen.
- Optische Netze stellen einige einfache, für Schutzmechanismen sehr hilfreiche Mechanismen bereit. So ist die Aufteilung eines Signals sehr einfach und passiv möglich, wodurch „1+1“-Schutzmechanismen leichter als bei elektronischen Netzen realisierbar sind. Außerdem ist durch die Vermittlungsmöglichkeit auf Wellenlängenkanal- oder auf Faserebene für große Verkehrsströme ein einfaches und passives Umgehen von nicht benötigten elektronischen Vermittlungsknoten realisierbar.

Für eine Einordnung der Literatur ist es hilfreich, die der jeweiligen Arbeit zu Grunde liegende Abstraktionsebene zu betrachten. Dies kann beispielsweise gemäß der in Bild 2.29 gezeigten Aufteilung geschehen [249]. Der größte Teil der bisher vorgestellten Arbeiten zu diesem Themenbereich konzentriert sich auf die auftretenden Planungs- und Dimensionierungsfragen, die zugehörigen Netz- und Knotenarchitekturen, sowie die erforderlichen Protokolle [66, 70, 91, 177, 201, 217, 218]. Die zahlreichen vorgeschlagenen Verfahren können in die im vorigen Abschnitt vorgestellte allgemeine Klassifizierung eingeordnet werden. Zusätzlich gibt es bei photonischen Netzen weitere Klassifizierungskriterien:

- Die Schutzmechanismen können auf allen drei im Standard G.872 beschriebenen Ebenen OCh, OMS und OTS arbeiten (siehe Abschnitt 2.2.1).
- Es kann unterschieden werden, ob die Verfahren auf Sende- und Empfangsseite aktive oder nur passive Komponenten erfordern [285].

In zahlreichen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass Schutzmechanismen basierend auf überlagerten Ringen gute Lösungen sowohl hinsichtlich einer einfachen Realisierbarkeit als auch hinsichtlich der effizienten Nutzung von Netzressourcen bieten können [249].



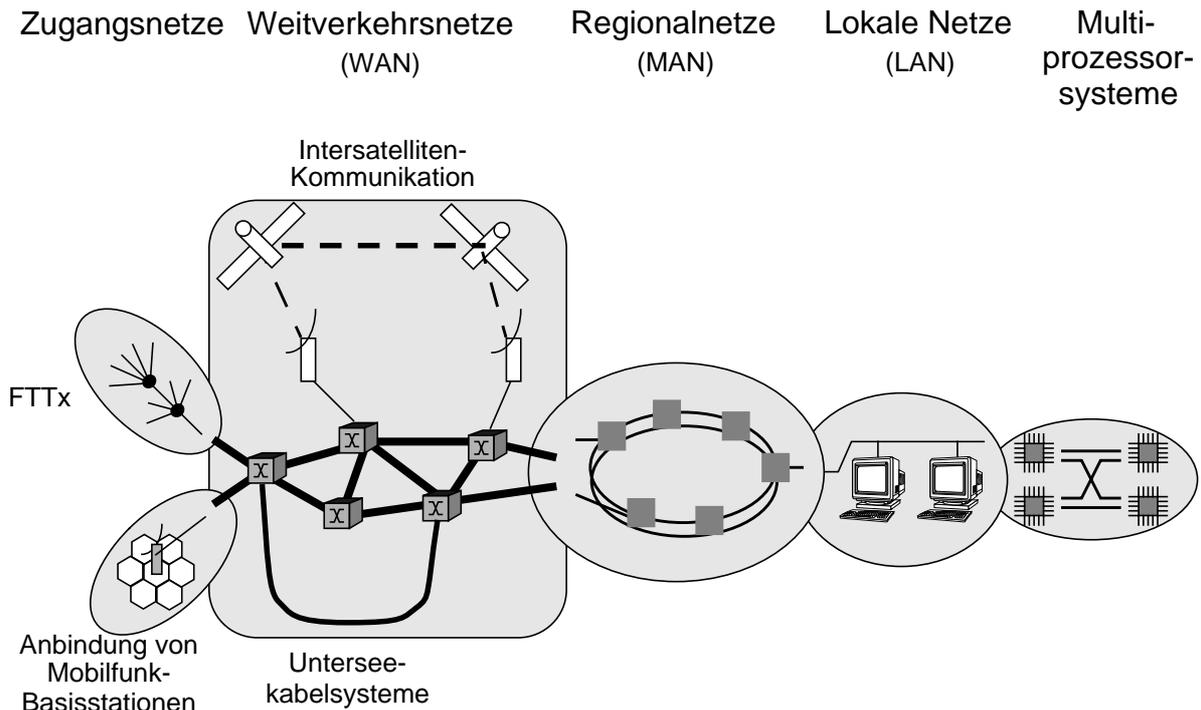
*Bild 2.29: Mögliche Abstraktionsebenen für die Betrachtung von Schutzmechanismen*

## 2.4 Aktueller Einsatz und zukünftige Entwicklungen photonischer Netze

### 2.4.1 Einsatz faserbasierter Kommunikationsnetze

Optische Technologien werden in zunehmendem Maße zur Realisierung von Kommunikationsnetzen eingesetzt. Bild 2.30 zeigt das breite Spektrum der Einsatzgebiete optischer Technologien. Augenblicklich werden vor allem Punkt-zu-Punkt-Übertragungsstrecken verwendet, in einigen Bereichen beginnt bereits der Einsatz optischer Vermittlungstechnologien.

Begonnen hat der Einsatz optischer Übertragungstechnik in den Fernnetzen. Beispielsweise werden in den USA seit 1977, bei der Deutschen Telekom seit 1982 – und inzwischen nahezu ausschließlich – faserbasierte Systeme für Weitverkehrsstrecken eingesetzt. Seit 1995 wird in den USA [229], seit 1998 in Deutschland [89] auch die WDM-Technik im Wirkbetrieb eingesetzt. Inzwischen (2000) ist die WDM-Technik bei praktisch allen Weitverkehrsnetzbetreibern in den USA und Europa etabliert [229, 254]. Auch bei Unterseekabelsystemen als speziellen Weitverkehrsnetzen mit hohen Anforderungen werden inzwischen ausschließlich optische Systeme, vermehrt auch WDM-Systeme eingesetzt. Durch die rasche Vervielfachung der Transportkapazitäten lösen Glasfasersysteme zunehmend Satellitenverbindungen als hauptsächliches Transportmedium für transozeanischen Verkehr ab [272].



**Bild 2.30:** Einsatzgebiete optischer Kommunikationsnetze

In steigendem Umfang werden optische Technologien auch für Netze geringerer Ausdehnung eingesetzt. Zurzeit nimmt insbesondere die Bedeutung von WDM für Regional- und Stadtnetze stark zu. Spezielle Lösungen basierend auf optischer Übertragung existieren auch bereits für den LAN-Bereich sowie zur Realisierung von Hochgeschwindigkeitsschnittstellen zwischen Leiterplatten bzw. Prozessoren.

Auch für Zugangsnetze bieten Glasfasersysteme große Vorteile. In der Literatur und in Feldversuchen wurden deshalb bereits eine Reihe von Konzepten vorgestellt, die sich hinsichtlich der Durchdringung mit Glasfasern in Richtung des Endteilnehmers unterscheiden. Häufig wird die Abkürzung FTTx (*fiber to the x*) verwendet, wobei x für die Stelle steht, bis zu der Glasfasern verlegt sind. Beispiele für bekannte Kürzel sind FTTC (C: *curb*, Glasfaser bis zum Bordstein), FTTB (B: *building*, Glasfaser bis zum Gebäude) oder FTTH (H: *home*, Glasfaser bis in die Wohnung).

Allerdings setzen sich im Zugangsbereich optische Systeme aus zwei wesentlichen Gründen nur verzögert durch. Der erste Grund ist ein wirtschaftlicher Aspekt: Der Ersatz heute bereits vorhandener Anschlussleitungen ist sehr teuer, während gleichzeitig die zu erwartenden Einnahmen bei einem Endteilnehmer relativ gering sind. Der zweite, technische Grund liegt in der großen Steigerung der erzielbaren Übertragungsrate von elektronischen, auf vorhandenen Kupfer- oder Koaxkabeln basierenden Zugangstechniken [84]. Dadurch verzögert sich für viele Anwendungen die Notwendigkeit, faserbasierte Systeme einzusetzen. Trotzdem zeigen

eine Reihe von Vorhaben großer Netzbetreiber, beispielsweise der Deutschen Telekom [121] oder der japanischen NTT [294], dass mittelfristig zunehmend optische Techniken im teilnehmernahen Bereich zum Einsatz kommen werden.

Daneben gibt es in zahlreichen momentan laufenden und kürzlich abgeschlossenen großen Forschungsprogrammen weltweit zahlreiche Projekte zu photonischen Netzen (z. B. PHOTONIK I/II und KomNet in Deutschland; RACE, ACTS, COST und IST auf europäischer Ebene [32, 77, 119]; ONTC und MONET in den USA [88, 284]). Nachdem bis vor einigen Jahren vor allem technologische Fragestellungen im Mittelpunkt standen, gewinnen seither vermehrt System- und Netzfragen an Bedeutung. Dies zeigt sich auch an der Verlagerung des Schwerpunktes der wesentlichen Sonderveröffentlichungen zu diesem Themengebiet [3, 4, 5, 6, 7].

## 2.4.2 Absehbare technologische Weiterentwicklungen

Bei allen zurzeit eingesetzten Technologien für optische Netze zeichnen sich auch für die nahe Zukunft Verbesserungen und Weiterentwicklungen ab. So wird sowohl die Bitrate einzelner Wellenlängenkanäle als auch die Anzahl gleichzeitig auf einer Faser transportierbaren Wellenlängen weiter erhöht werden. Dazu tragen Weiterentwicklungen bei Sendelasern (schmalere Sendespektren), bei optischen Verstärkern (größere Verstärkungsbereiche) und bei Glasfasern (besseres Dämpfungs- und Dispersionsverhalten) bei. Eine Abschätzung der bereits in naher Zukunft in Produkten zu erwartenden Systemleistungen erlauben die aktuellen Laborergebnisse. So wurde beispielsweise bereits eine Übertragungsrate von 160 Gbit/s über eine einzelne Wellenlänge erreicht [208], mit mehreren WDM-basierten Systemen wurden im Labor bereits mehr als 1 Tbit/s Gesamtübertragungsraten über eine Faser realisiert [61], die Anzahl der Kanäle pro Faser konnte bei Kanalraten im Bereich oberhalb 2 Gbit/s bereits auf über 100 erhöht werden [44], und die mit einem Terabit-System überbrückbare Entfernung konnte bereits auf 10.000 km gesteigert werden [196]. Dabei ist zu beachten, dass solche „Rekorddaten“ praktisch auf jeder bedeutenden Konferenz sofort wieder übertroffen werden.

Neben den genannten Weiterentwicklungen der WDM-Technologie wurden inzwischen auch mit der Übertragung von Solitonen große Erfolge erzielt<sup>5</sup>. Bei Solitonen handelt es sich um Pulse, deren Form sich längs der Übertragungstrecke nicht ändert. Dies kann bei optischer Übertragung durch die Kompensation der Dispersion durch die Selbstphasenmodulation des Kerr-Effektes erreicht werden [121]. Der Kerr-Effekt beschreibt die Änderung der Brechzahl in Abhängigkeit der Lichtfeldstärke. Durch diese Abhängigkeit ist auch die Phasengeschwin-

5. Die Bezeichnung „Soliton“ ist ein Kunstwort abgeleitet aus dem englischen Begriff einer einzelnen stehenden Welle (*solitary wave*) und der gängigen Endung „on“ für Elementarteilchen (z. B. *Elektron*, *Proton*, *Photon*), da sich eine Solitonen-Welle ähnlich wie ein Elementarteilchen verhält. Solitonen wurden erstmals im Jahre 1834 von J. Russell als Wasserwellen in einem Kanal beobachtet und 1973 von A. Hasegawa für die optische Übertragung in Glasfasern vorhergesagt [197].

digkeit von der Feldstärke abhängig: Die Pulsspitze breitet sich langsamer aus als die Pulsflanken. Diese spektrale Änderung des Pulses (*chirp*) kann nun die Dispersion einer Faserstrecke unter bestimmten Bedingungen an Pulsform und Signalleistung kompensieren.

Aus der genannten Feldstärkeabhängigkeit wird deutlich, dass ideale Solitonen nur in dämpfungsfreien Systemen auftreten können. Für praktische Systeme hat sich allerdings gezeigt, dass für Pulsform und mittleren Signalpegel gewisse Bereiche toleriert werden können und trotzdem stabile Solitonen entstehen. In Solitonen-Experimenten konnten inzwischen bereits Übertragungsraten auf einem Einzelkanal von 80 Gbit/s [108] sowie Übertragungsraten von über 1 Tbit/s auf einer Glasfaser über eine Entfernung von 1000 km [103] erreicht werden. Außerdem wurden – bei geringeren Übertragungsraten – bereits sehr große Entfernungen bis zu 200 000 km überbrückt [112].

Auch bei den optischen Vermittlungssystemen sind starke Verbesserungen zu erwarten. Dies gilt sowohl für opto-mechanische Komponenten als auch für integrierte Bausteine (*opto-electronic integrated circuit*, OEIC). Durch diese Entwicklung kann mittelfristig auch die zeitliche Vermittlung im optischen Bereich eine wirtschaftliche Alternative darstellen. Hierzu wurden bereits zahlreiche Konzepte für eine rein optische Paketvermittlung in der Literatur vorgestellt und untersucht (siehe beispielsweise [105, 186, 273, 295]).

Als nächster Schritt hin zu Netzen mit optischer Vermittlung wird zur Zeit an der Erhöhung der Flexibilität in optischen Netzen gearbeitet. Hauptziel entsprechender Lösungen ist es, effiziente Netze für den Transport von IP-Verkehr mit Hilfe optischer Technologien zu erhalten (sogenannte „*IP over WDM*“-Netze). Neben der Verbesserung optischer Vermittlungstechnologie ist die Realisierung einer verteilten Netzsteuerung in optischen Netzen eine wesentliche Aufgabe hierbei. Dies kann beispielsweise durch die Erweiterung von MPLS-Protokollen für den Einsatz in optischen Netzen geschehen (GMPLS, *generalized multi-protocol label switching* [21, 27, 72]). Hierdurch wird die Voraussetzung für eine Konvergenz von Datennetzen und optischen Transportnetzen geschaffen. In diesem Kontext sind noch zahlreiche Fragen, beispielsweise hinsichtlich der Netz- und Knotenarchitektur, der Zuordnung von Funktionen zu den einzelnen Netzschichten und der optimalen Wahl von Signalisier- und Verkehrslenkungsprotokollen zu klären [13, 35, 46, 71, 94, 214, 298].

In der Summe können all diese Entwicklungen dazu führen, dass langfristig die Vision einer umfassenden optischen Kommunikations-Infrastruktur Wirklichkeit wird. Diese könnte einige im Vergleich zu heutigen Netzen revolutionäre Eigenschaften besitzen: Die verfügbare Bandbreite stellt – zumindest in einigen Netzbereichen – keinen Engpass mehr dar, die Netze stellen eine gegenüber Dienstanforderungen und Datenformaten weitgehend transparente Transportplattform dar, und die Netzarchitektur ist stark vereinfacht, insbesondere hinsichtlich der Anzahl der funktionalen Schichten.

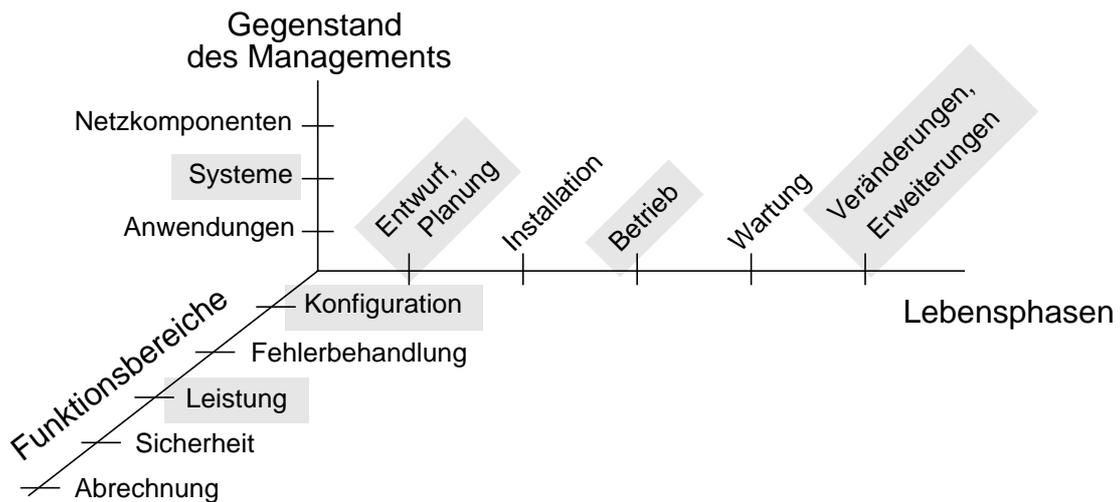
# Kapitel 3

## Netzplanung und Verkehrslenkung

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht zu den Themenbereichen Netzplanung und Verkehrslenkung. Mit dem Begriff „Verkehrslenkung“ wird die Aufgabe bezeichnet, für eine Verkehrsanforderung einen Weg vom Quellknoten bis zum Zielknoten zu finden. Abschnitt 3.1 skizziert einleitend wesentliche Aspekte des Netzbetriebs und des Netzmanagements und zeigt die zentrale Rolle auf, welche die Verkehrslenkung dabei einnimmt. Anschließend werden im Abschnitt 3.2 Ziele und Verfahren für die Planung von Netzen vorgestellt. Diese Verfahren dienen später zur Dimensionierung der Beispielnetze für die Studien in dieser Arbeit. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf der Einführung in die Verkehrslenkung. Dazu werden im Abschnitt 3.3 die Grundlagen vorgestellt, was insbesondere eine Definition wichtiger Begriffe sowie eine Klassifikation von Verfahren der Verkehrslenkung beinhaltet. Abschnitt 3.4 schließlich gibt einen Überblick über heute gebräuchliche Verfahren der Verkehrslenkung für unterschiedliche Netztechnologien.

### 3.1 Aspekte des Netzbetriebs

Die wesentlichen Aspekte des Netzbetriebs lassen sich durch eine Darstellung der Aufgaben des Netzmanagements wie in Bild 3.1 gezeigt erfassen [225]. Die gezeigte Strukturierung hat sich etabliert, obwohl häufig die einzelnen Bereiche nicht vollständig voneinander getrennt werden können. Von der ITU-T wurden eine Reihe von Standards veröffentlicht, welche die Funktionen und teilweise die Protokolle für diese Bereiche näher festlegen [219]. Neben diesen Vorschlägen hat insbesondere das für das Management von TCP/IP-Netzen entworfene SNMP-Protokoll (*simple network management protocol*) große Bedeutung erlangt. Dabei hat sich der Begriff SNMP-Management etabliert, obwohl SNMP ursprünglich nur ein Protokoll für den Informationsaustausch zwischen Netzelementen und einem Managementsystem definierte [251]. Im Bereich optischer Netze hat die Standardisierung des Netzmanagements inzwischen ebenfalls begonnen, da die große Bedeutung herstellerübergreifender Festlegungen erkannt wurde [36, 173, 269].



**Bild 3.1:** Darstellung der Aufgaben des Netzmanagements (nach [225])

Die in dieser Arbeit näher betrachtete Verkehrslenkung ist für viele der im Bild 3.1 gezeigten Managementaufgaben von Bedeutung. Sie spielt hauptsächlich für die Lebensphasen „Entwurf, Planung“ und „Betrieb“ sowie teilweise auch für Netzerweiterungen, für die ebenfalls Planungsarbeiten durchzuführen sind, eine Rolle. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt in dieser Arbeit auf der Verkehrslenkung für den fehlerfreien Netzbetrieb. Diese Verfahren können entsprechend erweitert werden, um auch beim Betrieb im Fehlerfall die Netzleistung zu optimieren. Hinsichtlich der Funktionsbereiche ist die Verkehrslenkung insbesondere Bestandteil des Konfigurationsmanagements, das sich allgemein mit der Verwaltung von Ressourcen und Diensten beschäftigt, und des Leistungsmanagements, das eine möglichst effiziente Nutzung dieser Ressourcen zum Ziel hat. Wird die dritte in Bild 3.1 gezeigte Achse betrachtet, so ist die Verkehrslenkung vor allem auf der Systemebene einzuordnen, da Vermittlungssysteme direkt beeinflusst werden. Dabei gibt es auch starke Wechselwirkungen mit den beiden anderen Bereichen „Netzkomponenten“ und „Anwendungen“: Einerseits stellen diese wichtige Eingangsgrößen für die Verkehrslenkung dar, andererseits werden sowohl Anwendungen als auch Netzkomponenten durch die Verkehrslenkung wiederum beeinflusst.

## 3.2 Ziele und Methoden der Netzplanung

Das Ziel einer Netzplanung ist es, ein Kommunikationsnetz so zu gestalten, dass alle Anforderungen sowohl von Seiten der Kunden als auch des Netzbetreibers erfüllt sind und gleichzeitig eine optimale Lösung hinsichtlich eines bestimmten Kriteriums erreicht wird. Sehr häufig stellen die Kosten einer Netzlösung das wesentliche Optimierungskriterium dar. Während die Anforderungen der Kunden auf die günstige Bereitstellung leistungsfähiger Kommunikationsdienste zielen, haben Netzbetreiber oft ein sehr breites Anforderungsspektrum. Hierzu können beispielsweise Lösungen für langfristige Infrastruktur-Entscheidungen, stufenweise Aus-

baupläne für die Netzressourcen, die kurzfristige Einsatzplanung für die Mitarbeiter oder auch Maßnahmen für betriebliche Veränderungen zählen. Zusätzlich zu dieser Planung realer Netze werden Methoden der Netzplanung auch zur Untersuchung hypothetischer Szenarien angewandt, beispielsweise um zukünftige Netztechnologien oder Dienste und deren Auswirkungen evaluieren und mit bestehenden Lösungen vergleichen zu können.

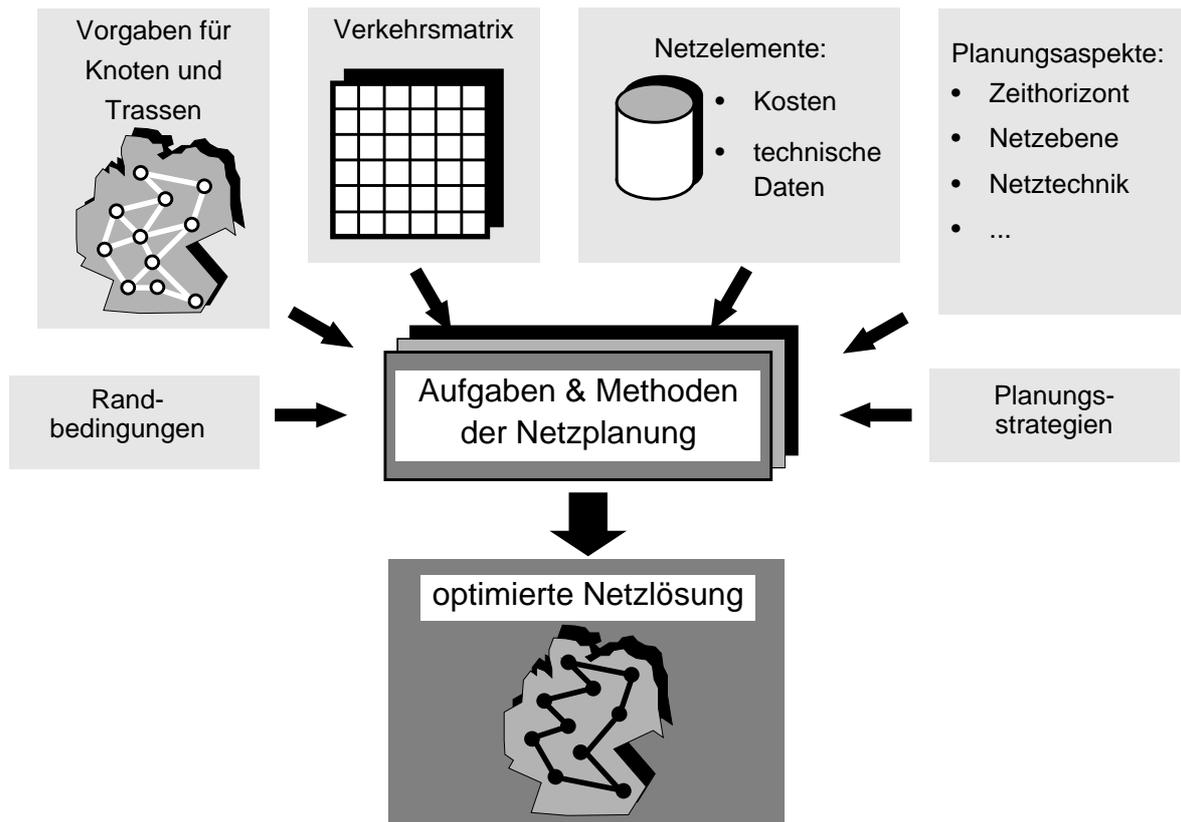
Neben diesen vielschichtigen Anforderungen an die Netzplanung sind auch die auftretenden Teilprobleme innerhalb eines Planungsprozesses sehr komplexer Natur. Aus diesen Gründen sind zur Lösung eines Planungsproblems zahlreiche unterschiedliche Verfahren erforderlich, die häufig stark rechnerunterstützt sind. Nachfolgend werden zuerst die wichtigsten Aufgaben beschrieben (Abschnitt 3.2.1) und dann ein kurzer Überblick zu zentralen Planungsmethoden gegeben (Abschnitt 3.2.2). Trotz der Vielzahl weit entwickelter rechnergestützter Planungsverfahren besteht Konsens darüber, dass aufwändige Planungsprozesse auf absehbare Zeit nicht vollständig automatisierbar sind, sondern der Rolle des menschlichen Experten weiterhin eine zentrale Bedeutung zukommt [82].

### **3.2.1 Ablauf und Hauptaufgaben der Netzplanung**

Ein umfassender Planungsprozess muss zahlreiche Parameter berücksichtigen, welche die Eingangsgrößen des betrachteten Planungsproblems darstellen. Bild 3.2 zeigt schematisch, wie bei der Netzplanung aus einer Vielzahl von Eingabedaten unter Beachtung zusätzlicher Randbedingungen durch die Lösung von Teilaufgaben mittels spezifischer Methoden schließlich eine optimale Netzlösung generiert wird. Zu den Eingangsgrößen zählen ganz wesentlich Informationen über mögliche Standorte von Netzknoten sowie über Trassen als den möglichen Wegen zwischen diesen Knoten. Sehr häufig wird die Menge der möglichen Lösungen durch diese Vorgaben bereits stark eingeschränkt.

Eine weitere wichtige Eingangsgröße ist die Verkehrsmatrix, welche die zu erfüllenden Verkehrsanforderungen repräsentiert. In ihrer Grundform ist diese Matrix zweidimensional und beschreibt die Verkehrsanforderungen für jedes Knotenpaar im Netz. Meist werden die Anforderungen der sogenannten „Hauptverkehrsstunde“ verwendet, deren Festlegung sich nach dem Maximum des Verkehrs-Mittelwertes über einen bestimmten Zeitraum richtet [288]. Mehrdimensionale Matrizen ergeben sich, falls mehrere Dienste unterschieden werden oder falls mehrere Hauptverkehrsstunden berücksichtigt werden.

Ebenfalls von zentraler Bedeutung sind Daten über die zu verwendenden Netzelemente. Der Detaillierungsgrad dieser Informationen hängt stark vom jeweiligen Einsatzgebiet ab: Während beispielsweise für eine Einsatzplanung zur Installation eines Netzausbaus sehr genaue Daten erforderlich sind, liegen für szenarienbasierte Abschätzungen künftiger Technologien oft nur relativ abstrakte Funktionsbeschreibungen vor.

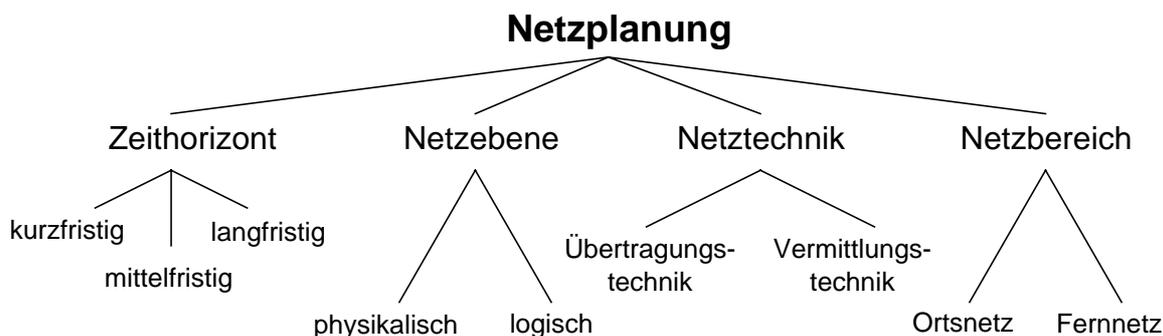


**Bild 3.2:** Allgemeines Schema einer Netzplanung

Schließlich sind für die Planung eine Reihe weiterer Aspekte fest zulegen. Einige Beispiele zeigt Bild 3.3. Planungsverfahren können sich auf unterschiedliche zeitliche Horizonte beziehen, wobei abhängig vom Zeithorizont unterschiedliche Verfahren und Modelle eingesetzt werden müssen. Für klassische Fernsprechnetze erfolgte typischerweise eine Einteilung in folgende drei Bereiche [288]:

- kurzfristig (wenige Wochen bis 1 Jahr)
- mittelfristig (einige Jahre)
- langfristig (mehr als 5-10 Jahre)

Auf Grund der inzwischen wesentlich höheren Dynamik der Veränderungen im Bereich der Kommunikationsnetze haben sich diese Zeiträume jeweils stark verkürzt. Zahlreiche Netzbetreiber bezeichnen heute bereits Planungen über den Zeitraum eines Jahres als langfristig, für längere Zeiträume werden oft gar keine genauen Planungen mehr durchgeführt. Zunehmende Bedeutung gewinnt in diesem Zusammenhang die sogenannte „Mehr-Phasen-Planung“ (*multi period planning*), bei der eine Netzevolution über mehrere zeitlich aufeinander folgende Entwicklungsstufen hinweg geplant wird [178, 211]. Dadurch wird es leichter möglich, die Planung mit fortschreitender Zeit stufenweise an die neuen Gegebenheiten anzupassen.



**Bild 3.3:** Beispiele für wichtige Aspekte innerhalb der Netzplanung

Um die Komplexität des Planungsprozesses zu reduzieren, wird bisher meist eine getrennte Planung der physikalischen und der logischen Netzebene durchgeführt. Die physikalische Ebene umfasst Übertragungsstrecken und Vermittlungseinrichtungen, die logische Ebene umfasst logische Verbindungen zwischen Netzelementen (Vermittlungsstellen, Teilnehmeranschlüssen, Netzkoppeleinheiten), die mittels der zu Grunde liegenden physikalischen Ebene realisiert werden. Ebenfalls zur Vereinfachung des Planungsproblems wird bei den für bisherige Fernsprechnetze eingesetzten Verfahren die Planung für Übertragungs- und Vermittlungssysteme jeweils getrennt durchgeführt. Außerdem wird das Gesamtnetz in Teilbereiche aufgeteilt, wobei sich vor allem eine Unterscheidung von Ortsnetzen (mit der Planung der Teilnehmeranschlussleitungen) und Fernnetzen (mit der Verbindung von Ortsnetzen sowie der internationalen Anbindung) etabliert hat [288].

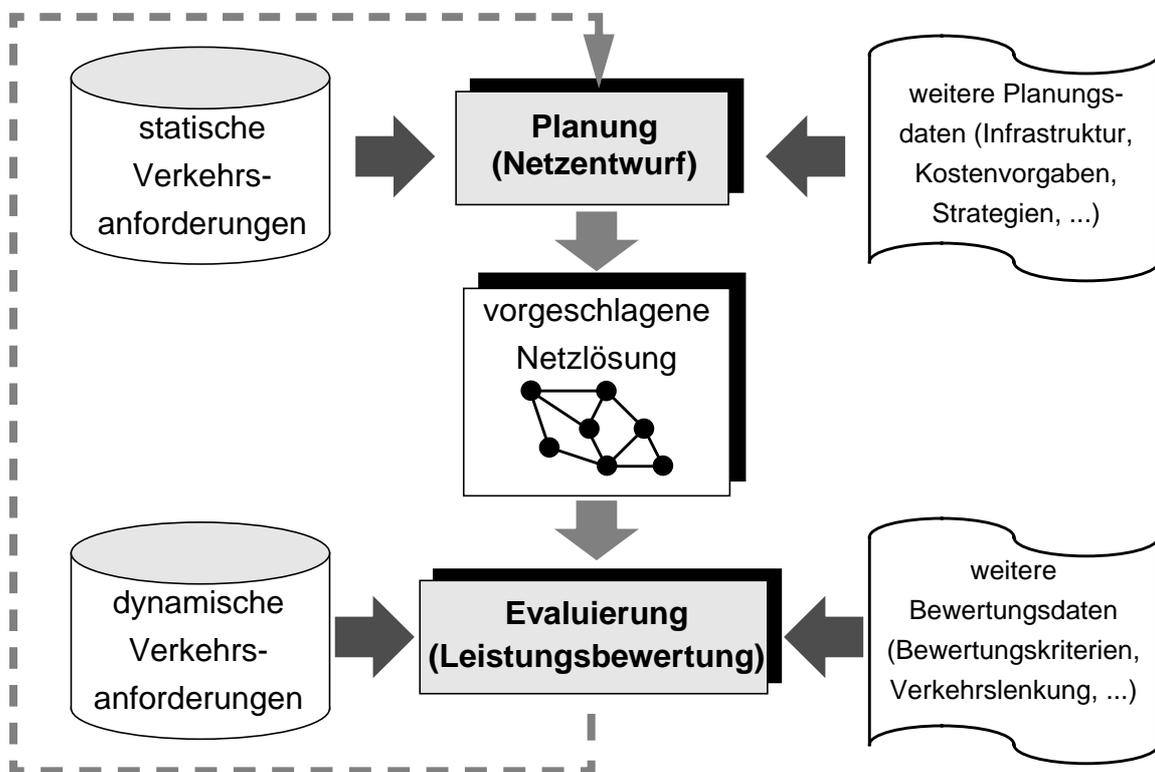
Beim Entwurf einer Netzlösung sind meist weitere Randbedingungen zu beachten. Diese können beispielsweise durch den Netzbetreiber selbst oder aber durch rechtliche oder regulatorische Vorgaben gegeben sein. Solche Randbedingungen ergeben sich beispielsweise aus den erlaubten Auswirkungen von Fehlern bzw. Systemausfällen auf das Netzverhalten. Dies legt die erforderlichen Schutzmechanismen im Netz fest und stellt damit eine wesentliche Eingangsgröße für den Planungsprozess dar. Außerdem können bei der Planung unterschiedliche Strategien verfolgt werden. Einfache Beispiele sind die Suche nach einer möglichst kostengünstigen Netzlösung oder aber die Suche nach einer möglichst gut gegen Ausfälle abgesicherten Netzlösung.

Unter Beachtung all dieser Parameter ist dann die Planungsaufgabe zu lösen. Auf Grund der hohen Komplexität ist in den meisten Fällen eine Zerlegung in mehrere Teilaufgaben erforderlich. Diese werden dann unter Einsatz verschiedener Methoden gelöst, von denen wichtige Vertreter im Abschnitt 3.2.2 beschrieben werden. Das Ziel ist es, durch Lösen dieser Teilaufgaben schließlich eine gültige (d. h. alle Randbedingungen einhaltende) und optimale Netzlösung für das gegebene Problem zu erhalten. Da dies in der Praxis selten in einem Durchgang möglich ist, muss iterativ vorgegangen werden. Dabei wird die gewonnene Lösung jedes Iterations-

schritts detailliert bewertet, und die Erkenntnisse hieraus fließen in den nächsten Planungsschritt ein.

Unter Verkehrsgesichtspunkten bietet sich eine Unterteilung des Planungsprozesses in zwei Phasen an (Bild 3.4). In einer ersten Phase wird mit statischen Angaben zu den erwarteten Verkehrsanforderungen gearbeitet. Das Ergebnis dieser Phase ist ein Lösungsvorschlag einschließlich der erforderlichen Dimensionierung der Netzressourcen. Viele Veröffentlichungen zum Thema Netzplanung beschäftigen sich mit Verfahren für diese Phase. Allerdings reichen statische Verkehrsannahmen für die Konstruktion einer optimalen Netzlösung meist nicht aus, da in praktisch allen Netzen im realen Betrieb schwankende Verkehrswerte (im Folgenden auch kurz *dynamischer Verkehr* genannt) auftreten. Aus diesem Grund wird in einer zweiten Phase die vorgeschlagene Netzlösung unter Berücksichtigung des dynamischen Verkehrsverhaltens genauer untersucht. Nur für sehr einfache Planungsprobleme können beide Phasen integriert werden: Voraussetzung ist, dass sich für die Leistungsbewertung einfache, analytische Beschreibungen ableiten lassen und damit die Bewertung in die Entwurfsphase integriert werden kann.

Heutige Netze mit ihrer Vielfalt an Technologien, Diensten und Betriebsaspekten wie beispielsweise einer leistungsfähigen Verkehrslenkung lassen sich kaum mehr integriert behandeln. Deshalb wird die zweite Phase meist getrennt und unter Verwendung rechnergestützter simulativer Bewertungsverfahren durchgeführt. Wie in Bild 3.4 durch die gestrichelte Linie

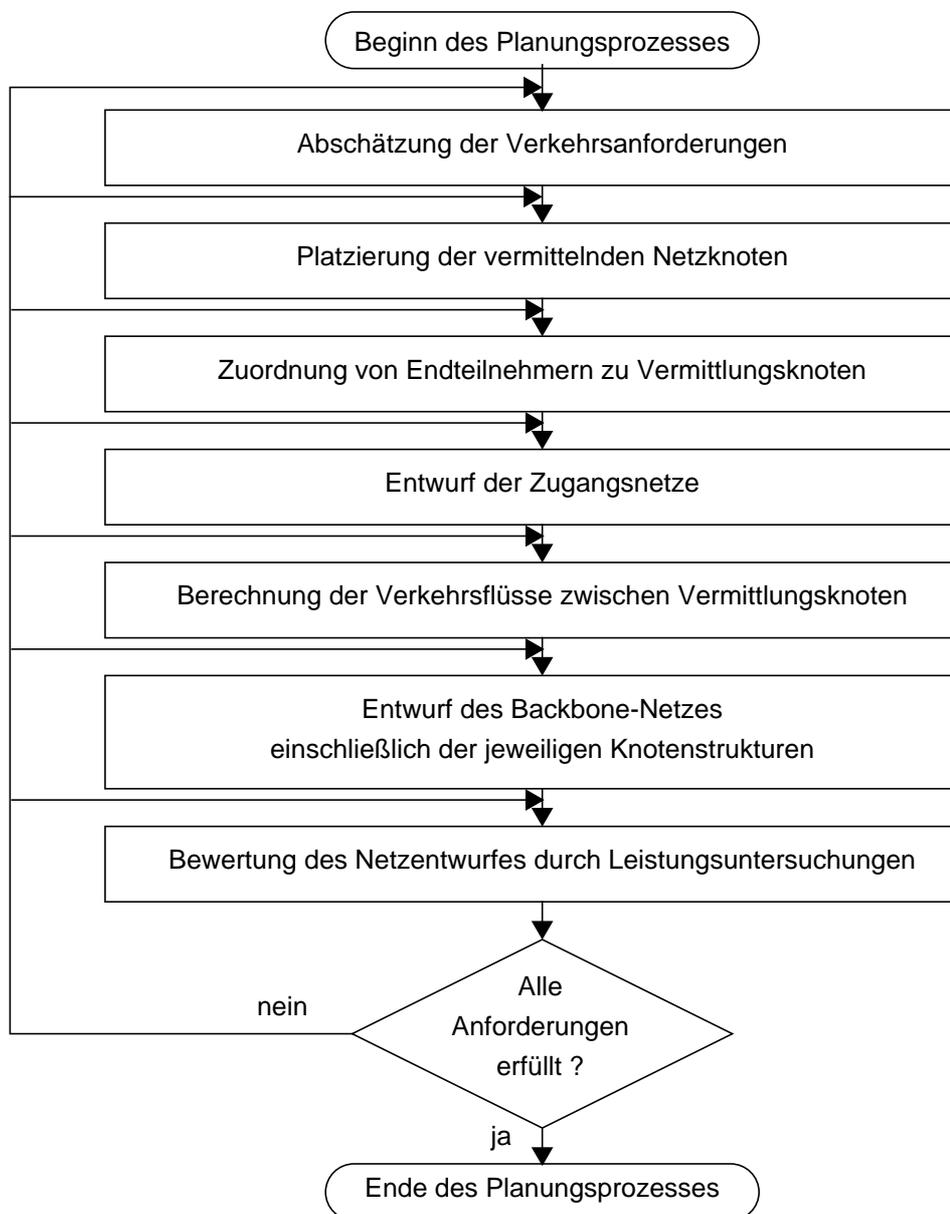


**Bild 3.4:** Unterteilung des Planungsprozesses in zwei Hauptphasen

angedeutet, ist es dabei für reale Probleme häufig erforderlich, beide Phasen mehrfach iterativ zu durchlaufen.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf detaillierten Untersuchungen innerhalb der zweiten Phase. Um aber sinnvolle Szenarien für diese Untersuchungen zu erhalten, ist auch eine Durchführung der ersten Phase erforderlich. In dieser wird allerdings nur ein Teil der bisher besprochenen Aspekte berücksichtigt, um die Komplexität des Gesamtproblems zu beschränken.

Die während der Entwurfsphase zu lösende Planungsaufgabe ist – außer für stark vereinfachte Beispiele – zu schwierig, als dass sie in ihrer Gesamtheit in einer Stufe gelöst werden könnte.



**Bild 3.5:** Wichtige Teilaufgaben innerhalb der Netzplanung

Statt dessen wird die Gesamtaufgabe in eine Reihe einzelner Schritte zerlegt, die für sich genommen immer noch sehr anspruchsvoll sind: Viele dieser Teilprobleme zählen zum Bereich der NP-vollständigen Probleme (*NP-complete*, *NP: non-deterministic polynomial-time problem*), für die keine Lösung in polynomial beschränkter Zeit bekannt ist [87]<sup>1</sup>. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit zeigt Bild 3.5 in Anlehnung an [49] einige dieser Aufgaben. Zu ihrer Lösung sind Verfahren aus unterschiedlichsten Methodengebieten erforderlich. Einige wichtige Vertreter werden im folgenden Abschnitt näher beschrieben.

### 3.2.2 Methoden der Netzplanung

Um die im vorigen Abschnitt beschriebenen Aufgaben innerhalb eines Netzplanungsprozesses lösen zu können, sind zahlreiche Methoden aus der Verkehrstheorie, der Graphentheorie, dem Gebiet „Operations Research“ oder der sogenannten „Künstlichen Intelligenz“ erforderlich. Die nachfolgende Übersicht beschreibt nur eine Auswahl, weiterführende Informationen finden sich in der Literatur [95, 117, 288].

#### 3.2.2.1 Modellierung

Um Planungsaufgaben effizient lösen zu können, ist eine sinnvolle Modellbildung Voraussetzung [101]. Die Grundschwierigkeit hierbei ist es, einerseits möglichst einfache Modelle zu finden, um die Komplexität der zu lösenden Probleme zu reduzieren, andererseits aber keine wesentlichen Eigenschaften zu vernachlässigen. Während in späteren Planungsphasen der Rechnerunterstützung eine zentrale Bedeutung zukommt, wird für eine optimale Modellierungsphase vor allem Expertenwissen benötigt.

Modellierung ist für verschiedene Bereiche erforderlich. Für die Netzelemente sind funktionale Modelle zu erstellen, die mit zunehmendem Detaillierungsgrad der Planung verfeinert werden können. Zur Berücksichtigung von topologischen Aspekten spielen Graphenmodelle und Algorithmen auf Graphen eine zentrale Rolle. Schließlich sind auch verkehrstheoretische Modelle zur Beschreibung der zeitlichen Abläufe in einem Netz erforderlich. Auf die letzten beiden Punkte wird im Folgenden etwas näher eingegangen:

- Die Abbildung des zu planenden Netzes in ein Graphenmodell ist eine zentrale Aufgabe innerhalb der Netzplanung. Häufig werden hierzu die Übertragungsabschnitte als Kanten und die vermittelnden Netzelemente als Knoten des Graphen dargestellt. Die einzelnen Elemente können mit einem sogenannten *Gewicht* versehen werden, welches beliebige Eigen-

---

1. Solche Probleme können entweder mit einem Algorithmus exakt gelöst werden, dessen Anzahl von Rechenschritten exponentiell mit der Problemgröße steigt, oder aber durch folgendes zweistufige Vorgehen ohne Garantie auf das Erreichen des globalen Optimums: Mit einem nicht-deterministischen Algorithmus werden Lösungen gefunden, deren Gültigkeit dann in polynomial beschränkter Zeit überprüft werden kann.

schaften wie beispielsweise eine geographische Entfernung oder monetäre Kosten repräsentieren kann. Ist ein entsprechendes Modell vorhanden, können mit den aus der Graphentheorie bekannten Ergebnissen und Algorithmen zahlreiche Teilaufgaben gelöst werden [142]. Hierzu zählen Verfahren zur Bildung von Knotengruppen (*clustering*) bzw. zur Partitionierung von Graphen, zur Erzeugung eines Baumes zur vollständigen Abdeckung aller Knoten mit minimalem Gesamtgewicht aller Kanten (*minimum spanning tree*, überspannender Baum), oder zur Bestimmung von Wegen innerhalb einer Gruppe von Knoten. Zur letztgenannten Problemklasse zählt das „Problem des kürzesten Pfades“ (*Shortest Path*, SP), welches auch innerhalb der später untersuchten Verkehrslenkungsstrategien auftritt. Es beschreibt die häufig zu lösende Aufgabe, zwischen zwei Knoten den kürzesten Pfad (d. h. den Pfad mit der geringsten Summe aller Kantengewichte entlang dieses Pfades) zu finden. Zur Lösung sind mehrere Algorithmen bekannt [142, 236], wobei der bekannteste und wohl auch anschaulichste Algorithmus von Dijkstra stammt (Beschreibung z. B. in [264]). Eng verwandt hiermit sind Fragen nach den „ $k$  kürzesten Pfaden zwischen zwei Knoten“. An diese Pfade können weitere Anforderungen gestellt werden. Häufig betreffen diese Anforderungen die Disjunktheit, wobei es unterschiedliche Stufen gibt: teilweise Unterscheidung, keine gemeinsamen Kanten (*kantendisjunkt*), oder – außer Start- und Endknoten – keine gemeinsamen Knoten (*knotendisjunkt*) der Pfade. Zu diesem Themenbereich gibt es eine ganze Reihe von Algorithmen in der Literatur [38, 73, 240, 263, 270].

- Zu den verkehrstheoretischen Modellen, die im Rahmen der Netzplanung benötigt werden, zählen die Verkehrsmodellierung sowie Modelle der betrachteten Systeme, welche häufig in Form von Warteschlangennetzen erstellt werden können. Dazu kommen die entsprechenden Methoden, beispielsweise aus der Warteschlangentheorie, um diese Modelle untersuchen zu können [158]. Hauptziel ist es, zur Dimensionierung und zur Bewertung von Netzen quantitative Aussagen unter Berücksichtigung des Verkehrsverhaltens in diesen Netzen treffen zu können. Hierzu ist die Modellierung des Nutzerverhaltens sowie der genutzten Dienste wichtige Voraussetzung.

Während sich für klassische Telefonnetze relativ einfache, analytisch behandelbare Modelle ergeben [16, 95], wird diese Modellierung für heutige diensteintegrierende, datenorientierte Breitbandnetze zu einer zunehmend schwierigen Aufgabe [8]. Die entstehenden Modelle lassen sich zudem häufig nur noch im Rahmen simulativer Untersuchungen einsetzen, da sie für eine analytische Behandlung zu komplex sind. Daher werden während der Entwurfsphase meist vereinfachte Modelle eingesetzt. Diese erlauben dann auch den Einsatz von approximativen analytischen Dimensionierungsverfahren wie beispielsweise des „Reduced Load“-Verfahrens, mit dessen Hilfe für einen Markoff-Ankunftsprozess für Verbindungswünsche und einfache Verkehrslenkungsverfahren eine Dimensionierung unter Verwendung der Erlang-Verlustformel möglich ist [95]. Detailliertere Modelle werden dagegen oft erst während einer separaten Bewertungsphase verwendet.

### 3.2.2.2 Optimierungsverfahren

Um beurteilen zu können, ob für ein Planungsproblem die optimale Lösung gefunden wurde, ist ein quantitatives Maß zur Beschreibung der Güte einer Lösung erforderlich. Hierzu sind die Parameter der jeweiligen Lösung zu berücksichtigen. Aus diesen Parametern wird mit einer sogenannten Zielfunktion (auch Optimierungsfunktion, Qualitätsfunktion oder Kostenfunktion genannt) das Gütemaß berechnet [256]. In die Zielfunktion können dabei nahezu beliebige Aspekte über entsprechende Größen einfließen, beispielsweise die Kosten der physikalischen Netzelemente, die Leistungsfähigkeit der Netzlösung oder auch die laufenden Betriebskosten. Die Schwierigkeit liegt darin, für solche unterschiedlichen Gesichtspunkte ein gemeinsames Wertesystem zu finden.

Die meisten Planungsprobleme sind so schwierig, dass eine exakte Berechnung der optimalen Lösung in akzeptabler Zeit nicht möglich ist und auch auf absehbare Zeit trotz weiter zu erwartender Steigerung der Rechnerleistungsfähigkeit nicht möglich sein wird. Daher werden sehr häufig sogenannte heuristische Verfahren eingesetzt. Diese können zwar das Erreichen des globalen Optimums nicht garantieren, liefern aber in einer Vielzahl von Anwendungen sehr gute, d. h. dem Optimum sehr nahe kommende Lösungen. Heuristische Verfahren bestehen oft aus einer Kombination mehrerer Einzelverfahren, beispielsweise einer deterministischen Strategie zur Bestimmung einer Anfangslösung und einem statistischen Optimierungsverfahren [101]. Zu den statistischen Verfahren zählen das Monte-Carlo-Verfahren (Absuche des Lösungsraums in zufälliger Reihenfolge) sowie die später noch beschriebenen Verfahren *Simulated Annealing* und *Evolutionäre Algorithmen*. Eine beispielhafte Taxonomie von Optimierungsverfahren zeigt Bild 3.6 (entnommen aus [256]).

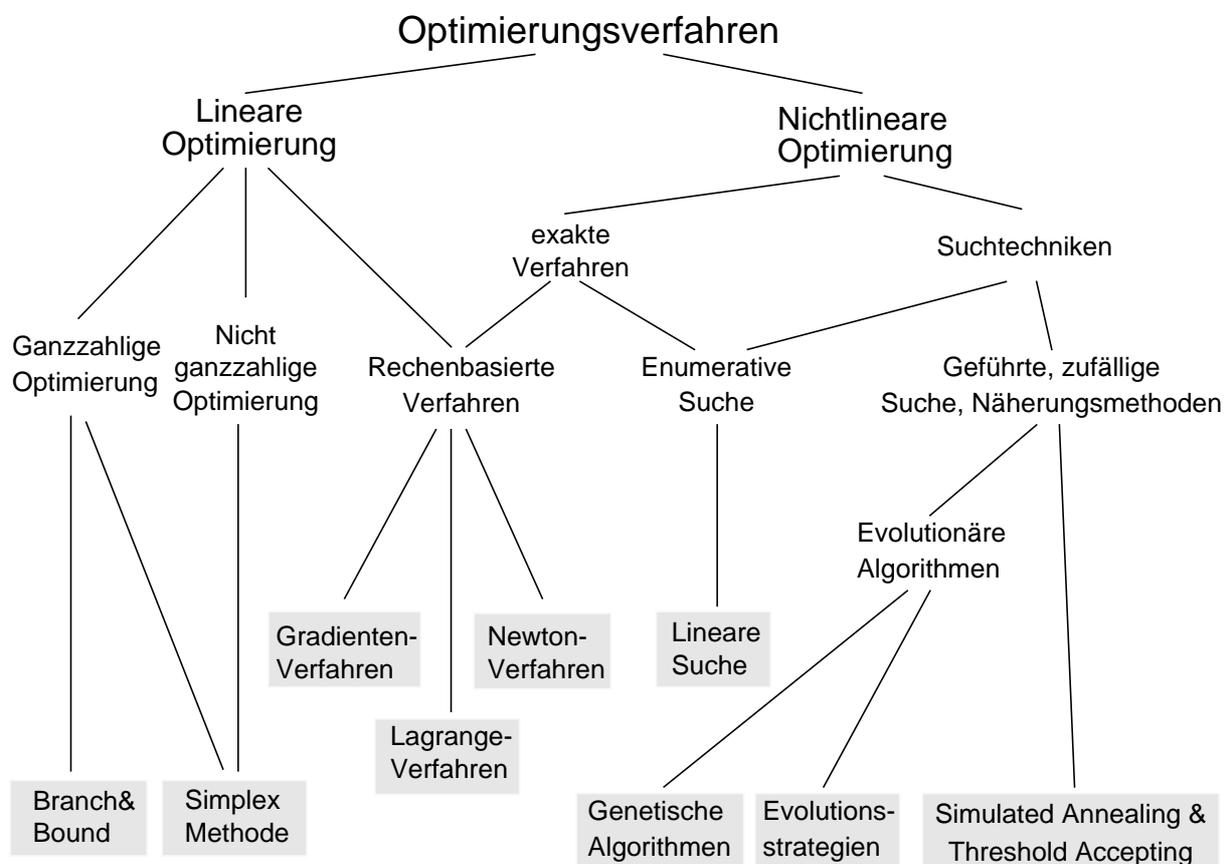
Die beiden Hauptgruppen stellen die lineare und die nichtlineare Optimierung dar:

- Bei der linearen Optimierung muss das zu lösende Problem vollständig in linearer Form beschreibbar sein. Dies bedeutet, dass sowohl die Zielfunktion als auch sämtliche Randbedingungen (häufig auch Nebenbedingungen genannt) in Form eines – möglicherweise sehr großen – linearen Gleichungssystems darstellbar sein müssen.
- Für viele realistische Probleme lässt sich keine lineare Beschreibung finden. In diesem Fall handelt es sich um nichtlineare Probleme, für welche sowohl die Form der Zielfunktion als auch die Form der Randbedingungen beliebig sein kann.

Insbesondere für viele nichtlineare Probleme lässt sich eine exakte Lösung nur für sehr kleine Probleme in akzeptabler Zeit finden. Für Probleme realistischer Größenordnung werden häufig zufallsgesteuerte und damit nichtdeterministische Suchverfahren verwendet. Die meisten Vertreter dieser Gruppe bilden aus der Natur bekannte Abläufe nach und werden deshalb auch als *naturanaloge* Verfahren bezeichnet.

Die erste große Gruppe nichtdeterministischer Verfahren sind solche, die gemäß dem Prinzip des simulierten Ausglühens (*simulated annealing*) arbeiten. Hierbei bildet man den Effekt nach, dass sich die Atome eines Materials bei hinreichend langsamem Abkühlen in einem Zustand mit minimaler Gesamtenergie anordnen. Dieser Ausglühvorgang wird auf Optimierungsprobleme übertragen. Zu Beginn des Verfahrens wird ein gültiger Zustand benötigt (*Startlösung*), der beispielsweise durch andere heuristische Verfahren gewonnen werden kann. Dann wird iterativ jeweils ein neuer Zustand durch zufällige Änderungen des bestehenden Zustands erzeugt. Der neue Zustand wird dann sicher akzeptiert, wenn das System dadurch die Optimierungsfunktion besser erfüllt. Ergibt sich durch die veränderten Parameter ein schlechterer Wert, dann wird dieser mit einer Wahrscheinlichkeit akzeptiert, die davon abhängt, um wieviel schlechter der neue Zustand ist und wie groß die noch zugelassene Veränderung (entspricht der Temperatur) ist. Diese Akzeptanzwahrscheinlichkeit wird mit fortschreitender Zeit reduziert (entsprechend dem Absinken der Temperatur beim Ausglühvorgang). Durch das Akzeptieren schlechterer Zustände kann somit z. B. ein lokales Optimum überwunden werden.

Eine vereinfachte Version des *Simulated Annealing* ist das sogenannte Toleranzschwellenverfahren (*Threshold Accepting*, TA). Hier wird ein neuer Zustand nur dann angenommen, wenn die Veränderung gegenüber dem vorhergehenden Zustand eine gewisse, meist mit der Zeit



**Bild 3.6:** Beispielhafte Taxonomie von Optimierungsverfahren (nach [256])

ebenfalls sinkende Schwelle nicht übersteigt, d. h. die zufällige Komponente des *Simulated Annealing* entfällt. Dadurch werden zwar die Berechnungen stark vereinfacht, allerdings ist auch die Gefahr größer, aus einem lokalen Optimum nicht mehr heraus zu finden.

Die zweite große Gruppe nichtdeterministischer Verfahren sind die sogenannten Evolutionären Algorithmen. Die Grundidee dieser Verfahren ist die Nachbildung aus der Natur bekannter evolutionärer Vorgänge basierend auf der Beobachtung, dass auch in der Natur optimierte Strukturen aus einer immensen Vielzahl möglicher Strukturen entstehen. Dabei existieren zahlreiche Varianten, die in unterschiedlicher Weise die evolutionären „Basisoperationen“ Vererbung, Rekombination, Mutation und Selektion anwenden und miteinander kombinieren.

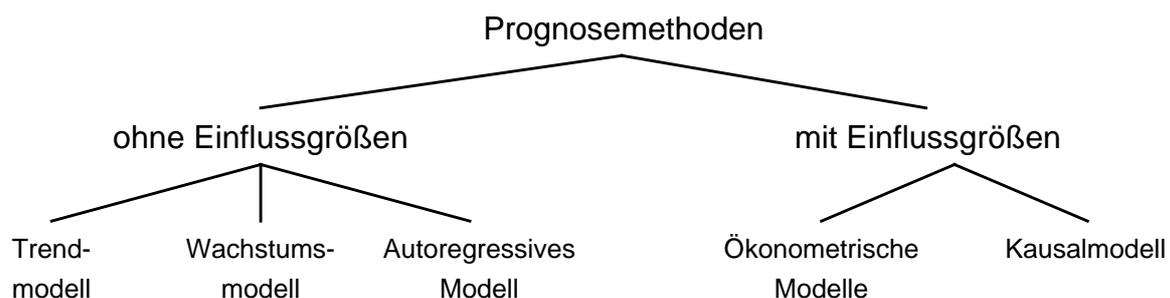
Für eine genauere Darstellung dieser nichtdeterministischer Verfahren und die Angabe weiterer Quellen wird auf die Literatur verwiesen [101, 198, 256].

### 3.2.2.3 Weitere Methoden

Neben den bisher genannten Methoden finden innerhalb der Netzplanung eine Reihe weiterer Methoden Verwendung, die hier noch kurz aufgelistet werden sollen.

- Netzplanung ist auf zukünftige Situationen ausgerichtet. Dies bedingt, dass viele Parameter nur abgeschätzt werden können. Die Unsicherheit hinsichtlich der Werte der Parameter wächst mit der Länge des Zeitraums, für den vorhergeplant werden soll. Für die Abschätzung des künftigen Nutzerverhaltens und des künftigen Dienstangebots hat sich gezeigt, dass für heutige Kommunikationsnetze Prognosen weitaus schwieriger und mit größerer Unsicherheit behaftet sind, als dies für Telefonnetze in den letzten Jahrzehnten der Fall war. Daher kommt den Prognosemethoden eine eher zunehmende Bedeutung zu. Gleichzeitig wird es aber auch wichtiger, möglichst vielfältige Szenarien zu berücksichtigen.

In [288] werden einige Prognosemethoden beschrieben, die sich in zwei Gruppen je nach Berücksichtigung von Einflussgrößen klassifizieren lassen (Bild 3.7). Die Verfahren ohne Einflussgrößen verwenden unterschiedliche mathematische Modelle, um aus den bisherigen Daten auf den weiteren Verlauf schließen zu können (beispielsweise durch



**Bild 3.7:** Klassifizierung von Prognosemethoden

geradliniges oder nichtlineares, „S-förmiges“ Fortschreiben der bisherigen Werte). Sie sind eher für kurzfristige Prognosen geeignet. Die beiden Methoden mit Einflussgrößen berücksichtigen zusätzlich wirtschaftliche Faktoren (ökonometrische Modelle) oder kausale Beziehungen zwischen der gesuchten Zielgröße und marktbestimmenden Faktoren (Kausalmodell). Dadurch sind sie komplexer, aber auch besser für längerfristige Vorhersagen geeignet.

- Der Erfolg von Prognosemethoden hängt stark vom verfügbaren Datenmaterial ab. Damit kommt Messungen und Marktstudien zur Unterstützung von Prognosen eine zentrale Bedeutung zu. Diese sollten sich sowohl auf das Nutzerverhalten als auch auf Entwicklungen auf Seiten der Gerätehersteller erstrecken.
- Eine weitere Aufgabe innerhalb der Netzplanung ist es, eine gefundene Lösung auf reale Netzelemente abzubilden. Dieser Vorgang wird häufig mit „Materialisierung“ bezeichnet. In vielen Fällen handelt es sich um eine sehr schwierige Aufgabe, da nicht nur zahlreiche Randbedingungen zu berücksichtigen sind, sondern reale Netzelemente oft auch nur in bestimmten diskreten Ausbaustufen verfügbar sind. Dadurch ist an einigen Stellen eine Überdimensionierung im Vergleich zur gefundenen Optimallösung unvermeidbar. Hierdurch ergibt sich wiederum möglicherweise Einsparpotenzial an anderer Stelle.
- Abschließend sind noch einige weitere Aufgaben im Zusammenhang mit der Netzplanung zu nennen, für die teilweise spezielle Methoden entwickelt wurden. Dazu zählen die Planung von Entgelten für die vom Netz bereit gestellten Dienste, die Planung der Nummern- bzw. Adressvergabe sowie die Berücksichtigung der Sicherheitsaspekte eines Telekommunikationsnetzes [180, 239, 288].

### 3.3 Grundlagen der Verkehrslenkung

#### 3.3.1 Begriffsdefinitionen

Zur Beschreibung von Verkehrslenkungsverfahren werden viele Begriffe benötigt, die in der Literatur nicht einheitlich verwendet werden. Nachfolgend werden einige davon erklärt und Definitionen für die weitere Verwendung in dieser Arbeit vorgestellt.

Ein *Verkehrslenkungsverfahren* (kurz *Verkehrslenkung*; engl.: *routing*) bezeichnet ein Verfahren zur Suche und Auswahl eines Weges für eine Verkehrsbeziehung. Es kann in mehrere Hauptbestandteile unterteilt werden (Bild 3.8):

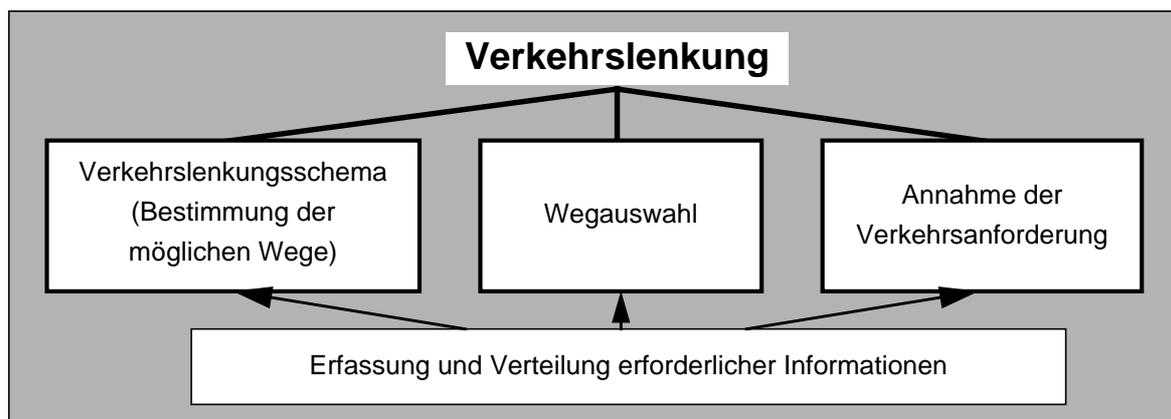
- Das *Verkehrslenkungsschema* legt fest, wie die möglichen Wege für die Verkehrsbeziehungen bestimmt werden [125]. Für die Häufigkeit der Ausführung dieses Blocks gibt es mehrere Möglichkeiten. Die Grenzfälle sind eine nur einmalige Ausführung zu Beginn

des Netzbetriebs oder aber die Ausführung bei jedem Auftreten einer Verkehrsanforderung.

- Die *Wegauswahl* ist für die Selektion eines bestimmten Weges aus der Menge der möglichen Wege zuständig [125]. In vielen englischsprachigen Veröffentlichungen wird der Begriff *Routing* für genau diese Aufgabe verwendet.
- Eine weitere wichtige Aufgabe ist die Entscheidung, ob eine Verkehrsanforderung angenommen wird (häufig mit CAC bezeichnet für *connection admission control* bzw. *call admission control*, Verbindungsannahmesteuerung)<sup>2</sup>. In vielen Fällen wird diese Entscheidung mit der Wegauswahl integriert durchgeführt. Es ist prinzipiell aber auch möglich, diese Entscheidung in einer separaten Stufe vor oder nach der Wegauswahl zu treffen (siehe genauere Betrachtung für WDM-Netze in Abschnitt 4.3.4). Insbesondere in der Literatur zu ATM-Netzen finden sich zahlreiche Untersuchungen von CAC-Verfahren [156, 209].

Zur Lösung der genannten Aufgaben ist es erforderlich, die entsprechenden Informationen zu sammeln und den beteiligten Netzelementen zur Verfügung zu stellen. Dies umfasst beispielsweise die Sammlung der Informationen über die Auslastung der Netzknoten oder Übertragungsabschnitte sowie – bei einigen Verfahren – die Verteilung der berechneten Verkehrslenkungstabellen. Dies wird durch sogenannte *Verkehrslenkungsprotokolle (Routing-Protokolle)* erreicht, die zur Realisierung eines Verkehrslenkungsverfahrens dienen. Ein bestimmtes Verfahren kann dabei meist mit einer Vielzahl unterschiedlicher Protokolle realisiert werden.

Eine spezielle Aufgabe der Verkehrslenkung, die häufig im Zusammenhang mit dem Austausch von Steuernachrichten auftritt, ist das Verteilen von Informationen an *alle* Knoten eines Netzes (*broadcasting*). Hierfür sind mehrere Mechanismen denkbar. Die bekanntesten sind das



**Bild 3.8:** Hauptaufgaben eines Verkehrslenkungsverfahrens

2. Speziell bei Arbeiten zu ATM-Netzen findet sich häufig die umgekehrte Sichtweise, d. h. die Verkehrslenkung (Wegesuche) wird als eine Teilaufgabe der Verbindungsannahmesteuerung dargestellt [156].

sogenannte *flooding* (Fluten), bei dem jeder Knoten die Information an alle angeschlossenen Knoten weitergibt<sup>3</sup>, sowie die Weitergabe entlang eines überspannenden Baums [37].

Die Begriffe *dynamische Verkehrslenkung* (*dynamic routing*) und *statische Verkehrslenkung* (*static routing*) werden in zwei unterschiedlichen Zusammenhängen verwendet, die leicht zu Missverständnissen führen können:

- Im Kontext einer Netzplanung wird in der Literatur mit *static routing* die Aufgabe bezeichnet, die durch eine Verkehrsmatrix vorgegebenen Verkehrsflüsse in einem Netz zu führen. Es handelt sich also um eine Festlegung der Verkehrsflüsse zur Dimensionierung von Netzen.

Von *dynamic routing* wird in diesem Kontext dann gesprochen, wenn die dynamischen Aspekte des Verkehrs betrachtet werden, d. h., wenn beispielsweise im Falle von Durchschaltvermittlung der zeitliche Verlauf des Auf- und Abbaus von Verbindungen betrachtet wird.

Bei WDM-Netzen werden oft Wellenlängenkanäle betrachtet. Im ersten Fall wird dann häufig von *static lightpath establishment* (SLE), im zweiten Fall von *dynamic lightpath establishment* (DLE) gesprochen. Im Rahmen dieser Arbeit wird für letzteres die Bezeichnung *Verkehrslenkung für dynamischen Auf- und Abbau von Verbindungen* (kurz: *Verkehrslenkung für dynamischen Verkehr*) verwendet.

- Im Kontext von Verkehrslenkungsverfahren für zeitlich variierenden (d. h. dynamischen) Verkehr wird von *dynamischer Verkehrslenkung* gesprochen, wenn mindestens ein Teil des Verfahrens zeitabhängig ist [16, 95]. Der Begriff *statische Verkehrslenkung* wird dagegen zur Beschreibung zeitinvarianter Verkehrslenkungsverfahren verwendet.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe statische und dynamische Verkehrslenkung nur in diesem Kontext verwendet, da für alle Leistungsuntersuchungen zeitlich variierende Verkehrsanforderungen betrachtet werden.

Die Unterscheidung in statisch oder dynamisch ist häufig nicht für ein Verkehrslenkungsverfahren insgesamt sinnvoll, sondern kann für einzelne Bestandteile durchgeführt werden. In [125] wurden deshalb einige weiter eingegrenzte Begriffe definiert:

- Bei einem *festen Verkehrslenkungsschema* sind die Wege innerhalb der Wegemengen (zumindest für längere Zeiträume) zeitunabhängig.
- Bei einem *dynamischen Schema* ist die Wegemenge zeitlich veränderlich. Dieser Fall wird an Hand des Auslösers solcher Änderungen weiter unterteilt in *zeitabhängige*, *zustandsabhängige* oder *ereignisorientierte* Verkehrslenkungsschemata.

---

3. Um eine lawinenartig und unbegrenzt ansteigende Last zu vermeiden, sind weitere Maßnahmen wie beispielsweise eine Beschränkung der Paketlebenszeit oder ein Verwerfen von doppelt empfangenen Paketen erforderlich.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf *Verkehrslenkungsstrategien* (engl.: *routing strategy*; häufig auch *Verkehrslenkungsverfahren*, engl.: *routing method* oder *routing technique*), d. h. auf den Regeln und Festlegungen für das Vorgehen bei der Verkehrslenkung. Zur Umsetzung einer Strategie sind dann verschiedene sogenannte *Verkehrslenkungsalgorithmen* (*routing algorithm*) erforderlich, womit allgemein Algorithmen für alle in Bild 3.8 gezeigten Aufgabengebiete bezeichnet werden. Dazu zählen nach [95] ein Satz von Regeln, der den Pfad für eine Verkehrsanforderung spezifiziert, sowie die zugehörigen Daten, die für eine Entscheidung erforderlich sind.

Für die Verkehrslenkung in WDM-Netzen ist zu beachten, dass nicht nur die Wahl eines Weges, sondern auch die Wahl einer Wellenlänge auf jedem Abschnitt erforderlich ist. Damit treten die bisher beschriebenen Verkehrslenkungsaufgaben sowohl für Wege als auch für optische Pfade auf. Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb der Begriff „Verkehrslenkung“ umfassend für alle in Bild 3.8 gezeigten Aufgabengebiete sowohl für Wege als auch für optische Pfade verwendet (siehe Abschnitt 4.1).

### **3.3.2 Klassifizierungsmöglichkeiten für Verkehrslenkungsverfahren**

Für die in der Literatur vorgestellten Verkehrslenkungsverfahren gibt es eine Vielzahl von Klassifizierungsmöglichkeiten [16, 95, 159]. Allerdings hat sich in der Vergangenheit gezeigt, dass der Versuch einer umfassenden Klassifizierung schwierig ist. Dies liegt unter anderem daran, dass für jeden Aufgabebereich innerhalb der Verkehrslenkung (beispielsweise gemäß der Unterteilung in Bild 3.8) eine eigene Klassifizierung durchgeführt werden kann. Da die einzelnen Elemente eines Verfahrens zu unterschiedlichen Klassen gehören können, lassen sich viele Verkehrslenkungsverfahren nicht eindeutig einer Klasse zuordnen. Deshalb wird für die nachfolgend beschriebenen Klassifizierungskriterien nicht der Anspruch erhoben, dass die dadurch definierten Klassen disjunkt zueinander sind.

Verkehrslenkungsverfahren sind sehr stark abhängig vom Verbindungskonzept und vom Vermittlungsprinzip im Netz. So werden für verbindungslos arbeitende Netze meist völlig andere Verfahren eingesetzt als bei verbindungsorientiert arbeitenden Netzen. Auch der Zeitpunkt, wann die Verkehrslenkung stattfindet, ist unterschiedlich: Bei verbindungsloser Kommunikation muss für jedes Paket eine Verkehrslenkung stattfinden, bei verbindungsorientierter Kommunikation wird üblicherweise nur beim Verbindungsaufbau ein Weg festgelegt, der dann für die Dauer der Verbindung nicht mehr geändert wird.

Bei verbindungsorientierter Kommunikation ist sowohl Paket- als auch Durchschaltevermittlung möglich. Für beide Vermittlungsprinzipien existieren unterschiedliche Verkehrslenkungsverfahren. Da die erste Generation von WDM-Netzen auf Durchschaltevermittlung beruhen und damit verbindungsorientiert arbeiten wird, werden im Folgenden vor allem Verkehrslen-

kungsverfahren für diese Gruppe von Netzen betrachtet. Viele der nachfolgend beschriebenen und in Bild 3.9 schematisch gezeigten Kriterien und Klassifizierungen sind aber auch für paketvermittelnde Netze gültig.

Eine gängige Klassifizierung unterteilt Verkehrslenkungsverfahren in *statische* und *dynamische* Verfahren je nachdem, ob Teile des Verfahrens zeitlich veränderlich sind. Bei genauer Betrachtung enthalten die meisten Verfahren aber dynamische Elemente: so ist die Wegeauswahl bei praktisch allen Verfahren dynamisch, da sie erst zum jeweiligen Zeitpunkt des Eintreffens einer Anforderung durchgeführt wird. Die Gruppe der dynamischen Verfahren wird häufig in zwei Klassen aufgeteilt:

- Bei einem adaptiven Verfahren wird der Netzzustand bei der Verkehrslenkung mit berücksichtigt. Häufig werden diese Verfahren auch „Echtzeitverfahren“ (*real-time routing*) genannt.
- Bei einem nicht adaptiven Verfahren arbeitet die Verkehrslenkung ohne Berücksichtigung des momentanen Netzzustandes. Da häufig verschiedene Wegemengen – beispielsweise tageszeitabhängig – vorhergeplant und dann von der Verkehrslenkung eingesetzt werden, spricht man von „vorplanenden Verfahren“ (*pre-planned routing*).

Eine weitere Unterteilung der dynamischen Verfahren kann an Hand der auslösenden Faktoren für Veränderungen erfolgen [16, 125]:

- Bei zeitabhängigen Verfahren (*time dependent*) hängen die Veränderungen beispielsweise von der Tageszeit oder dem Wochentag ab.
- Bei zustandsabhängigen Verfahren (*state dependent*) hängen die Veränderungen vom Netzzustand ab.
- Bei ereignisorientierten Verfahren (*event dependent*) hängen die Veränderungen von Ereignissen ab, wobei meist Blockierereignisse von Belegungsversuchen berücksichtigt werden.

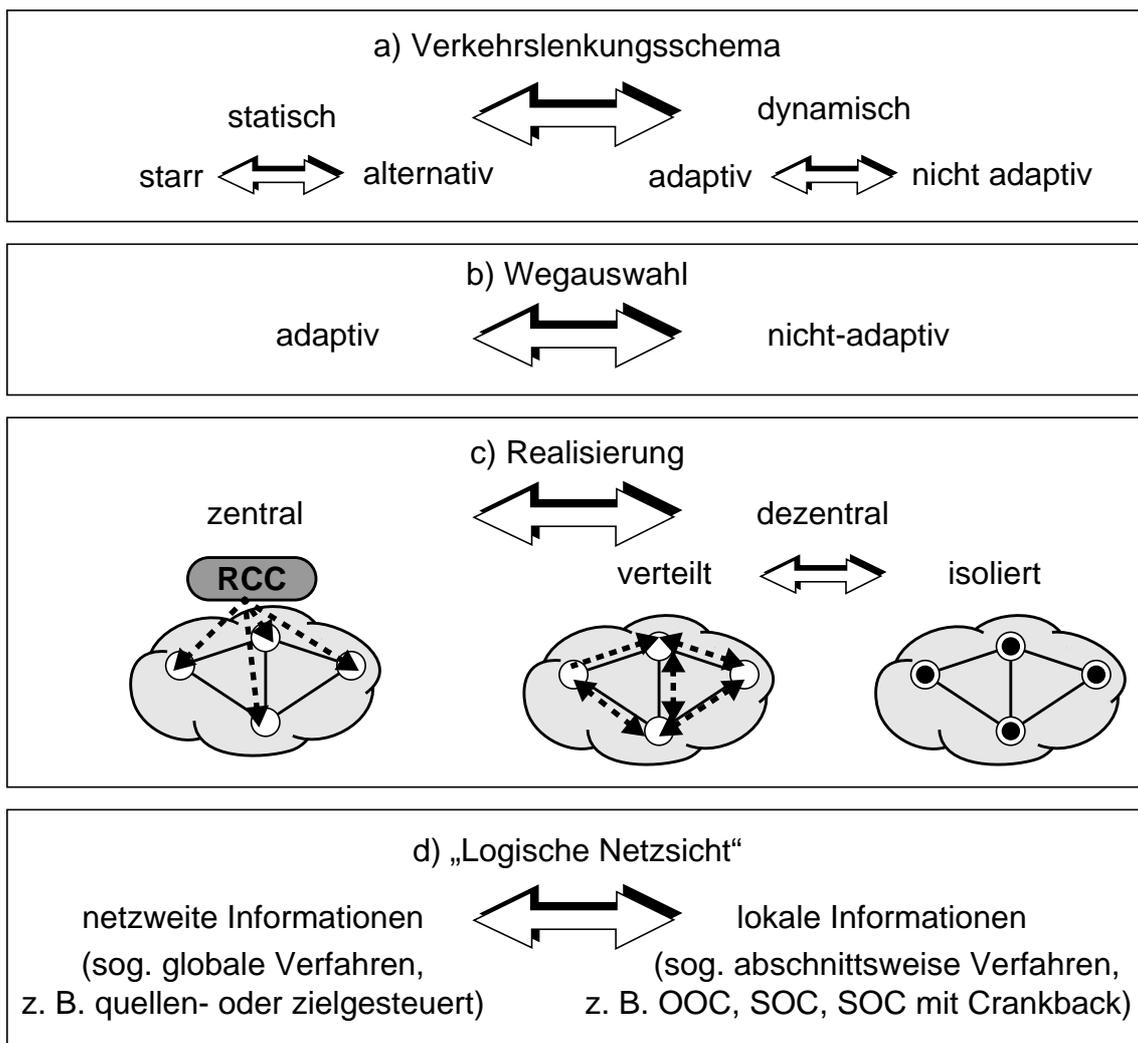
Häufig wird in der Literatur bei Anwendung dieser Klassifizierungskriterien nicht genauer betrachtet, für welche der Komponenten aus Bild 3.8 die entsprechenden Merkmale zutreffen. Problematisch ist insbesondere, dass diese Komponenten weitgehend unabhängig voneinander unterschiedlichen Klassen zugehören können. Deswegen ist eine solche Unterteilung vor allem sinnvoll, wenn man sich auf die einzelnen Komponenten bezieht. Im Folgenden wird dies für die in Bild 3.9 unterschiedenen Aspekte durchgeführt.

Wenn man sich auf das Verkehrslenkungsschema beschränkt, ist eine Unterteilung in statisch oder dynamisch möglich (Bild 3.9a):

- Bei einem *statischen*, häufig auch *fest* genannten Verkehrslenkungsschema liegt die Menge der möglichen Wege fest und wird nur in – im Vergleich zu Ankunftsabständen

oder Haltedauern von Verbindungen – sehr großen zeitlichen Abständen verändert (beispielsweise bei einer Neukonfiguration des Netzes). Es existieren zwei Hauptvarianten statischer Verkehrslenkungsschemata:

- Bei einem *starr* Schema gibt es nur einen einzigen möglichen Weg, der für die Wegauswahl zur Verfügung steht.
  - Bei einem *alternativen* Schema stehen mehrere Wege zur Verfügung. Die Absuchstrategie, d. h. die Reihenfolge, in der diese Alternativen bei einem Belegungsversuch abgesucht werden, ist eine wesentliche Eigenschaft der Wegauswahl.
- Bei einem *dynamischen* Verkehrslenkungsschema ändert sich die Menge der möglichen Wege über der Zeit. Hier kann die Adaptivität im oben definierten Sinn als zusätzliches Kriterium für eine genauere Unterteilung herangezogen werden. Ein Sonderfall ist das sogenannte *on-line routing*, bei dem für jede einzelne Verbindungsanforderung die mögliche Wegemenge neu bestimmt wird.



**Bild 3.9:** Klassifizierungsmöglichkeiten für Verkehrslenkungsverfahren

Für die Wegauswahl sind viele Varianten denkbar, die sich ebenfalls in adaptive und nicht adaptive Verfahren unterteilen lassen (Bild 3.9b). Im Zusammenhang mit einem alternativen Verkehrslenkungsschema wird häufig eine sequentielle Absuche der Alternativen eingesetzt, welche zu den nicht adaptiven Varianten zählt. Die Absuche kann entweder immer an einem definierten Ausgangspunkt beginnen, oder an dem Punkt anknüpfen, bei dem die vorangegangene Suche geendet hat. Daneben sind aber noch eine ganze Reihe anderer, auch adaptiver Absuchstrategien denkbar.

Eine weitere wichtige Klassifizierung orientiert sich an der Realisierung eines Verkehrslenkungsverfahrens (Bild 3.9c). Dabei können zentrale und dezentrale Verfahren unterschieden werden. Bei zentralen Verfahren werden alle Informationen in einem Kontrollzentrum gesammelt und die Ergebnisse der dort ausgeführten Berechnungen für die Verkehrslenkung an alle Knoten verteilt. Diese Steuerzentrale wird oft mit *routing control center* (RCC, Verkehrslenkungszentrum) bezeichnet. Dezentrale Verfahren haben keine solche zentrale Instanz. Sie können weiter unterteilt werden in isolierte Verfahren, bei denen jeder Knoten nur die ihm lokal zur Verfügung stehende Information auswertet, und in verteilte Verfahren, bei denen die Knoten aktiv Informationen austauschen.

Eng verwandt mit dieser realisierungstechnischen Unterscheidung ist die in Bild 3.9d dargestellte Unterteilung an Hand der „logischen Netzsicht“ in globale und in abschnittsweise arbeitende Verfahren (*hop-by-hop routing*, *step-by-step routing*). Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff „globales Verfahren“ verwendet, wenn der Verkehrslenkung die vollständige Netzinformation zur Verfügung steht und die Wegesuche Ende-zu-Ende, d. h. netzübergreifend von der Quelle zum Ziel erfolgt. Im Unterschied dazu wird von einem „abschnittsweisen Verfahren“ gesprochen, wenn die Knoten von der Quelle bis zum Ziel jeweils eine lokale und nur für einen Netzabschnitt geltende Entscheidung basierend auf lokalen Informationen treffen. Hierzu ist anzumerken, dass ein globales Verfahren entweder mittels eines RCC oder aber auch verteilt realisiert werden kann: Wenn sämtliche relevanten Informationen jedem Knoten zur Verfügung stehen, hat jeder Knoten die Sicht eines RCCs. Solche Realisierungsdetails werden im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Innerhalb der globalen Verfahren sind quellengesteuerte Verfahren (*source routing*) eine wichtige Gruppe. Bei Quellensteuerung gibt die Quelle die vollständige Weginformation bis zum Ziel den einzelnen Paketen bzw. der Verbindungsaufbauanforderung mit. Die weiteren Knoten werten diese Information aus, führen aber keine eigenständige Verkehrslenkung mehr durch. Ein ähnliches Verfahren ist die zielgesteuerte Verkehrslenkung (*destination routing*), die aber eine geringere Bedeutung besitzt. Hier wird bei einer auftretenden Verkehrsanforderung der Zielknoten informiert, der den Weg bestimmt und an den Quellknoten übermittelt. Von diesem aus wird dann die Verbindung aufgebaut bzw. werden die mit entsprechender Information versehenen Pakete versandt.

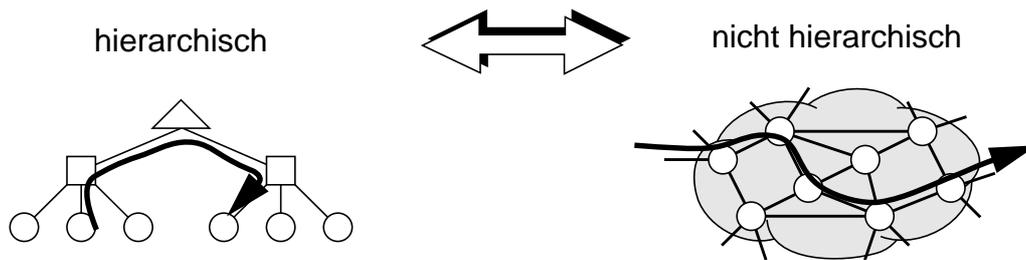
Im Gegensatz zu globalen Verfahren wird bei abschnittswisen Verfahren von jedem Knoten immer nur der nächste Abschnitt (*hop*) bestimmt und die Information entsprechend weitergeleitet. Hierbei werden für die abschnittsweise Suche drei Arten der Kontrolle über die Wahl von Alternativen unterschieden [95]:

- OOC (*originating office control*): Wenn auf einem der Wegabschnitte eine Blockierung auftritt, kann der Ursprungsknoten nach einer möglichen Alternative suchen. Alle Folgeknoten müssen jeweils den Erstweg wählen.
- SOC (*sequential office control*): Hier wird die Möglichkeit, Alternativwege zu untersuchen, an den nächsten Knoten entlang des Weges weitergegeben, sobald auf einem Abschnitt freie Ressourcen gefunden wurden. Findet einer der Folgeknoten keinen freien nächsten Abschnitt mehr, so wird der Verbindungswunsch blockiert, es findet keine Rückgabe der Kontrolle statt. Deswegen werden entsprechende Verfahren auch häufig als „progressive Verfahren“ bezeichnet.
- SOC mit Crankback (SOCc, *sequential office control with crankback*): Falls an einem Folgeknoten kein Weiterweg mehr gefunden werden kann, ist hier in Ergänzung zu SOC eine Rückgabe der Kontrolle zum Vorgängerknoten möglich (*crankback*). Dieser kann dann entweder weitere Alternativen untersuchen oder die Kontrolle wiederum an seinen Vorgängerknoten zurück geben.

Jedes Verkehrslenkungsverfahren hat ein Ziel, das möglichst optimal erreicht werden soll. Die jeweils zu Grunde gelegten Optimalitätskriterien bieten ebenfalls eine Möglichkeit zur Unterscheidung der Verfahren. Häufig verwendete Beispiele sind bei durchschaltevermittelnden Netzen die Verlust- oder Blockierwahrscheinlichkeit, bei paketvermittelnden Netzen die auftretenden Verluste und Verzögerungen (siehe folgender Abschnitt). Grundsätzlich lässt sich unterscheiden, ob ein einzelnes Knotenpaar oder das gesamte Netz betrachtet wird:

- Verfahren mit einer Optimierung für jedes Einzelpaar werden den „*Shortest-Path-Verfahren*“ zugeordnet, da eine Ähnlichkeit zur Suche nach dem kürzesten Weg vorhanden ist.
- Mit „*optimaler Verkehrslenkung*“ werden Verfahren bezeichnet, bei denen die Optimierung auf das gesamte Netz angewandt wird. Diese Verfahren basieren meist auf Flussmodellen und werden häufig in der Planungsphase eingesetzt, während sie auf Grund der hohen Komplexität für den Echtzeitbetrieb wenig geeignet sind.

Für klassische Telefonnetze gibt es weitere Klassifizierungskriterien. So werden dort *nicht hierarchische Verfahren*, bei denen alle Netzknoten gleichberechtigt sind, und *hierarchische Verfahren* unterschieden (Bild 3.10). Bei letzteren orientiert sich die Verkehrslenkung an einer Netzhierarchie, bei der die Knoten einer Netzebene zu Gruppen zusammengefasst werden. Bei einer Verkehrsanforderung zwischen zwei Gruppen richtet sich die Absuche an dieser Netzhierarchie aus.



**Bild 3.10:** Orientierung der Verkehrslenkung an der Netzstruktur

Außerdem werden bei klassischen Telefonnetzen drei Einsatzgebiete für Verkehrslenkungsverfahren abhängig vom Zeithorizont unterschieden: Für Echtzeit-Verkehrsmanagement im Sekunden- oder Minutenbereich, für das auf Tage oder Wochen zielende Kapazitätsmanagement, und für die langfristige Netzplanung mit einem Zeithorizont von Monaten oder Jahren können jeweils unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden [16]. Schließlich werden bei Telefonnetzen die Verfahren auch an Hand der Granularitätsstufe unterschieden: Mit *traffic routing* werden Verfahren bezeichnet, die auf der Ebene einzelner Telefonkanäle arbeiten, mit *transport routing* solche Verfahren, welche auf der Transportebene arbeiten (in diesem Fall also häufig SDH- bzw. SONET-Transportverbindungen beeinflussen).

Für paketvermittelnde Netze gibt es eine Reihe spezieller Verkehrslenkungsverfahren und -protokolle. Besonders bedeutend sind dabei die verteilt arbeitenden, adaptiven Verfahren. Zu deren Umsetzung haben sich zwei unterschiedliche Möglichkeiten für den Informationsaustausch etabliert:

- Bei *Link-State-Protokollen* verteilt jeder Knoten die Informationen über die bei ihm angeschlossenen Links an alle Netzknoten.
- Bei *Distance-Vector-Protokollen* wird von jedem Knoten die vollständige momentane Verkehrslenkungsinformation an die jeweiligen Nachbarknoten verteilt.

Weitere ausführliche Informationen zur Verkehrslenkung in paketvermittelnden Netzen finden sich beispielsweise in [161, 264].

### 3.3.3 Optimierungsziele für Verkehrslenkungsstrategien

Ein Verkehrslenkungsverfahren muss zahlreiche Anforderungen erfüllen, wozu nach [161, 264] Korrektheit der realisierten Pfade, Einfachheit des Verfahrens, Robustheit gegenüber Hard- und Software-Fehlern im Netz, Stabilität bei Last- oder Topologieänderungen, Fairness, sowie Optimalität hinsichtlich der gewählten Zielkriterien zählen. Dabei gibt es eine Vielzahl von möglichen Zielen für Verkehrslenkungsstrategien:

- *Minimierung der Gesamtverluste bzw. -blockierung*, d. h. der Anzahl abgelehnter Verbindungswünsche bezogen auf die Gesamtanzahl aufgetretener Verbindungswünsche. Bei den in dieser Arbeit betrachteten WDM-Netzen werden die Gesamtverluste dementsprechend bestimmt aus dem Verhältnis der Anzahl abgelehnter Anforderungen zur Gesamtanzahl von Anforderungen für optische Pfade. Dieses Ziel entspricht der Maximierung der Anzahl realisierter Verbindungen.
- *Maximierung der Fairness*. Fairness kann sehr unterschiedlich definiert werden. Häufig wird darunter die Gleichbehandlung für gleichberechtigte Verbindungswünsche verstanden. In WDM-Netzen werden oft möglichst ähnliche Verluste für alle Knotenpaare – unabhängig von der jeweiligen Entfernung der beiden Knoten – gefordert. Erweiterte Betrachtungen können die Behandlung von mehreren Dienstklassen und Fairness innerhalb einer Klasse sowie zwischen Klassen mit einschließen.
- *Maximierung des Gewinns für den Netzbetreiber*. Wenn der für den Netzbetreiber erzielbare Gewinn (sogenannter *Wert*) für alle Verbindungswünsche gleich ist, entspricht dieses Ziel der Minimierung der Gesamtverluste. Wenn die Verbindungen aber unterschiedlichen Wert haben können, fallen das Gewinnmaximum und das Minimum der Gesamtverluste nicht mehr notwendigerweise zusammen.
- *Minimierung der Auslastung knapper Ressourcen*. Das Ziel ist es, teure Netzressourcen (für WDM-Netze z. B. Wellenlängenkonverter) möglichst effizient auszulasten. Idealerweise wird somit der Bedarf an diesen Ressourcen möglichst gering gehalten, ohne dass sich Qualitätsverluste ergeben.
- *Maximierung der Netzauslastung*. Dieses Kriterium stellt für sich alleine genommen kein sinnvolles Ziel dar, da auch die unnötige und damit grundsätzlich unerwünschte Belegung von Ressourcen (beispielsweise durch längere Umwege) in die Netzauslastung mit eingeht. Es kann aber mit anderen Optimierungszielen kombiniert eingesetzt werden.

Diese Kriterien sind nicht unabhängig voneinander. Eine einseitige Optimierung eines der Kriterien (beispielsweise der Gesamtverluste) würde eine starke Verschlechterung anderer Kriterien (in diesem Fall der Fairness) bedeuten. Deshalb werden häufig mehrere Kriterien gemeinsam betrachtet.

### **3.4 Beispiele für Verkehrslenkungsverfahren**

Die nächsten Abschnitte beschreiben jeweils Beispiele für bekannte Verkehrslenkungsverfahren getrennt nach durchschaltvermittelnden Netzen und paketvermittelnden Netzen, wobei für letztere mit IP- und ATM-basierten Netzen nur die beiden wichtigsten Vertreter betrachtet werden. Ein Ausblick auf das neuere, zur Zeit vor allem noch in der Forschung diskutierte MPLS-Konzept ist im abschließenden Abschnitt 3.4.3 enthalten. Die für optische Netze vorgeschlagenen Verkehrslenkungsverfahren werden im Kapitel 4 detailliert beschrieben und bewertet.

---

Generell gilt für viele in realen Netzen eingesetzte Verfahren, dass keine der im Abschnitt 3.3.2 genannten Klassen in Reinform umgesetzt wird. Vielmehr werden häufig Elemente verschiedener Klassen kombiniert.

### 3.4.1 Verkehrslenkungsverfahren für durchschaltevermittelnde Netze

Die bekanntesten Vertreter für heutige durchschaltevermittelnde Netze mit leistungsfähigen Verkehrslenkungsverfahren sind klassische Telefonnetze. Dort werden Verkehrslenkungsverfahren sowohl für einzelne Sprachkanäle als auch für die Kanäle der unterlagerten Transportschicht – meist SDH oder SONET – benötigt. Eine Besonderheit mit starker Auswirkung auf Verkehrslenkungsverfahren ist dabei der hohe Vermaschungsgrad von Telefonnetzen: Häufig wird auf höheren Netzebenen eine Vollvermaschung der einzelnen Vermittlungsknoten durch Direktverbindungen in der Transportschicht realisiert. Zu den nachfolgenden Beispielen finden sich weitere Informationen und weiterführende Quellen bei G. Ash [16].

#### Verfahren für die Ebene einzelner Telefonkanäle

In den USA wurde 1930 eine Hierarchie für die Vermittlungsstellen sowie ein entsprechendes, zu Beginn noch starres Verkehrslenkungsverfahren eingeführt (*fixed hierarchical routing*). Dieses basierte anfangs noch auf manueller Vermittlung. Im Jahr 1951 war bereits ein alternatives Verkehrslenkungsschema durch die Ergänzung der hierarchischen Topologie mit Querwegen realisiert und die Vermittlung zu großen Teilen automatisiert. Trotz weiterer großer Fortschritte bei der Digitalisierung der Vermittlungsstellen werden auch in heutigen Telefonnetzen noch überwiegend statische hierarchische Verkehrslenkungsverfahren eingesetzt. Dabei gibt es viele Varianten für das jeweils zu Grunde liegende Verkehrslenkungsschema, beispielsweise hinsichtlich der Anzahl erlaubter Hierarchiestufen oder der Wegeführung für die beiden Richtungen einer bidirektionalen Verkehrsanforderung.

Inzwischen finden dynamische Verkehrslenkungsverfahren zunehmend Beachtung. Bis 1997 basierten insgesamt 10 große Netze weltweit auf dynamischer Verkehrslenkung [16]. Die USA nehmen auch hier eine Vorreiterrolle ein: Dort wurde 1984 im AT&T-Netz mit DNHR (*dynamic nonhierarchical routing*) das erste dynamische Verfahren eingeführt. Es basiert auf einer Vorplanung der möglichen Wege, die dann sequentiell abgesucht werden. Der dynamische Aspekt besteht darin, dass abhängig vom Verkehr für verschiedene Tageszeiten unterschiedliche Wegemengen verwendet werden. Die Länge der Wege ist auf zwei Abschnitte begrenzt und es wird bei der Wegewahl ein Crankback-Mechanismus eingesetzt. Damit kann DNHR den zeitabhängigen, nicht adaptiven, abschnittswisen und dezentral realisierten Verfahren mit dynamischem Verkehrslenkungsschema zugeordnet werden.

1991 wurde DNHR im AT&T-Netz durch RTNR (*real time network routing*) ersetzt. RTNR zählt zu den zustandsabhängigen Echtzeitverfahren, da eine adaptive Wegauswahl eingesetzt wird. Zuerst wird versucht, den Direktweg zu belegen. Falls dies nicht möglich ist, wird aus allen möglichen Alternativen mit zwei Abschnitten diejenige mit der geringsten Verkehrsbelastung ausgewählt. Dazu wird mittels Signalisierung vom Zielknoten die Information über die momentane Belegung aller angeschlossenen Abschnitte angefordert und gemeinsam mit den bei der Quelle verfügbaren Informationen zur Bestimmung der besten Alternative verwendet.

Ein anderes zustandsabhängiges Echtzeitverfahren ist das erstmals 1991 im *Stentor Canada*-Netz eingeführte DCR (*dynamically controlled routing*), das später auch in weiteren Netzen, beispielsweise von Sprint und MCI, Verwendung fand. Im Unterschied zu DNHR oder RTNR ist DCR ein globales Verfahren, bei dem einer zentralen Verkehrslenkungsinstanz alle 10 Sekunden der Zustand aller Netzabschnitte übermittelt wird. Die wesentlichen Berechnungen werden dann in dieser zentralen Instanz durchgeführt.

Inzwischen wurden auch einige Vertreter aus der Klasse der ereignisorientierten Echtzeitverfahren realisiert. Beispiele sind das 1996 in Großbritannien und in Norwegen eingeführte DAR (*dynamic alternative routing*) und STR (*state- and time-dependent routing*) als Erweiterung von DAR. STR wird seit 1992 bei NTT (Japan) verwendet. Bei beiden Verfahren wird nach erfolglosem Belegungsversuch auf dem Erstweg derjenige Alternativweg gewählt, der beim letzten Blockierereignis auf dem Erstweg erfolgreich belegt werden konnte. Tritt auch hier eine Blockierung auf, wird der Verbindungswunsch abgelehnt und für künftige Versuche eine neue Alternative zufällig ausgewählt. STR verwendet in Ergänzung zu DAR noch eine Anpassung der möglichen Wege in Abhängigkeit von der Verkehrsverteilung im Netz.

### **Verfahren für die Transport-Ebene**

Mit dem Aufkommen von digitalen Cross-Connects für die Transportschicht in SDH- bzw. SONET-Netzen wurde es möglich, auch auf dieser Ebene Transportkapazitäten zu vermitteln. Die entsprechenden Verkehrslenkungsverfahren werden mit Transport-Verkehrslenkung (*transport routing*) bezeichnet. Die vorgeschlagenen Verkehrslenkungsverfahren beruhen auf Varianten der für Sprachkanäle bereits vorgestellten Verfahren, bei denen zwei wesentliche Änderungen vorgenommen werden. Meist wird die Gewichtung der einzelnen Netzabschnitte für die Verkehrslenkungsalgorithmen geändert und es wird zusätzlich die Rekonfiguration bestehender Transportverbindungen erlaubt. Dadurch wird die Realisierung von Restaurationsmechanismen ermöglicht. Diese Rekonfiguration ist bei heutiger Technologie im Bereich einiger Millisekunden möglich.

Die wesentlichen Vorteile einer dynamischen Transport-Verkehrslenkung liegen in der möglichen zeitlichen Anpassung der Transportkapazitäten an die Verkehrsprofile sowie der Unterstützung effizienter Schutzmechanismen. Letzteres wird sowohl durch die Möglichkeit der

Bereitstellung physikalisch disjunkter Wege zwischen zwei Knoten als auch durch schnelle Restaurationsverfahren basierend auf der Rekonfiguration der Transportschicht erreicht. Ein Beispiel ist das von AT&T eingesetzte FASTAR (für *fast automated restoration*), ein zentral gesteuertes Verfahren zur automatischen Restauration bei Fehlerfällen im Transportnetz [50].

Eine Transport-Verkehrlenkung wird auf Grund der geringeren Dynamik über das Netzmanagement gesteuert, während die Verkehrlenkung für einzelne Verbindungen durch Signalisierung erfolgt<sup>4</sup>. Vielfach kommt in heutigen Netzen SDH bzw. SONET in der Transportschicht zum Einsatz. In den SDH- bzw. SONET-Standards sind eine Reihe von Protokollen für den Informationsaustausch im Rahmen der Verkehrlenkung definiert, während für Verkehrlenkungsstrategien nur zur automatischen Rekonfiguration im Fehlerfall umfangreichere Vorschläge existieren [291].

### **Bewertung der Verfahren**

Eine detaillierte Beschreibung und Untersuchung von über 60 Verkehrlenkungsverfahren (einschließlich der Hauptvarianten) findet sich in [16]. Die Schlussfolgerungen aus den dort enthaltenen Ergebnissen sind:

- Alle dynamischen Verfahren sind den statischen, hierarchischen Verfahren deutlich überlegen. Dies resultiert sowohl aus der Verwendung dynamischer Elemente als auch nicht-hierarchischer Verkehrlenkung.
- Alle untersuchten ereignisorientierten dynamischen Verfahren konnten die Leistungsfähigkeit von zustandsabhängigen Verfahren nicht ganz erreichen, obwohl sich im Vergleich zu statischen Verfahren ebenfalls große Verbesserungen erzielen ließen.
- Echtzeitverfahren, welche bei jedem Verbindungswunsch den momentanen Netzzustand berücksichtigen, erreichen die beste Ausnutzung der vorhandenen Ressourcen im Netz.
- Durch eine Kombination von dynamischer Verkehrlenkung sowohl für die Ebene einzelner Verkehrsanforderungen als auch die Transportebene lassen sich die besten Ergebnisse erzielen.

---

4. Ein entsprechendes Konzept bei WDM-Netzen könnte in einer kombinierten Verkehrlenkung auf Faserbasis (entspricht der Transportebene) und auf der Ebene einzelner Wellenlängen bestehen. Da aber bei optischen Netzen die Übertragungsraten sehr groß sind, ist die Verkehrlenkung auf Faserbasis bisher nur für Schutzmechanismen in Betracht gezogen worden.

### 3.4.2 Verkehrslenkungsverfahren für paketvermittelnde Netze

In diesem Abschnitt wird eine kurze Übersicht über einige bedeutende Verfahren für paketvermittelnde Netze gegeben. Dabei werden die Verfahren für IP-basierte Netze und für ATM-basierte Netze getrennt beschrieben. Während ATM-Netze verbindungsorientiert arbeiten, zählen IP-basierte Netze zu den verbindungslos arbeitenden Netzen. Bekanntester Vertreter ist das sogenannte Internet als der globale Verbund von IP-basierten Netzen.

#### 3.4.2.1 Verkehrslenkungsverfahren für IP-basierte Netze

Im ARPANET, allgemein als Vorläufer des heutigen Internet angesehen, wurde bereits 1969 ein verteilter, adaptiver Verkehrslenkungsalgorithmus mit abschnittsweiser Wegesuche für jedes Paket implementiert. Er basierte auf der verteilten Berechnung von kürzesten Wegen, wobei die Metrik eine Funktion der Verkehrslast war und die aktuellen Werte alle 625 ms zwischen den Rechnern ausgetauscht wurden. Hauptnachteil des Verfahrens war die hohe Instabilität bei Lastschwankungen. Nachfolgende Versionen des Verkehrslenkungsverfahrens versuchten dies zu verbessern, indem die Zeitintervalle für den Informationsaustausch erhöht und die erlaubten Änderungen bei einer Neuberechnung der Verkehrslenkungstabellen beschränkt wurden.

Ein weiterer Nachteil des ursprünglichen Verfahrens war die schlechte Skalierbarkeit mit wachsender Netzgröße. Seit das 1987 aufgebaute sogenannte NSFNET zum bedeutendsten Internet-Backbone wurde, ist das monatliche Wachstum des Internet auf geschätzte 15% angestiegen [63]. Außerdem steigt seit etwa 1995 auch die Anzahl von kommerziellen Netzen als weiteren Bestandteilen des Internet sprunghaft. Dadurch stellt sich die Struktur des Internet heute als eine komplexe Vermaschung sogenannter Autonomer Systeme (AS, *autonomous system*) dar. Ein AS ist eine Gruppe von Netzen und Routern, die unter einer einheitlichen Verwaltung stehen. Häufig besitzen zwar alle Rechner eines AS umfangreiche Informationen über den Netzzustand des AS, zu dem sie gehören, aber die internen Informationen werden nicht oder nur sehr eingeschränkt an ein anderes AS weitergegeben.

Aus den genannten Gründen des starken Wachstums und der Verbindung zahlreicher AS wurden neue Verkehrslenkungsverfahren erforderlich. Dabei wurde das Grundprinzip der abschnittsweisen Wegesuche für Einzelpakete, die jeweils die vollständige Zielinformation enthalten, beibehalten. Es entstanden eine ganze Reihe von Protokollen, von denen nachfolgend die wichtigsten Vertreter getrennt nach der Verwendung innerhalb oder zwischen AS kurz vorgestellt werden. Daneben gibt es weitere Protokolle, die zur Unterstützung eines Verkehrslenkungsverfahrens dienen können. Das wichtigste Beispiel ist ICMP (*Internet control message protocol*), das auch zum Austausch von Informationen dienen kann, die für die Verkehrslenkung wichtig sind (beispielsweise Fehlerursachen bei Verkehrslenkungsproblemen).

Weitere Details zu den Protokollen finden sich in der Literatur, beispielsweise in [37, 63, 113] und den dort aufgelisteten Quellen.

Generell gilt, dass sich die Definitionen der Verkehrslenkungsverfahren für IP-basierte Netze meist auf die protokolltechnische Realisierung beschränken, während als Strategien sehr einfache Shortest-Path-Strategien, oft sogar ohne Alternativwege, verwendet werden. Auch geschieht ein großer Teil der Konfigurationen für die Verkehrslenkung manuell über ein zentrales Netzmanagement. Es existieren inzwischen aber erste Ansätze zur rechnerunterstützten, teilweise automatischen Verkehrslenkung [78].

### Verkehrslenkung innerhalb eines Autonomen Systems

Die Verfahren hierfür werden mit IGP (*interior gateway protocol*) bezeichnet<sup>5</sup>. In vielen Netzen werden proprietäre, von einem zentralen Netzmanagement gesteuerte Verkehrslenkungsverfahren eingesetzt. Häufig werden statische Verkehrslenkungstabellen verwendet, die kürzeste Wege realisieren. Als Kriterium für die Kürze eines Weges wird praktisch ausschließlich die Anzahl der Verbindungsabschnitte (*hop*) berücksichtigt, die der Anzahl passierter Vermittlungsknoten (*router*) entspricht. Es können aber auch weitere Parameter wie Übertragungskapazität, Entfernung oder zu erwartender Verkehr zur Gewichtung der Wege verwendet werden [78, 113].

Bisher haben nur wenige der vorgeschlagenen Verfahren größere Verbreitung gefunden. Bei dem auf dem sogenannten HELLO-Protokoll basierenden Verfahren wurde die Verzögerung zwischen Knoten als Metrik verwendet. Die erforderliche Information wurde mit Hilfe von Zeitstempeln in den Nachrichtenpaketen gewonnen. Auf Grund von Stabilitätsproblemen, die auch durch den Einsatz verschiedener heuristischer Verbesserungen nicht befriedigend behoben werden konnten, wird dieses Verfahren inzwischen allerdings nicht mehr für die Verwendung empfohlen [63].

Zur Zeit finden hauptsächlich das *routing information protocol* (RIP) und *open shortest path first* (OSPF<sup>6</sup>) Verwendung [63]. RIP verwendet ein Distance-Vector-Protokoll, bei dem die Informationsverteilung alle 30 Sekunden stattfindet. OSPF basiert auf einem Link-State-Protokoll, das mehrere Wege zu einem bestimmten Ziel erlaubt und damit auch einfache Möglichkeiten für einen Lastausgleich oder für eine diensteabhängige Verkehrslenkung bietet. Bei beiden Verfahren beruht die zu Grunde liegende Verkehrslenkungsstrategie auf einem Shortest-

5. Der englische Begriff *protocol* lässt sich in diesem Zusammenhang nicht direkt mit dem deutschen „Protokoll“ übersetzen. Da weitergehende Aspekte mit eingeschlossen sind, wird hier der Begriff „Verfahren“ verwendet.
6. Das „Open“ steht nicht für eine Eigenschaft des Verfahrens, sondern dafür, dass das Protokoll im Sinne des „Open Source“-Gedankens lizenzfrei eingesetzt werden kann. Dies hat ganz wesentlich zur großen Verbreitung beigetragen.

Path-Prinzip, wobei die Gewichte der einzelnen Netzabschnitte statisch sind und nur bei Ausfällen im Netz verändert werden.

### **Verkehrslenkung zwischen Autonomen Systemen**

Die für die Realisierung der Verkehrslenkung zwischen Autonomen Systemen erforderlichen Verfahren werden mit *exterior gateway protocol* (EGP) bezeichnet. Wichtigster Vertreter ist das *border gateway protocol* (BGP). Es besitzt sowohl Eigenschaften eines Distance-Vector als auch eines Link-State-Protokolls. Es dient zum Austausch der Information, welche Rechner bzw. Netze erreichbar sind. Dabei können neben der Information, welcher nächste Abschnitt für ein bestimmtes Ziel zu wählen ist, auch ganze Pfade (hier bestehend aus einer Liste von Autonomen Systemen) mitgeteilt werden.

Da als einzige Metrik die Erreichbarkeit von Netzknoten verwendet wird, wird das Protokoll auch „Erreichbarkeits-Protokoll“ (*reachability protocol*) genannt. Diese Einschränkung hinsichtlich der verfügbaren Information verhindert die Realisierung von aufwändigen Verkehrslenkungsstrategien. Weitergehende Vorschläge lassen sich aber häufig schwer realisieren, da beispielsweise seitens der Netzbetreiber Sicherheitsbedenken gegen eine umfangreiche Informationsweitergabe bestehen.

### **Weitere Verkehrslenkungsverfahren**

Um auch in IP-basierten Netzen Dienstgüte (*quality of service*, QoS) unterstützen zu können, wurden zahlreiche Mechanismen entwickelt [80, 113]. Ein wichtiger Ansatz stellt das sogenannte „quality of service routing“ (*QoS-Routing*) oder „constraint based routing“ dar. Diese Verkehrslenkungsverfahren versuchen, durch entsprechende Wegewahl die geforderten QoS-Parameter einhalten zu können. Die zu Grunde liegenden Konzepte sind nicht auf IP-basierte Netze beschränkt, sondern können allgemein in paketvermittelnden Netzen eingesetzt werden. Einen Überblick enthalten beispielsweise [14], [56] und [113], eine Simulationsumgebung wird in [83] beschrieben, in [15] wird der für QoS-Verkehrslenkung zusätzlich erforderliche Aufwand untersucht, und die Problematik ungenauer Informationen über den Netzzustand wird in [104] behandelt. Ein spezielles Anwendungsgebiet ist die Übertragung von Sprache über IP-Netze. Hierfür werden in [185] einige Verkehrslenkungsverfahren vorgeschlagen und mit Hilfe von simulativen Leistungsuntersuchungen verglichen. Die Verfahren stellen Erweiterungen bekannter Verfahren aus Telefonnetzen oder der mit Internet-Protokollen realisierten Verfahren dar.

Zunehmende Bedeutung – insbesondere im Internet – erlangen Mehrpunkt-zu-Mehrpunkt-Dienste mit dem Sonderfall Punkt-zu-Mehrpunkt-Dienst (*multicast*). Zur effizienten Realisierung der zugehörigen Kommunikationsstruktur sind unter anderem auch entsprechende Verkehrslenkungsverfahren erforderlich. Eine Übersicht über einige Vorschläge findet sich bei-

spielsweise in [56, 280]. Da aber im Rahmen dieser Arbeit nur von Punkt-zu-Punkt-Verbindungen im Transportnetzbereich ausgegangen wird, werden diese Ansätze hier nicht näher betrachtet.

### 3.4.2.2 Verkehrslenkungsverfahren für ATM-Netze

ATM-Netze basieren auf virtuellen Verbindungen mit Paketvermittlung. Es existieren zwei Arten von Verbindungen: virtuelle Verbindungen (VCC, *virtual channel connection*) und virtuelle Pfade (VPC, *virtual path connection*), welche mehrere VCCs enthalten können. Die einzelnen Verbindungsabschnitte werden entsprechend mit VC (*virtual channel*) bzw. VP (*virtual path*) bezeichnet. Sowohl auf VCCs als auch auf VPCs können Verkehrslenkungsverfahren angewandt werden. Es besteht somit eine Analogie zu den klassischen Telefonnetzen, bei denen zwischen der Verkehrslenkung für einzelne Sprachkanäle und der Transport-Verkehrslenkung unterschieden wird.

Durch die spezifischen Eigenschaften von ATM ergeben sich aber einige Erweiterungen. Bei ATM ist eine Rekonfiguration bestehender Verbindungen möglich, die bei entsprechender Realisierung durch geeignete Pufferung der Pakete sogar verlustfrei erfolgen kann. Die Integration verschiedener Dienste mit möglicherweise sehr unterschiedlichen Verkehrscharakteristika erhöht in Zusammenhang mit statistischem Multiplexen die Schwierigkeit sowohl der Netzdimensionierung als auch der Verkehrslenkung, da die Entscheidung, ob auf einem Netzabschnitt noch genügend Ressourcen zur Annahme einer Verkehrsanforderung vorhanden sind, weiter erschwert wird. Schließlich ergeben sich durch die variable und während der Verbindung veränderbare Bandbreite sowohl von VPCs als auch VCCs neue Aspekte auch für die Verkehrslenkung.

In [289] werden einige der genannten Aspekte näher untersucht. Dabei werden dynamische Verkehrslenkung und dynamische Anpassung der VP-Bandbreite gemäß unterschiedlicher Strategien gemeinsam betrachtet. Die Ergebnisse zeigen den großen Einfluss des Bandbreitenmanagements zur Anpassung der VP-Bandbreiten. Allerdings beschränken sich die analytischen Untersuchungen auf einfache Verkehrsmodelle.

In [241] werden einige Verkehrslenkungsverfahren für virtuelle Pfade in ATM-Netzen untersucht, da reine VCC-Netze im Kernnetzbereich auf Grund der hohen Rufbearbeitungskomplexität deutliche Nachteile gegenüber VPC-Netzen haben. Es werden zwei Netzkonzepte unterschieden. Bei SHVP (*single hop virtual path*) sind alle Knotenpaare direkt mit (möglicherweise mehreren) VPCs verbunden, während bei MHVP (*multi hop virtual path*) ein VCC zwischen zwei Knoten auch über eine Verkettung von VPCs geführt werden kann. Meist wird dabei die Zahl der maximal verkettbaren VPCs auf zwei beschränkt.

Bei MHVP-Netzen können die Verkehrslenkungsverfahren aus klassischen durchschaltvermittelnden Netzen weitgehend übernommen werden, da ein Direktweg und ein oder mehrere

Alternativwege vorhanden sind. In der Literatur finden sich mehrere Vorschläge und Untersuchungen für entsprechende Verkehrslenkungsverfahren, beispielsweise in [23, 106, 241]. Als sehr vorteilhafte Strategie erweist sich – analog zu den Erkenntnissen aus Telefonnetzen – in diesen Untersuchungen ein zustandsabhängiges Verfahren mit Lastausgleich.

Für SHVP-Netze ergeben sich neue Fragestellungen, da nun die Knotenpaare unabhängig voneinander und jeweils über mehrere Direktwege miteinander verbunden sind. Ein Verkehrslenkungsverfahren muss nun entscheiden, welcher Weg gewählt wird, ohne dass sich der Verkehr unterschiedlicher Knotenpaare beeinflussen kann. Dies erfordert eine entsprechende Anpassung der bekannten Verfahren. In [241] werden drei solche Verfahren verglichen: eine alternative Verkehrslenkung mit fester Absuchreihenfolge, eine zustandsabhängige Verkehrslenkung mit Lastausgleich zwischen den Direktwegen, sowie eine zustandsabhängige Verkehrslenkung mit Lastbündelung, d. h. möglichst starker Verkehrskonzentration auf wenigen VPs. Die vergleichenden Untersuchungen erfolgten hauptsächlich simulativ und teilweise mit analytischen Näherungsverfahren, da eine exakte Berechnung aus Komplexitätsgründen nicht möglich ist. Die Ergebnisse zeigen, dass das auf Lastbündelung beruhende Verfahren die besten Ergebnisse erzielt und durch die zusätzliche Verwendung eines Schwellwertverfahrens die Fairness zwischen den Verkehrsklassen verbessert wird.

In letzter Zeit hat die PNNI-Spezifikation (*private network-network interface*) für ATM-Netze an Bedeutung gewonnen [17]. Teil der Spezifikation ist ein quellengesteuertes Verkehrslenkungsverfahren, das als wesentliche Komponente eine Bildung von logischen Hierarchie-Ebenen durch Gruppierung und Zusammenfassung von Netzknoten enthält. Das Grundprinzip dieser Hierarchiebildung ist der mit der Entfernung von einem Netzknoten abnehmende Detaillierungsgrad der verfügbaren Verkehrslenkungsinformationen, wodurch eine gute Skalierbarkeit auch für sehr große Netze erreicht wird. In der PNNI-Spezifikation [17] sind zwar die Protokolle für den Informationsaustausch sowie die grundsätzliche Arbeitsweise der Verkehrslenkung festgelegt, es gibt aber keine Aussagen über zu verwendende Strategien oder Informationen für die Verkehrslenkung. Aktuelle Untersuchungen beschäftigen sich vor allem mit dem Einfluss verschiedener Mechanismen für die Topologieaggregation [22] oder mit Verfahren zur Wahl einer günstigen logischen Netztopologie [276].

### **3.4.3 Verkehrslenkungsverfahren in MPLS-basierten Netzen**

Mit MPLS (*multi protocol label switching*) gewinnt ein Konzept zunehmend an Bedeutung, das ursprünglich für eine Vielzahl von Protokollen ausgelegt wurde, heute aber vor allem für IP-Netze basierend auf einer ATM-Netzebene eingesetzt wird [283]. Die Hauptelemente von MPLS sind ein schneller Weitergabemechanismus für Pakete sowie die Möglichkeit, durch eine Verkettung sogenannter *Labels* (Bezeichner) Wege durch bestimmte Netzbereiche explizit

---

festzulegen (*label switched path*, LSP). LSPs bieten prinzipiell deutlich mehr Möglichkeiten für ein effizientes Verkehrsmanagement als dies bei „klassischen“ IP-Netzen der Fall ist [20].

Die Einrichtung von LSPs stellt eine wichtige Verkehrslenkungsaufgabe dar. Hierfür wurden zwar bereits einige Protokolle entworfen, für die zu Grunde liegende Strategie hat sich aber noch keine Lösung durchsetzen können. Es gibt in der Literatur mehrere Vorschläge zu möglichen Parametern für LSPs – beispielsweise für Bandbreite, Prioritäten oder Schutzanforderungen – und Verfahren zur Wahl von Wegen für LSPs. Häufig basieren die vorgeschlagenen Verfahren auf Varianten der Berechnung von kürzesten Wegen, beispielsweise mit zusätzlicher Berücksichtigung der Auslastung oder der Auswirkungen auf zukünftig zu erwartende LSP-Anforderungen in einem Netz [18, 20]. In realen Netzen werden aber meist einfachere Mechanismen angewandt und die Einrichtung von LSPs erfolgt über ein zentrales Netzmanagement. Dieser Ansatz wurde auch für die in [292] beschriebene Realisierung eines großen IP-Kernnetzes unter Verwendung von MPLS gewählt.

Wie in Abschnitt 2.4 erwähnt, beschäftigen sich aktuelle Arbeiten mit der Erweiterung der MPLS-Konzepte auf optische Netze [21, 27, 72]. Bisher wurden für solche Netze aber noch keine neuen Verkehrslenkungsstrategien vorgestellt, sondern hauptsächlich Erweiterungen bekannter Verfahren diskutiert.

# Kapitel 4

## Verkehrslenkung in WDM-Netzen mit dynamischem Verbindungsauf- und abbau

In diesem Kapitel wird die Verkehrslenkung für WDM-Netze näher betrachtet. Dazu werden in Abschnitt 4.1 zuerst die spezifischen Aspekte für WDM-Netze aufgezeigt. Abschnitt 4.2 beinhaltet eine detaillierte Auswertung des momentanen Forschungsstandes für das betrachtete Themengebiet. Dies umfasst eine tabellarische Klassifizierung der relevanten Quellen aus der Literatur sowie eine genauere Beschreibung und Bewertung wesentlicher Arbeiten. Auf den Ergebnissen dieser Literatur-Auswertung aufbauend wird in Abschnitt 4.3 ein Entwurfsschema präsentiert, das die Darstellung einzelner Komponenten einer Verkehrslenkungsstrategie für WDM-Netze erlaubt. Abschließend werden in Abschnitt 4.4 dann ausgewählte Verfahren genauer beschrieben, die im Kapitel 6 quantitativ bewertet werden.

### 4.1 Spezifika der Verkehrslenkung für WDM-Transportnetze

Obwohl WDM-Transportnetze in vielen Punkten heutigen elektronischen Netzen ähneln, insbesondere solchen mit Durchschaltevermittlung, ergeben sich für die Verkehrslenkung eine Reihe spezifischer Aspekte. Einige davon sind auf Grund technologischer Unterschiede vollständig neu. Andere treten zwar auch bei heutigen Netzen auf, werden aber bei WDM-Netzen mit großer Wahrscheinlichkeit eine deutlich stärkere Rolle spielen.

#### 4.1.1 WDM-Technik

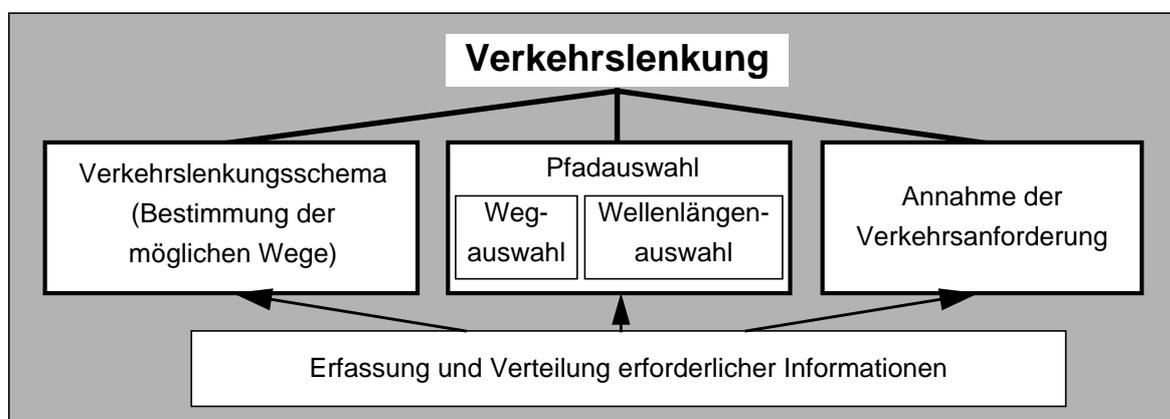
Bei WDM-Netzen sind auf jeder Faser und damit auf jedem Netzabschnitt mehrere getrennte (Wellenlängen-) Kanäle vorhanden. Ein Verkehrslenkungsverfahren muss daher nicht nur einen Weg von der Quelle zum Ziel finden, sondern auch freie Wellenlängenkanäle auf allen Abschnitten. Gegenüber dem allgemeinen Schema aus Bild 3.8 (Seite 72) ergibt sich damit ein erweitertes Aufgabenspektrum für die Verkehrslenkung in WDM-Netzen (siehe Bild 4.1). An

die Stelle der bisherigen Wegauswahl tritt nun eine Pfadauswahl, welche sowohl die Wahl eines Weges als auch die Wahl einer Wellenlänge für jeden Wegabschnitt umfasst. Die Auswahl einer Wellenlänge wird in der englischen Literatur häufig mit *wavelength assignment* (Wellenlängen-Zuweisung) bezeichnet.

Durch diese zusätzliche Aufgabe wird die Anzahl der Auswahlmöglichkeiten gegenüber bisherigen Verfahren erhöht. Beispielsweise ist bei einem starren Verkehrslenkungsschema nur ein Weg und damit keine Alternative für die Wegauswahl verfügbar. Bei Einsatz von WDM existieren nun aber auf diesem Weg mehrere Wellenlängenkanäle und damit mehrere Möglichkeiten, einen Pfad einzurichten. Dieser zusätzliche Freiheitsgrad führt zu einer großen Zunahme der Komplexität, da sich die Anzahl der Pfade und damit der Auswahlmöglichkeiten gegenüber rein weg-basierten Verkehrslenkungsverfahren deutlich erhöht (siehe auch analytische Abschätzungen im Anhang).

Bei der Auswahl einer Wellenlänge können mehrere Absuchstrategien zum Einsatz kommen. In der Literatur gibt es eine ganze Reihe von unterschiedlichen Beispielen, die sich in adaptive, d. h. vom Netzzustand abhängige, und nicht adaptive Strategien unterteilen lassen (siehe beispielsweise [151, 192, 299]). Die wichtigsten Grundverfahren sind nachfolgend kurz beschrieben.

- *nicht adaptive Verfahren* zur Wellenlängen-Auswahl:
  - *zufällige* Auswahl aus der Menge der freien Wellenlängenkanäle (im Folgenden auch mit *Rand* abgekürzt).
  - *sequentielle* Absuche der geordneten Menge aller Wellenlängen beginnend bei einer festen Start-Wellenlänge. Dieses Verfahren wird auch mit „First-Fit“-Absuche (FF) bezeichnet.



**Bild 4.1:** Hauptaufgaben eines Verkehrslenkungsverfahrens für WDM-Netze

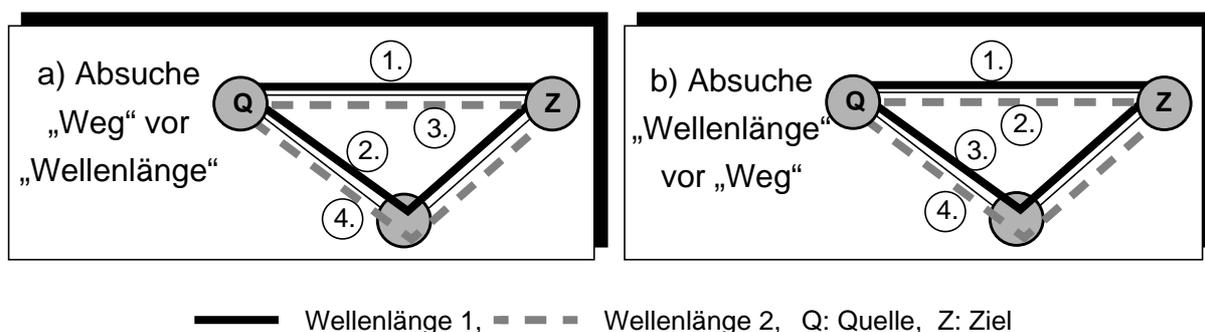
- *zyklische* Absuche, bei der im Unterschied zu *First-Fit* die Wellenlänge des letzten erfolgreichen Verbindungsaufbaus die Start-Wellenlänge der nächsten Absuche definiert.
- *adaptive Verfahren* zur Wellenlängen-Auswahl:
  - „Most-Used“ (MU, auch mit PACK bezeichnet): Die Wellenlängen werden entsprechend ihrer momentanen Verwendung im Netz abgesucht. Dabei wird mit der Wellenlänge begonnen, die zum Zeitpunkt der Absuche – summiert über alle Netzabschnitte – am häufigsten belegt ist (bei mehreren Fasern auf einem Link kann eine Wellenlänge auf diesem Link entsprechend mehrfach belegt sein).
  - „Least-Used“ (LU, auch mit SPREAD bezeichnet): Auch hier wird die netzweite Belegung der Wellenlängen als Absuchkriterium verwendet, die Suche beginnt bei der momentan am seltensten benutzten Wellenlänge (summiert über alle Netzabschnitte).

In der Literatur wurden weitere, aufwändigere adaptive Verfahren vorgeschlagen, die in Abschnitt 4.2 teilweise kurz vorgestellt werden. Diese Verfahren berücksichtigen häufig entweder Belegungszustände auf den möglichen Wegen einer Verbindungsanforderung oder die zusätzlichen Freiheitsgrade, die bei Netzen mit mehreren Fasern auf einem Link möglich sind.

Durch das Vorhandensein unterschiedlicher Wellenlängen ergeben sich neben der Reihenfolge, in der die Wellenlängen oder Wegalternativen abgesucht werden, auch neue Möglichkeiten hinsichtlich der Kombination von Wegauswahl und Wellenlängenauswahl. So können beispielsweise folgende Strategien unterschieden werden, die – wie in [246] gezeigt – Auswirkungen auf die Netzleistungsfähigkeit haben:

- Zuerst werden alle möglichen Wege für eine gegebene Wellenlänge abgesucht, ehe zur nächsten Wellenlänge gewechselt wird (siehe Bild 4.2 links).
- Zuerst werden alle Wellenlängen auf einem gegebenen Weg abgesucht, ehe der nächste Alternativweg untersucht wird (siehe Bild 4.2 rechts).

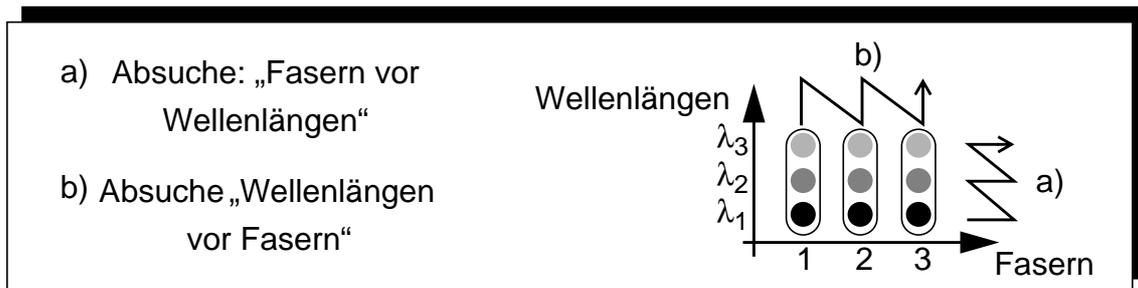
In Netzen mit mehreren Fasern auf den einzelnen Netzabschnitten ergibt sich ein weiterer Freiheitsgrad hinsichtlich der Suche nach einer Kombination aus Wellenlänge und Faser. In Netzen



**Bild 4.2:** Absuchstrategien bei der Belegung von Wellenlängen und der Wahl von Wegen

mit voller Konversion haben diese Absuchstrategien keinerlei Auswirkung. Bei Netzen ohne Konversion oder mit partieller Konversion können sie aber das Netzverhalten stark beeinflussen. Die beiden Grundverfahren sind:

- Absuche aller Fasern für eine Wellenlänge, ehe zur nächsten Wellenlänge gewechselt wird (siehe Bild 4.3a), und
- Absuche aller Wellenlängen auf einer Faser, ehe zur nächsten Faser gewechselt wird (siehe Bild 4.3b).

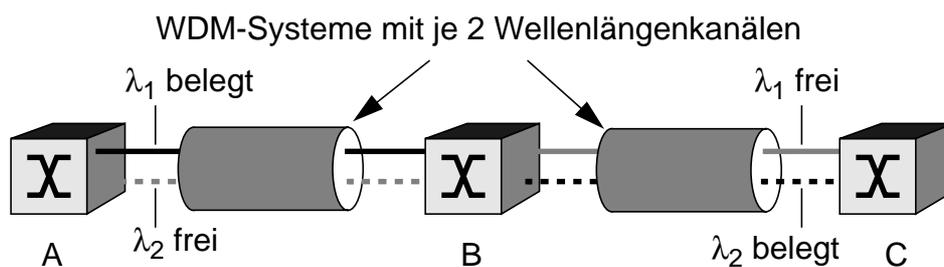


**Bild 4.3:** Neue Freiheitsgrade für die Kanalbelegung bei Verwendung mehrerer Fasern

#### 4.1.2 Wellenlängenkonversion

Bei vollständiger Konversion (WI-Netz, *wavelength interchanging*) kann in jedem Netzknoten jede ankommende Wellenlänge auf jede beliebige abgehende Wellenlänge umgesetzt werden. In diesem Fall haben Wellenlängen nur eine abschnittsweise Bedeutung. Diese WDM-Netze entsprechen aus funktionaler Sicht TDM-Netzen mit Zeitlagenumstieg. Falls jedoch keine vollständige Konversion vorhanden ist, bewirkt dies eine ganze Reihe von neuen Gesichtspunkten für die Verkehrslenkung:

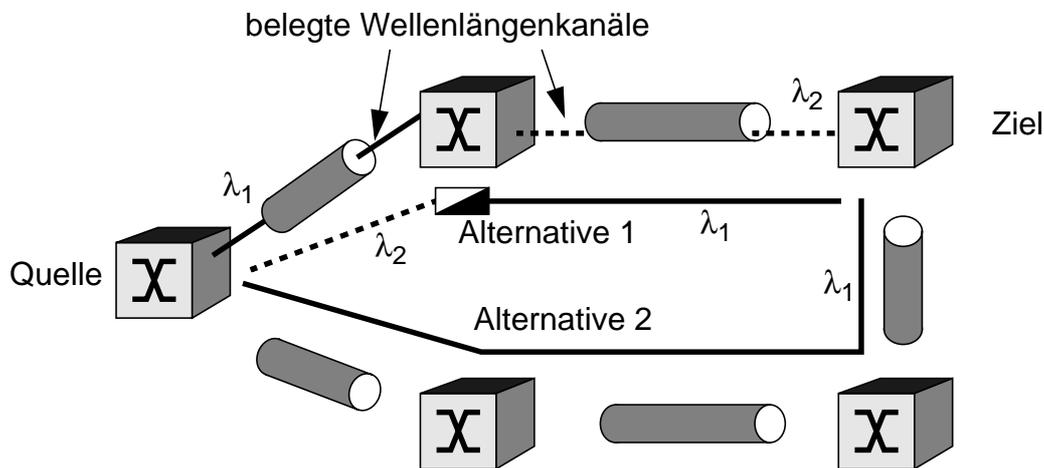
- Falls keine Konversion im Netz möglich ist (WR-Netz, *wavelength routing*), ergeben sich zusätzliche Beschränkungen für die Verkehrslenkung durch die erforderliche Beibehaltung einer Wellenlänge von der Quelle bis zum Ziel. Bild 4.4 zeigt ein Beispiel, in dem von Knoten A nach Knoten C keine durchgehende Wellenlänge gefunden werden kann, obwohl auf den Einzelabschnitten jeweils noch ein Kanal frei ist. In Netzen ohne



**Bild 4.4:** Einschränkung der Netzauslastung bei fehlender Konversionsmöglichkeit

Konversion wirkt sich somit auch die Strategie zur Belegung von Wellenlängen auf das Netzverhalten aus.

- Ist Konversion teilweise möglich, stellt die Verwendung von Wellenlängenkonvertern einen neuen Freiheitsgrad für die Verkehrslenkung dar. Insbesondere die Fragen, wie häufig und an welchen Stellen innerhalb eines optischen Pfades eine Konversion durchgeführt werden soll, sowie die Abwägung, ob ein längerer Weg zu Gunsten eines geringeren Konversionsbedarfs gewählt werden soll, lassen sich nicht allgemein beantworten. Bei dem in Bild 4.5 gezeigten Szenario stehen für eine neue Verbindung zwischen Quelle und Ziel zwei Alternativen zur Verfügung. Die erste Alternative nutzt den kürzesten Weg (2 Abschnitte). Da auf beiden Abschnitten jeweils einer der beiden vorhandenen Kanäle bereits belegt ist, ist aber eine Konversion erforderlich. Die zweite Alternative erfordert hingegen keine Konversion, dafür aber eine Kanalbelegung auf drei Abschnitten.

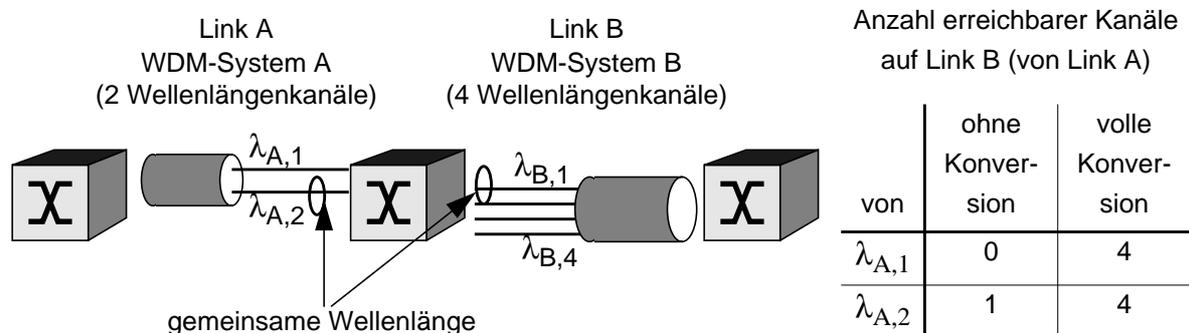


**Bild 4.5:** Zusammenhang zwischen Weglänge und Konversionsbedarf

- Bei bereichsbeschränkter Konversion kann nur auf eine begrenzte Menge der abgehenden Wellenlängen konvertiert werden. Dadurch ergibt sich eine beschränkte Erreichbarkeit der Ausgangskanäle eines Knotens. Dies führt wiederum dazu, dass die Absuchstrategie bei der Belegung eines freien Wellenlängenskanals Einfluss auf die erzielbare Netzleistungsfähigkeit hat.

Die Erreichbarkeit wird noch stärker eingeschränkt, wenn bei beschränkter Konversion unterschiedliche WDM-Systeme auf verschiedenen Netzabschnitten verwendet werden. Unterschiede können dabei sowohl hinsichtlich der Kanalzahl als auch der verwendeten Wellenlängen bestehen. Bei dem in Bild 4.6 dargestellten Beispiel besitzen die beiden WDM-Systeme nur eine gemeinsame Wellenlänge. Ist in diesem Fall im mittleren Knoten ein Konverter verfügbar, der eine Umsetzung über das gesamte Wellenlängenspektrum erlaubt, so ist eine deutlich bessere Ausnutzung der vorhandenen Übertragungsressourcen möglich: Dann kann eine

auf Link A und Wellenlänge  $\lambda_1$  ankommende Verbindung auf eine beliebige Wellenlänge des zweiten Links umgesetzt werden, was die Wahrscheinlichkeit für einen erfolgreichen Verbindungsaufbau deutlich erhöht.



**Bild 4.6:** Bedeutung von Wellenlängenkonversion bei unterschiedlichen WDM-Systemen

### 4.1.3 Dienste und Verkehrsverhalten

Für WDM-Transportnetze ist zu erwarten, dass sich einige Dienstparameter sowie das Verkehrsverhalten gegenüber heutigen Transportnetzen verändern werden.

- In der optischen Netzebene werden ganze Wellenlängenkanäle geschaltet, deren Übertragungsraten (nach momentanem Stand der Technik zwischen 2,5 und 40 Gbit/s) mehrere Größenordnungen über denen von heutigen Transportkanälen liegen können.
- Aufgrund der hohen Übertragungsraten wird zumindest ein Teil der optischen Pfade hohe Schutzanforderungen haben. Dadurch steigt die Bedeutung effizienter Schutzmechanismen.
- Während in heutigen Transportnetzen praktisch ausschließlich bidirektionale Verbindungen realisiert werden, sind für künftige optische Netze auch unidirektionale Verbindungen zu erwarten. Eine wesentliche Ursache hierfür ist nicht zuletzt die starke Unsymmetrie von Internet-Verkehr [281].
- Das Spektrum der von einer WDM-Transportebene zu erbringenden Dienste wird sich gegenüber heutigen Netzen weiter verbreitern. So werden einerseits Kanäle erforderlich sein, die als reine Transportkanäle für Aggregate bestehend aus einer sehr großen Anzahl kleiner Verkehrsströme verwendet werden, andererseits aber auch Kanäle, die als transparenter Datenkanal direkt einem Nutzer – beispielsweise einem Netzbetreiber oder einem Unternehmen – zur Verfügung stehen (sogenannte *leased line services*, die auf der Ebene von WDM-Kanälen häufig auch *leased wavelength services* genannt werden). Außerdem ist zu erwarten, dass die neuen, in Abschnitt 2.2.4 kurz vorgestellten *Burst-*

und *Label-Switching*-Konzepte erhöhte Anforderungen an die Rekonfigurierbarkeit der WDM-Ebene stellen werden.

- Durch die neuartigen Dienste und die großen Bandbreiten wird sich mit großer Wahrscheinlichkeit ein neues zeitliches Verkehrsverhalten auf der Transportebene ergeben, das sich heute noch nicht genau beschreiben lässt. Daher ist Robustheit gegenüber veränderlichen Verkehrsbedingungen eine Grundanforderung an künftige Verkehrslenkungsverfahren.

Schließlich gibt es noch eine Reihe weiterer Aspekte, die zwar ebenfalls größere Auswirkungen auf das Verhalten von WDM-Netzen haben, deren Bedeutung für die nahe Zukunft aber eher gering eingeschätzt wird. Beispielsweise wird bereits die Idee diskutiert, auf der optischen Ebene eine weitere Granularitätsstufe einzuführen, indem mehrere Wellenlängen zu einem Bündel (Wellenlängen-Bereich) zusammengefasst werden [62]. In solchen Netzen muss die Verkehrslenkung zusätzlich bestimmen, welche Wellenlängen auf welchen Abschnitten zusammengefasst werden sollen. Ein weiteres Beispiel ist die Unterstützung von Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen (*multicast*) direkt in der optischen Ebene [232, 261]. Punkt-zu-Mehrpunkt-Dienste werden auf Anwendungsebene bereits sehr bald eine große Bedeutung erlangen, doch innerhalb eines optischen Transportnetzes ist für die nähere Zukunft auf Grund der großen Bandbreiten weiter mit einer Dominanz von Punkt-zu-Punkt-Verbindungen zu rechnen. Längerfristig könnten diese Aspekte aber wichtiger werden, was neue Anforderungen an die Verkehrslenkung in WDM-Netzen bewirken würde.

#### **4.1.4 Technologische Aspekte und Netztopologie**

Für die Verkehrslenkung in WDM-Netzen ergeben sich aus physikalischen und technologischen Gründen weitere Randbedingungen. Deren konkrete Ausprägung hängt stark von der jeweiligen Netzrealisierung ab und wird sich deshalb auch durch technische Weiterentwicklungen in Zukunft verändern.

Ein Beispiel ist die Beschränkung der maximalen Länge eines optischen Pfades durch die gegenseitige Beeinflussung von Kanälen eines WDM-Systems. Außerdem wird beispielsweise aus Kostengründen oder auf Grund hoher Transparenzanforderungen vielfach nicht in jedem Knoten eine Regeneration für alle Kanäle vorhanden sein. Dadurch können sich für optische Pfade einerseits ebenfalls Begrenzungen hinsichtlich der maximalen Länge oder der maximalen Anzahl passierbarer Knoten ergeben. Andererseits ergeben sich für Verkehrslenkungsverfahren – ähnlich wie bereits für partielle Konversion beschrieben – neue Fragestellungen bezüglich der Verwendung von Regeneratoren.

In heutigen Transportnetzen wird die Anzahl der Vermittlungsknoten reduziert, indem mehrere kleinere Vermittlungsstellen zusammengefasst werden. Für die absehbare Zukunft besteht auch

bei optischen Transportnetzen ein Trend hin zu wenigen, dafür relativ großen Netzknoten. Dadurch werden sich optische Transportnetze hinsichtlich der Anzahl von Netzknoten sowie der Vermaschung von heutigen Telefon-Fernnetzen unterscheiden. Dies führt dazu, dass zahlreiche bekannte Verkehrslenkungsverfahren, welche auf die meist sehr stark vermaschten Telefon-Fernnetze optimiert sind, nicht ohne Anpassungen verwendet werden können.

## 4.2 Übersicht bekannter Untersuchungen für WDM-Netze

Dieser Abschnitt gibt eine Übersicht über die wesentlichen Veröffentlichungen zur Verkehrslenkung für dynamischen Verkehr in WDM-Netzen. Um den Rahmen der Arbeit nicht zu sprengen, werden die zur Netzplanung zählenden Arbeiten mit statischen Verkehrsannahmen nicht näher betrachtet. Teilweise werden für die dort erforderliche Festlegung der Verkehrsflüsse sehr ähnliche Strategien verwendet. Der Hauptunterschied liegt in der Realisierung: Für statische Verkehrsannahmen können bekannte Optimierungsverfahren eingesetzt werden, was für dynamischen Verkehr im Allgemeinen nicht möglich ist.

In den folgenden Abschnitten liegt der Schwerpunkt auf Betrachtungen zur Verkehrslenkungsstrategie und zu den berücksichtigten Randbedingungen. Viele der vorgestellten Arbeiten enthalten Beiträge zu mehreren der betrachteten Themenbereiche. Die Arbeit wird dann jeweils dort aufgeführt, wo der Schwerpunkt bzw. die Neuerung liegt. Weitere Informationen sind in der Übersichtstabelle 4.1 enthalten. Die der Tabelle nachfolgenden Abschnitte enthalten dann eine genauere Beschreibung (4.2.2 – 4.2.10) und Bewertung (4.2.11) der wesentlichen Quellen.

### 4.2.1 Tabellarische Klassifikation der Arbeiten

Die aus der Literatur bekannten Arbeiten werden an Hand folgender Kriterien in Tabelle 4.1 klassifiziert:

- Kriterien zur Beschreibung der *Verkehrslenkungsstrategie*:
  - Für das *Verkehrslenkungsschema* werden drei Gruppen unterschieden. Bei einem *starr* Schema gibt es nur eine einzige Wegemöglichkeit, ein *alternatives* Schema erlaubt die Auswahl aus mehreren vorberechneten Wegen, und ein *dynamisches* Schema erlaubt die Wegesuche direkt beim Auftreten eines Verbindungswunsches (oft in Kombination mit einem oder mehreren vorberechneten Wegen).
  - Bei einer *lastabhängigen dynamischen Wegesuche* wird der momentane Lastzustand im Netz bzw. auf den betroffenen Netzabschnitten berücksichtigt. Damit zählen entsprechende Verkehrslenkungsmethoden zu den adaptiven Verfahren.

**Tabelle 4.1:** Klassifikation von Arbeiten zur Verkehrslenkung in WDM-Netzen<sup>a</sup>

Quelle	Verkehrslenkungsstrategie					Technologie				Netztopologie <sup>b</sup>	Ankunftsprozess <sup>c</sup>	Bewertungs-kriterien <sup>d</sup>	Untersuchungs-methode <sup>e</sup>	Bemerkung <sup>f</sup>
	Verkehrslenkungs-schema			lastabhäng., dyn. Wegesuche	Wellenlängen-Absuche <sup>g</sup>	Konversion			Anzahl Faser-paare pro Link					
	fest, starr	fest, alternativ	dynamisch			keine	partiell <sup>h</sup>	voll-ständig						
[26]			X	(X)	div.	X			bel.	bel.	OO	B, D	S	
[31]	X				Rand	X		X	1	bel.	bel. <sup>1</sup>	B, D	A	
[39]	X			(X) <sup>j</sup>	Rand	X		X	1	bel.	P	B	A	
[54, 55]			X		k.A.	X	X	X	1	bel.	P	B	S	
[57]		X			k.A. <sup>k</sup>	k.A.	k.A.	k.A.	1	(bel.)	P	B, F	S	dez.
[67]	X				Rand	X			1	(bel.)	P	B	A	Res.
[92]		bel.			bel., FF	X	b		1	R,K,B	bel. <sup>1</sup>	B, W	A	G
[109]	X	X		X	div.	X			1	(bel.)	P	B, F	A/S	
[110]		X			FF <sup>m</sup>	(X)	X	(X)	1	bel.	P	B	A	
[124]	X				FF/Rand	(X)	X	(X)	1	bel.	P	B	S,(A)	Kon.
[135]	X				Rand	X		X	bel.	bel.	P	B	(A),S	
[143]	X	X		X <sup>o</sup>	div.	X		X	bel.	(bel.)	P	B	(A),S	
[144]	X			(X) <sup>j</sup>	div.	X		X	1	bel.	P	B, (F)	A	Ü
[141]			X		Rand	X	(X)	X	1	bel.	P	B	S	
[149]			X		k.A.	X			1	bel.	k.A.	V <sup>n</sup>	S	Prot.
[152]	X				FF	Konv. in Zugangskn.			1	bel.	P	B	S	Kon.
[153]	X				Rand	X		X	1	bel.	P	B, (F)	A	
[164, 165]			X		FF	X	X	X	1	bel.	P	B, F	S	
[166]			X		FF	X			1	(bel.)	P	B	S	RR
[168]		X		X <sup>o</sup>	Rand	X			bel.	(bel.)	P	B	A	
[169]		X		X <sup>o</sup>	Rand/FF	X			1	bel.	P	B	A, S	
[174, 175]	X		X	X	FF	X	X	X	1	R	nonP	B, F	S	
[182,183]	X	X			k.A.	X		X	1	(bel.)	P	B	S	dez.
[189]			X		FF	X	X	X	bel.	bel.	P	B	S	RR
[190]		X			k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1	(bel.)	P	B, F	S	dez.
[191]		X			k.A.	X			1	bel.	P	B	S	Prot.
[192]	X	X			FF	X			bel. <sup>p</sup>	bel.	P	B	A	Teil1
			X	X	div.	X			bel.	bel.	P	B	S	Teil2
[221,222]			beliebig			X		X	1	bel.	P	B, D	A/ILP	G
[216]	X			(X) <sup>j</sup>	Rand	X	X	X	1	bel.	P	B	A	Ü
[230]			X		impl.	X		X	1	bel.	P	B	S	
[250]	X				Rand	X			1	bel.	P	B	A	
[253]	X		X	X	FF	X		X	bel.	(bel.)	P	B	S	Prot.
[257]	X				Rand	X	p	X	1	bel.	P	B	A	
[259]	X			X	div.	X			bel.	bel.	P	B	S	
[260]	X				Rand	X	X	X	1	bel. <sup>q</sup>	nonP	B	A	
[266]	X				k.A.		p		1	(bel.)	bel. <sup>1</sup>	B	A	Kon.
[271]	X				Rand	X	b	X	1	bel.	P	B	A	
[277]			X		-			X	bel.	(bel.)	P	B	S	
[278]			X		impl.	X	p	X	1	bel.	P	B	S	Kon.
[279]			X		impl.	X	b	X	1	bel.	P	B	S	Kon.
[293]	X				FF <sup>r</sup>	(X)	p	X	1	bel.	P	B, F	S	Kon.
[299]	X	X			div.	X			bel.	(bel.)	P	B, F	S	
[300]	X			X	RCL	X		(X)	bel.	bel.	P	B	S	
[304]	X	X			Rand	X	(p)	X	1	(bel.)	P	B	A	
[305]	X				div.	X	(p)	X	1	bel.	P	B	(A), S	

- 
- a) Allgemeine Abkürzungen: bel.: beliebig; k.A.: keine Angabe; div.: diverse, im Text näher beschriebene Verfahren
  - b) B: Baum, K: lineare Kette, R: Ring
  - c) P: Poisson-Ankunftsprozess, nonP: nicht Poisson-Ankunftsprozesse (*non-Poisson*), OO: *On-Off-Modell*
  - d) B: Verluste, D: Durchsatz, F: Fairness (zwischen Knotenpaaren), W: Anzahl erforderlicher Wellenlängenkanäle
  - e) A: Analyse, S: Simulation, ILP: lineares Optimierungsverfahren (*integer linear programming*)
  - f) dez.: dezentrales Verkehrslenkungsverfahren; Ü: Übersichtsartikel mit ausführlichem Vergleich mehrerer anderer Quellen; G: Abschätzung von Grenzwerten; Kon.: Platzierung von Konvertern bei partieller Konversion; Prot.: Betrachtung von Schutzanforderungen für die Arbeitspfade (*protection*); RR: Umlegen von bestehenden Verbindungen (*re-routing*) erlaubt; Res.: Reservierung von Wellenlängenkanälen
  - g) FF: *First-Fit* (sequentielle Absuche), Rand: *Random* (zufällige Auswahl), RCL: *Relative Capacity Loss*; impl.: implizite Zuweisung der Wellenlänge durch dynamische *Shortest-Path*-Suche, welche sowohl den Weg als auch die Wellenlänge und mögliche Konversionen in einem Schritt berücksichtigt; div.: diverse Verfahren, schließen beispielsweise oft MU (*Most-Used*) und LU (*Least-Used*) mit ein
  - h) b: bereichsbeschränkte Konversion; p: punktuelle Konversion; X: Betrachtung mehrerer Varianten
  - i) Einziger Verkehrsparameter ist die Belegungswahrscheinlichkeit für jeden Wellenlängenkanal.
  - j) Es wird ein spezieller Fall für lastabhängige Verkehrslenkung betrachtet: „*Least-Loaded-Routing*“ bei Vollvermaschung.
  - k) Die verfügbaren Wellenlängen werden in Teilmengen unterteilt, die jeweils einer Anforderungspriorität zugeordnet sind; über die Absuche innerhalb einer Teilmenge wird keine Aussage gemacht.
  - l) Ankunftsprozess und Haltedauern werden nicht näher betrachtet, einziger Parameter ist die Last auf jedem Link.
  - m) Das Verfahren wird für *First-Fit* vorgestellt, kann prinzipiell aber auf beliebige, nicht zustandsabhängige Absuchstrategien angepasst werden.
  - n) V: Es werden die im Fehlerfall verlorenen Verbindungen betrachtet.
  - o) Es wird aus den vorgegebenen Alternativen ein Weg in Abhängigkeit der Auslastung gewählt.
  - p) Die Anzahl Fasern pro Link ist beliebig, muss aber für alle Abschnitte des Netzes gleich sein.
  - q) Es können nur Netze betrachtet werden, bei denen die Annahme der Unabhängigkeit der jeweiligen Link-Auslastung gerechtfertigt ist; betrachtet werden je ein Mesh-Torus- und ein Hypercube-Netz.
  - r) Die Wellenlängen werden so zugewiesen, dass die Anzahl der erforderlichen Konverter minimiert wird, gibt es bei gleicher Konverterzahl mehrere Möglichkeiten für die Zuweisung der Wellenlängen, so wird die *First-Fit*-Zuweisungsstrategie verwendet.

- Für die *Absuchstrategie* zur Belegung von Wellenlängen gibt es neben den in Abschnitt 4.1.1 genannten Beispielen (Rand, FF, MU, LU) weitere Möglichkeiten (siehe Abschnitt 4.2.6).
- Schließlich wird noch zwischen *globalen* und *abschnittswisen* Verfahren unterschieden. In diesem Kapitel – und auch in der Tabelle – werden überwiegend globale Verfahren behandelt, da sie auch in der Mehrzahl der Veröffentlichungen betrachtet werden.
- Kriterien zur Beschreibung der *Technologie*:
  - Wichtigstes technologisches Unterscheidungskriterium ist die *Konversionsmöglichkeit* im Netz. Dabei werden die Fälle *keine* Konversion, *vollständige* Konversion sowie *partielle* Konversion unterschieden. Innerhalb der partiellen Konversion gibt es drei Hauptvarianten: Bei begrenzter Konversion ist zwar in allen Knoten Konversion möglich, aber die Anzahl der Konverter ist geringer als die mögliche Anzahl der Kanäle im Knoten, bei punktueller Konversion besitzt nur ein Teil der Knoten Wellenlängenkonverter, und bei bereichsbeschränkter Konversion kann ein Wellenlängenkonverter jeweils nur innerhalb eines eingeschränkten Bereiches eine Konversion durchführen (siehe auch Abschnitt 2.2.2.2).
  - Die *Anzahl der Fasern pro Link* wird in den meisten Arbeiten auf eins beschränkt, was zahlreiche Betrachtungen vereinfacht. Mehrere Fasern pro Link erfordern zusätzliche Auswahlentscheidungen. Falls die Anzahl der Fasern außerdem für jeden Link individuell gewählt werden kann, ergeben sich durch die unterschiedliche Link-Kapazitäten neue Anforderungen an eine effiziente Verkehrslenkung.
  - Schließlich ist auch die *Anzahl der WDM-Kanäle pro Faser* ein entscheidendes Kriterium. Dieser Punkt wird in der Tabelle nicht separat aufgeführt, da alle bekannten Arbeiten von einem homogenen Netz ausgehen, d. h. auf allen Fasern steht die gleiche (meist beliebig wählbare) Anzahl von WDM-Kanälen zur Verfügung.
- Viele Untersuchungen aus der Literatur sind zwar prinzipiell auf beliebige *Netztopologien* anwendbar, aber nur wenige Arbeiten untersuchen den Einfluss unterschiedlicher Topologien.
- Bei den *Verkehrsparametern* werden folgende wichtige Kriterien unterschieden:
  - Der *Ankunftsprozess* beschreibt das Ankunftsverhalten der Verbindungswünsche. Meist wird hierfür Poisson-Verkehr angenommen.
  - Die zweite wichtige Größe ist die Verteilung für die *Haltedauer* der erfolgreich angenommenen Verbindungen. Da in allen bisherigen Arbeiten eine negativ-exponentielle Verteilung der Haltedauern angenommen wird, ist dieser Punkt in der Tabelle nicht gesondert aufgeführt.

- Bei den Untersuchungen werden unterschiedliche *Bewertungskriterien* verwendet. Sehr häufig werden die Gesamtverluste im Netz betrachtet, d. h. das Verhältnis abgelehnter Verbindungsanforderungen zur Gesamtanzahl aller Anforderungen. Daneben werden aber auch häufig die Verluste einzelner Knotenpaare in Abhängigkeit vom Abstand der jeweiligen Knoten betrachtet.
- Als *Untersuchungsmethode* kann entweder eine Analyse oder eine Simulation verwendet werden. In vielen Fällen kann auf Grund der hohen Problemkomplexität die Analyse nur approximativ erfolgen.

In Tabelle 4.1 werden einige für alle Arbeiten gemeinsam geltenden Punkte nicht mehr gesondert aufgeführt: Die Anzahl der WDM-Kanäle ist auf allen Fasern im Netz gleich, die Halte-dauern der Verbindungen sind negativ-exponentiell verteilt, es gibt nur eine Verkehrsklasse im Netz, außer in [57, 182, 183, 190] wird ein globales Verfahren betrachtet, und außer in [166, 189] wird vorausgesetzt, dass bestehende Verbindungen bei der Realisierung einer neuen Verbindung nicht beeinflusst werden dürfen. Eingeklammerte Zeichen bedeuten, dass das entsprechende Kriterium in der betreffenden Arbeit nicht explizit untersucht wird, dies aber prinzipiell mit dem jeweiligen Verfahren möglich wäre.

#### 4.2.2 Allgemeine Abschätzungen und Grenzwert-Betrachtungen

In einigen Arbeiten wird versucht, möglichst allgemein gültige Abschätzungen für die Leistungsfähigkeit von WDM-Netzen mit beliebigen Verkehrslenkungsstrategien zu geben. Ramaswami gibt in [221] (bzw. der erweiterten Zeitschriftenversion [222]) eine Abschätzung für Grenzwerte der Verlustwahrscheinlichkeit und des Durchsatzes für beliebige Verkehrslenkungsstrategien. Dabei wird von einer Faser pro Link sowie Poisson-Verkehr ausgegangen. Es werden nur die Fälle ohne Konversion und mit voller Konversion, nicht aber partielle Konversion betrachtet. Das Verfahren basiert auf linearer Optimierung und kann für beliebige Netztopologien verwendet werden. Die gewonnenen Grenzen entsprechen asymptotisch für eine sehr große Anzahl von Wellenlängenkanälen pro Faser den optimal erreichbaren Werten. Allerdings steigt bei dem Verfahren die Rechenzeit mit der Anzahl der Pfade exponentiell an.

Gerstel verfolgt in [92] einen anderen Ansatz: Er gibt für Ringnetze (teilweise auch für eine lineare Kette sowie ein baumförmiges Netz) eine analytische Abschätzung der minimal erforderlichen Anzahl von Wellenlängenkanälen, um ein beliebiges Verkehrsaufkommen ohne jeden Verlust (bzw. Blockierung) erfüllen zu können (*worst case*-Abschätzung). Der Verkehr wird dabei vereinfacht nur über die maximal auf einem Netzabschnitt auftretende Last charakterisiert. Für das Verkehrsverhalten wird neben statisch gegebenen Anforderungen und sequentiell auftretenden Anforderungen ohne Verbindungsabbau auch voll dynamischer Verkehr (Auf- und Abbau von Verbindungen) betrachtet. Es werden Grenzen sowohl für Netze ohne

Konversion als auch für limitierte Konversion gegeben. Die wesentlichen Ergebnisse sind: Für die ungünstigsten Szenarien ist eine deutliche Überdimensionierung der Netze erforderlich, dynamischer Verkehr erfordert deutlich mehr Kanäle als inkrementell wachsender Verkehr, und bereits ein sehr geringer Konversionsgrad im Netz führt zu deutlichen Verbesserungen gegenüber dem Fall ohne Konversion.

### 4.2.3 Untersuchung von starren Verkehrslenkungsschemata

In einer ganzen Reihe von Untersuchungen wird von starrer Verkehrslenkung ausgegangen, d. h. jedem Knotenpaar steht genau ein Weg für die jeweiligen Verbindungsanforderungen zur Verfügung. In diesem Fall ergibt sich ein deutlich einfacheres Problem als bei alternativen oder dynamischen Verkehrslenkungsschemata, und analytische Behandlungen sind in vielen Fällen – zumindest approximativ – möglich. Die meisten Untersuchungen konzentrieren sich auf die mögliche Reduktion der Verluste durch Konverter sowie den Einfluss von Absuchstrategien zur Belegung von Wellenlängen.

Der Übersichtsartikel von Karasan und Ayanoglu [144] enthält neben Betrachtungen zur statischen Netzplanung eine qualitative Übersicht zu Wellenlängen-Absuchstrategien sowie eine Übersicht zu analytischen Bewertungsansätzen für starre Verkehrslenkung. Der Fokus liegt dabei auf dem durch volle Konversion erzielbaren Gewinn gegenüber WR-Netzen (d. h. ohne Konversion) mit unterschiedlichen, aus der Literatur bekannten Algorithmen zur Zuweisung von Wellenlängen. Außerdem werden die wesentlichen Probleme der analytischen Bestimmung von Verlusten in WR-Netzen vorgestellt: Das Abweichen von der zufälligen Absuche der Wellenlängen führt zu einem hohen Berechnungsaufwand; außerdem ist für viele analytische Ansätze die stark vereinfachende Annahme erforderlich, dass Ereignisse auf verschiedenen Links sowie die Belegung unterschiedlicher Wellenlängen voneinander unabhängig sind. Der Beitrag enthält zusätzlich einen kurzen Vergleich einiger analytischer Ansätze für starre Verkehrslenkung mit zufälliger Wellenlängenauswahl aus grundlegenden, im Folgenden beschriebenen Arbeiten von Barry [31], Kovacevic [153] und Subramaniam [257].

Bei Kovacevic werden die einzelnen Links als unabhängig voneinander angenommen (hinsichtlich der Verluste und der Wellenlängenbelegung). Es wird der WR- sowie der WI-Fall mit Poisson-Verkehrsannahmen behandelt. Subramaniam erweitert dieses Modell, indem eine Lastkorrelation zwischen aufeinanderfolgenden Links berücksichtigt sowie auch punktuelle Konversion betrachtet werden. Barry stellt eine approximative Analyse vor, die im Vergleich zu den anderen Ansätzen eine deutlich geringere Komplexität der Berechnung besitzt. Außerdem wird von Barry ein *interference length* genannter Parameter als wesentliche Größe zur Bestimmung des Konversionseinflusses eingeführt. Dieser Parameter beschreibt im Wesentlichen die Anzahl der gemeinsamen Abschnitte zweier Verbindungsanforderungen. Damit stellt er eine entscheidende Einflussgröße für den möglichen Gewinn durch Konversion dar: In den

Grenzfällen „kein gemeinsamer Abschnitt“ und „alle Abschnitte gemeinsam“ kann durch Konversion keine Verbesserung erzielt werden, in allen anderen Fällen wirkt sich Konversion aus. Die analytische Methode von Barry wird von Jeong [135] auf Links mit mehreren Fasern erweitert. Diese Analyse wird nur für eine statische Netzdimensionierung verwendet, während für die Betrachtung dynamischen Verkehrs auf Simulationen zurückgegriffen wird.

Schließlich werden in [144] auch noch drei Mechanismen zur Erhöhung der Fairness zwischen kurzen und langen Verbindungen vorgestellt: Für starre Verkehrslenkung wird jeweils ein Reservierungsverfahren und ein Schwellenverfahren vorgestellt [40]. Hier werden Direktverbindungen (d. h. Verbindungen, die nur einen Abschnitt benötigen) zum Schutz von langen Pfaden nur zugelassen, wenn ein Minimum an freien Kanälen verfügbar ist. Dieses Minimum stellt den wesentlichen Parameter dieser Verfahren dar. Der dritte Mechanismus ist für Verfahren mit Alternativwegen anwendbar und beruht auf der Idee, längeren Pfaden mehr Alternativwege zu bieten als kürzeren Pfaden [109].

Der Übersichtsartikel von Ramamurthy [216] konzentriert sich auf die Thematik der Wellenlängenkonversion und behandelt dabei technologische Realisierungsmöglichkeiten, die Integration und Verwaltung im Netz, sowie den Einfluss auf die Leistungsfähigkeit. Zum letzten Punkt wird eine Übersicht über neuere analytische Bewertungsansätze gegeben. Im einzelnen werden die bereits oben beschriebenen Ansätze von Barry [31], Kovacevic [153] und Subramaniam [257] sowie eine weitere Arbeit von Birman [39] verglichen. Birman stellt ein aufwändiges Modell für WR- und WI-Netze vor, mit dem sowohl feste Verkehrslenkung (bei beliebiger Netztopologie) als auch Least-Loaded-Routing (allerdings nur für den Sonderfall eines vollvermaschten Netzes mit Beschränkung der Pfadlänge auf zwei Abschnitte) untersucht wird.

Tripathi erweitert in [271] Birmans Modell so, dass für feste Verkehrslenkung auch partielle Konversion durch bereichsbeschränkte Konverter untersucht werden kann. Die Ergebnisse zeigen, dass bei den untersuchten Szenarien bereits die Verwendung von Konvertern mit einem sehr kleinen Konversionsbereich (z. B. von der Eingangswellenlänge auf eine oder zwei Nachbarwellenlängen) vergleichbare Ergebnisse zu voller Konversion liefert.

Sridharan [250] stellt ebenfalls eine Verbesserung des Ansatzes von Birman vor. Es werden zwei analytische Verfahren für feste Verkehrslenkung in WR-Netzen beschrieben, die gegenüber den bisher in der Literatur vorgestellten Verfahren einen deutlich geringeren Rechenaufwand haben.

Diao betrachtet in [67] ein Reservierungsverfahren für Wellenlängenkanäle, für das er eine analytische Bewertung vorstellt. Die Analyse beruht allerdings auf einigen vereinfachenden Annahmen: Es wird – auch für Überlaufverkehr – Poisson-Verkehr angenommen, es gibt nur einen festen Weg für jedes Knotenpaar, und die Strecken, auf denen Reservierungen möglich sind, müssen vollständig disjunkt sein. Dazu zeigen die Ergebnisse nur in wenigen Fällen eine

Verringerung der Verluste durch Reservierung. Es wird allerdings nicht untersucht, inwieweit Reservierungen die Fairness zwischen Verbindungen mit unterschiedlicher Länge (d. h. unterschiedlicher Anzahl der Links zwischen den Endknoten der Verbindung) verbessern können.

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Arbeiten konzentrieren sich auf starre Verkehrslenkung. Diese tritt als Sonderfall aber auch in vielen der im nachfolgenden Abschnitt beschriebenen Ansätze zur Untersuchung von alternativen Verkehrslenkungsschemata auf.

#### **4.2.4 Untersuchung von alternativen Verkehrslenkungsschemata**

Steht eine Auswahl aus mehreren vorberechneten Wegen zur Verfügung, wird die analytische Behandlung bereits deutlich aufwändiger als bei starrer Verkehrslenkung. Harai stellt in [110] eine approximative Analyse für alternative Verkehrslenkung vor, die grundsätzlich für mehrere Wellenlängen-Absuchstrategien und für partielle Konversion anwendbar ist. Dazu wird das aus anderen Arbeiten bekannte mehrdimensionale Graphenmodell verwendet, bei dem jeder Wellenlänge im Netz eine Ebene des Graphen entspricht [54, 164]. In diesem Graphen müssen alle möglichen Pfade (d. h. die Kombinationen aus Weg und Wellenlängenbelegung) für jedes Knotenpaar vorab festgelegt werden. Dann können mit Hilfe einer *Bernoulli-Poisson-Pascal*-Näherung (BPP, siehe [95]) für den Überlaufverkehr die Verluste für jedes Knotenpaar bestimmt werden. Das Verfahren erreicht für eine geringe Anzahl von Wellenlängen eine gute Übereinstimmung mit Simulationsergebnissen, hat aber einige Nachteile: Die Abweichungen in den gezeigten Studien sind bereits bei acht Wellenlängen pro Faser sehr groß, es sind einige vereinfachende Annahmen erforderlich (Poisson-Ankunftsverkehr, nur eine Faser pro Link, keine Adaptivität möglich), das Verfahren muss speziell auf die Wellenlängen-Absuchstrategie abgestimmt werden, und der Berechnungsaufwand steigt für eine größere Anzahl möglicher Pfade sehr stark an (deshalb wurden alle Studien nur für den kürzesten Weg sowie *First-Fit*-Wellenlängenzuweisung durchgeführt).

Einen anderen Ansatz verfolgt Zhu [304]. Er stellt ein analytisches Verfahren vor, mit dem für eine vorgegebene Menge von Alternativwegen die Verlustwahrscheinlichkeit jedes Knotenpaars berechnet werden kann. Das Verfahren kann auch auf Netze angewandt werden, bei denen nur ein Teil der Knoten mit Konvertern bestückt ist. Es beruht auf einer Zerlegung der vorberechneten möglichen Wege in kurze Teilwege, auf die dann ein an anderer Stelle [303] beschriebenes Verfahren zur Berechnung der Verlustwahrscheinlichkeit eines Einzelpfades iterativ angewandt wird. Das Verfahren erfordert einige vereinfachende Annahmen, beispielsweise die Näherung des Überlaufverkehrs durch Poisson-Verkehr sowie eine feste Absuchreihenfolge der Alternativwege und eine zufällige Auswahl der Wellenlänge. Es berücksichtigt aber die Korrelation zwischen Links hinsichtlich Last und Verlustwahrscheinlichkeiten und liefert – insbesondere für kleinere Verluste – gute Übereinstimmungen mit der Simulation. Die durchgeführten Studien zeigen, dass die durch Alternativwege erzielbare Verbesserung stark

von der Topologie abhängt: Bei Knotenpaaren, bei denen Alternativwege deutlich länger als der Erstweg sind, ergeben sich kaum Verbesserungen.

In einer weiteren Arbeit von Harai wird ein alternatives Verkehrslenkungsschema mit einer adaptiven Pfadauswahl für WR-Netze kombiniert [109]. Dabei ist es ein Ziel, die Fairness zwischen unterschiedlich weit entfernten Knotenpaaren zu verbessern. Dies wird durch zwei Mechanismen erreicht: Zum einen stehen weiter entfernten Knotenpaaren mehr Wegmöglichkeiten zur Verfügung, zum anderen wird eine gewisse Anzahl von Kanälen eines Links für Anforderungen von Knotenpaaren mit einer Entfernung von mehr als einem Abschnitt reserviert. Schließlich wird noch eine adaptive Variante vorgeschlagen, welche den Belegungszustand aller Wellenlängen auf allen erlaubten Wegen berücksichtigt. Die Auswahl eines Pfades bestehend aus Weg und Wellenlänge wird anhand einer Zielfunktion getroffen, welche mit beliebiger Gewichtung folgende Parameter berücksichtigt: die insgesamt freien Kanäle, die Anzahl der Links eines Pfades, sowie die Anzahl der Links, auf denen die Wellenlänge frei ist. Während für vereinfachte Strategien eine approximative Analyse vorgestellt wird, werden die komplexeren Verfahren simulativ untersucht. Die Ergebnisse zeigen die erzielbare Reduktion der Verluste durch die Bereitstellung von Alternativwegen, die erzielbare Verbesserung der Fairness durch die Reservierungsstrategie, sowie die mögliche Verbesserung durch ein adaptives Verfahren. Bei letzterem werden nur einige der zahlreichen Möglichkeiten zur Gewichtung bei der Wege- und Wellenlängenauswahl für ein Beispielnetz betrachtet, eine Verbesserung wurde hierbei insbesondere bei größerer Anzahl von Wellenlängen pro Faser und bei geringer Last erzielt.

Die von Karasan und Ayanoglu in [143] vorgestellte adaptive Verkehrslenkungsstrategie kombiniert ebenfalls ein alternatives Verkehrslenkungsschema mit einer lastabhängigen Auswahl eines Paares Weg-Wellenlänge. Die Wegemenge wird aus den  $k$  kürzesten Wegen gebildet. Für die Pfadauswahl wird von den Autoren ein mit *least loaded routing* (LLR) bezeichnetes Verfahren vorgeschlagen. Dabei wird der Pfad so ausgewählt, dass die Anzahl der freien Kanäle auf der zu wählenden Wellenlänge des am stärksten belasteten Links maximal ist. Das Verfahren ist auch für Netze mit mehreren Fasern pro Link geeignet. Die Studien vergleichen WR- und WI-Netze und zeigen, dass bei einer ausreichenden Anzahl von Alternativwegen der zusätzliche Gewinn durch Konversion relativ gering wird.

Eine weitere Kombination eines alternativen Verkehrslenkungsschemas mit einer adaptiven Wegeauswahl stellt Li in [169] vor. Es werden zwei Varianten betrachtet. Beim FPLC-Verfahren (*fixed paths least congestion routing*) wird von den vorberechneten Wegen derjenige ausgewählt, der die maximale Anzahl freier Wellenlängenkanäle hat. Bei der mit FPLC-N( $k$ ) genannten Variante werden nur  $k$  Netzabschnitte vom Startknoten aus für die Auswahl berücksichtigt. Die Analyse basiert auf dem in [257] vorgestellten Ansatz und wird für WR-Netze mit zufälliger Absuche der Wellenlängen auf zwei disjunkten Alternativwegen angewandt. Die

zum Vergleich betrachtete *First-Fit*-Wellenlängenzuweisung wird simulativ untersucht. Die gezeigten Ergebnisse zeigen eine gute Leistungsfähigkeit der FPLC-Varianten gegenüber einer nicht adaptiven Auswahl aus  $k$  kürzesten Wegen sowie einen starken Einfluss der Strategie zur Wellenlängenauswahl. Allerdings weichen die Ergebnisse basierend auf der vorgestellten Analyse stark von den Simulationsergebnissen ab.

In [168] erweitert Li sein Verfahren auf Links mit mehreren Fasern unter Beibehaltung der anderen Randbedingungen. Dadurch ergeben sich mehrere Kriterien für die Entscheidung, welcher Weg als am wenigsten ausgelastet definiert wird. Dabei liefert bei dem untersuchten Netz die Gesamtanzahl freier Wellenlängkanäle die geringeren Verluste verglichen mit der Anzahl freier „Farben“. Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass sich mehrere Fasern auf einem Link ähnlich auswirken wie teilweise Wellenlängkonversion und zu einer deutlichen Senkung der Verlustwahrscheinlichkeiten führen können.

Mokhtar stellt in [192] ebenfalls ein analytisches Verfahren für ein alternatives Verkehrslenkungsschema vor. Die wesentliche Erweiterung besteht darin, dass das Verfahren für *First-Fit*-Wellenlängensuche und für Netze mit mehreren Fasern pro Link geeignet ist. Es werden eine Reihe von vereinfachenden Annahmen getroffen: Die Alternativwege sind vollständig kantendisjunkt, für den Verkehr auf sämtlichen Links (einschließlich des Überlaufverkehrs) wird Poisson-Verhalten angenommen, und das Verfahren kann nur für WR-Netze angewandt werden. Diese Vereinfachungen führen zu relativ großen und stark von der Netztopologie abhängigen Abweichungen zwischen Analyse und Simulation. Der zweite Teil dieser Veröffentlichung befasst sich mit dynamischer Wegesuche und wird inklusive der durchgeführten Studien im nächsten Abschnitt beschrieben.

Die Ergebnisse aller Untersuchungen mit mehreren Alternativwegen zeigen, dass durch Alternativwege eine deutliche Reduktion der Blockierung gegenüber starrer Verkehrslenkung erreicht werden kann. Eine weitere Verbesserungsmöglichkeit stellt die dynamische Wegesuche dar, zu der im folgenden Abschnitt einige Arbeiten vorgestellt werden.

#### **4.2.5 Untersuchung von dynamischen Verkehrslenkungsschemata**

Eine frühe und grundlegende Arbeit stammt von Lee und Li [164]. Dort werden zum ersten Mal *share-per-node*- und *share-per-link*-Strukturen für optische Cross-Connects vorgestellt, bei denen die vorhandenen Konverter für alle Verkehrsbeziehungen eines gesamten Knotens bzw. eines Links zur Verfügung stehen. Die Untersuchungen für dynamisches Verkehrsverhalten konzentrieren sich dann auf den möglichen Gewinn durch Konversion und die Bedeutung partieller Konversion. Für die Verkehrslenkung wird ein zentrales Verfahren mit dynamischer Wegesuche vorgeschlagen. Es beruht auf der Konstruktion eines Hilfsgraphen, bei dem jede vorhandene Wellenlänge („Farbe“) einer Ebene entspricht und Konverter als Verbindungen

zwischen diesen Ebenen repräsentiert werden. Auf diesem Graphen, der nur die freien Ressourcen im Netz repräsentiert, wird dann mit Hilfe eines „Algorithmus“ zur Suche des kürzesten Weges“ (*Shortest-Path-Algorithmus*, SP-Algorithmus) der momentan günstigste Weg für eine Anforderung gesucht. Ergeben sich mehrere gleichwertige Alternativen, wird eine Auswahl gemäß der *First-Fit-Wellenlängenabsuche* getroffen. Die Ergebnisse zeigen die Überlegenheit des *share-per-node*-Konzeptes im Vergleich zu *share-per-link* sowie die Tatsache, dass eine vollständige Konverterbestückung für das Erreichen möglichst geringer Blockierungen nicht erforderlich ist. Auch die Unterschiede hinsichtlich der Blockierung von unterschiedlich weit entfernten Knoten werden gezeigt. Außerdem weist Lee nach, dass die optimale Lösung der dynamischen Pfadzuweisung mindestens NP-vollständig ist<sup>1</sup>. Der Beweis beruht auf dem in [60] erbrachten Nachweis, dass bereits das einfachere Problem der optimalen statischen Wellenlängenzuweisung NP-vollständig ist. In einer leicht erweiterten Arbeit wird schließlich noch eine Heuristik für Multicast-Routing vorgestellt [165].

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt Chen [54, 55] zur Bewertung eines Netzes mit „Share-per-Node“-Konverterpools. Es wird ein leicht abgeändertes Graphenmodell eingeführt, bei dem Konverter durch Hilfsknoten berücksichtigt werden. Dieses Modell wird allerdings nur für die statische Netzdimensionierung verwendet, für die Untersuchung von dynamischem Verkehr wird ein vereinfachtes Modell benutzt, das dem Modell von Lee entspricht. Auch der Wegesuch-Algorithmus ist sehr ähnlich und beruht auf einer unbeschränkten Suche des kürzesten Weges in diesem Hilfsgraphen. Allerdings besitzt der von Chen vorgeschlagene Algorithmus eine deutlich geringere Komplexität ( $O(N^2 \cdot w^2)$  gegenüber  $O(N^4 \cdot w^2)$  bei Lee, wobei  $N$  der Anzahl der Cross-Connects und  $w$  der Anzahl der Wellenlängen entspricht). Die Ergebnisse bestätigen, dass mit wenigen Converters eine deutliche Reduktion der Blockierwahrscheinlichkeiten erreicht werden kann, während mit weiter steigender Konverterzahl nur noch geringe Verbesserungen erzielbar sind. Bei hoher Last kann die Blockierung mit Converters sogar höher ausfallen, als bei konverterlosen Netzen. Die Studien werden im Unterschied zu Lee für mehrere Netztopologien durchgeführt. Dabei zeigt sich auch eine Abhängigkeit der Ergebnisse von der Topologie: Die verbessernde Wirkung von Converters steigt mit der Netzgröße.

Zwei weitere Algorithmen für die dynamische Pfadsuche werden von Chlamtac [59] und Banerjee [28] vorgestellt. Beide verwenden einen ähnlichen, aus mehreren Ebenen bestehenden Hilfsgraphen, bei dem jede Ebene einer Wellenlänge entspricht. Während Banerjee nur Netze ohne Konversion betrachtet, werden bei Chlamtac Konverter durch entsprechende Links zwischen diesen Ebenen dargestellt. Zudem war das Hauptziel bei Chlamtac, einen Algorithmus zur Suche des kürzesten Pfades zu finden, der schneller als generelle SP-Algorithmen ist.

---

1. Optimal bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Pfadzuweisung bei jeder Verbindungsanforderung so zu erfolgen hat, dass die Blockierungswahrscheinlichkeit gemittelt über alle Anforderungen minimiert wird.

Dies gelingt, indem die Eigenschaft des Hilfsgraphen ausgenutzt wird, dass Nachbarknoten nur in der gleichen Ebene (d. h. über die gleiche Wellenlänge) oder in der gleichen Spalte (d. h. über einen Konversionslink) erreicht werden können.

Saha vergleicht in [230] die beiden Algorithmen von Chlamtac und Chen für dynamischen Verkehr. Dabei zeigt sich, dass beide Algorithmen ähnliche Blockierwahrscheinlichkeiten liefern, dass aber der Algorithmus von Chlamtac bei geringer Last, der von Chen bei sehr hoher Last im Netz die etwas geringere Blockierung liefert.

Mokhtar stellt in [192] neben einer analytischen Methode für ein alternatives Verkehrslenkungsschema (siehe Abschnitt 4.2.4) auch ein adaptives, dynamisches Verfahren vor, bei dem prinzipiell alle Wege zwischen einem Knotenpaar erlaubt sind. Es basiert auf Netzen ohne Konversion und sucht bei einer Verbindungsanforderung für alle Wellenlängen mit Hilfe eines SP-Algorithmus' nach einem gültigen Weg. Für die Absuchreihenfolge der Wellenlängen werden fünf Strategien untersucht. Neben den adaptiven Strategien PACK bzw. SPREAD (die am häufigsten bzw. am seltensten belegte Wellenlänge wird gewählt) werden auch die nicht-adaptiven Strategien zufällige Absuche, sequentielle Absuche und vollständige Absuche betrachtet. Die Untersuchungen zeigen, dass in vielen Fällen die Anzahl der möglichen Weg-Alternativen einen wesentlich größeren Einfluss auf die Netzblockierung als die Wellenlängen-Zuweisungsstrategie hat. Außerdem wird gezeigt, dass eine feste Absuchreihenfolge deutlich bessere Ergebnisse als eine zufällige Absuche liefert und gegenüber aufwändigeren, adaptiven Verfahren (wie z. B. PACK) kaum höhere Blockierungen aufweist. An einigen Beispielen wird zudem die Verringerung der Blockierwahrscheinlichkeit durch den Einsatz von mehreren Fasern auf einem Link gezeigt.

Van Parys skizziert in [277] ein Verkehrslenkungsverfahren, bei dem die dynamische Suche des kürzesten Pfades in zwei Stufen abläuft: Zuerst wird der bei der Netzplanung und Netzdimensionierung verwendete Weg für eine Verbindungsanforderung verwendet; ist dieser Weg blockiert, wird eine SP-Suche durchgeführt. Dieses Verfahren zeigt für den untersuchten WI-Fall leichte Vorteile bei geringer Last gegenüber der direkten Verwendung einer SP-Suche.

Den Einfluss der sogenannten „optischen Dienstgüte“, welche Übertragungseigenschaften der optischen Transportkanäle charakterisiert, untersucht Jukan [140, 141]. Es wird eine Verkehrslenkungsstrategie beschrieben, die verschiedene Klassen von Dienstgüteanforderungen berücksichtigen kann. Dazu werden sämtliche relevanten Netzressourcen (insbesondere die Wellenlängenkanäle) unterschiedlichen Dienstgüteklassen zugeordnet und – mit entsprechenden Kostenparametern versehen – in einem transformierten Netzgraphen berücksichtigt. In diesem wird dann mit SP-Berechnungen die Pfadsuche durchgeführt. Dieser integrierte Ansatz, bei dem Wegesuche und QoS-Bestimmung gemeinsam betrachtet werden, hat gegenüber dem sequentiellen Vorgehen (Wegesuche und anschließende Auswertung der QoS-Bedin-

gungen) den Vorteil, dass der Einfluss aller bestehenden Verbindungen auf (optische) Güteparameter direkt berücksichtigt werden kann.

#### 4.2.6 Absuchstrategien zur Belegung von Wellenlängenkanälen

In allen oben beschriebenen Arbeiten muss neben einem Verkehrslenkungsschema auch eine Absuchstrategie für Wellenlängen festgelegt sein. Daneben gibt es aber eine Reihe von Arbeiten, die speziell den Einfluss unterschiedlicher Absuchstrategien auf das Blockierungsverhalten im Netz untersuchen.

Karasan vergleicht in [143] die Absuchstrategien *Random*, *First-Fit* und *Most-Used* und stellt darüber hinaus zwei weitere lastabhängige Auswahlalgorithmen für starre Verkehrslenkung vor. Diese können in Netzen mit mehreren Fasern pro Link angewandt werden. Beim Algorithmus *Least-Loaded* (LL) wird diejenige Wellenlänge gewählt, die auf dem jeweils am stärksten belasteten Link die größte Restkapazität (d. h. die größte Anzahl noch unbelegter Kanäle) hat. Beim Algorithmus *Minimum-Sum* (MS) wird die Wellenlänge mit der geringsten mittleren Auslastung gewählt. Zur eventuell erforderlichen Auswahl zwischen gleichberechtigten Wellenlängen wird als zweites Kriterium die gesamte Verwendung im Netz betrachtet (*Most-Used*). Die meisten Untersuchungen in [143] basieren auf Simulationen, es wird aber auch ein analytisches Modell vorgestellt, das die Berechnung der *First-Fit*-Wellenlängenzuweisung bei starrer Verkehrslenkung erlaubt. Die Analyse berücksichtigt für die Beschreibung des Überlaufverkehrs von einer Wellenlänge auf eine andere einen iterativen Ansatz unter Verwendung des *Equivalent Random Modells* [95].

Eine Übersicht zu Verkehrslenkungsverfahren mit Schwerpunkt auf Wellenlängen-Absuchstrategien gibt Zang in [299]. Es werden nur Netze ohne Konversion sowie starre Verkehrslenkung betrachtet. Neben den bekannten Verfahren *Random*, *First-Fit*, *Most-Used* und *Least-Used* werden vier weitere Verfahren aus der Literatur vorgestellt. *Min-Product* [135] und *Least-Loaded* [143] wurden speziell für Netze mit mehreren Fasern pro Link entworfen (falls nur eine Faser vorhanden ist, entsprechen beide Verfahren der *First-Fit*-Absuche). *Min-Product* versucht, Fasern möglichst gut zu füllen. Bei *Least-Loaded* werden Wellenlängen so gewählt, dass eine möglichst große Restkapazität auf dem am stärksten belasteten Link entlang eines Weges verbleibt. Bei *Max-Sum* [259] handelt es sich um ein sehr aufwändiges Verfahren, bei dem die Pfade so gewählt werden, dass die Auswirkung auf alle künftig möglichen Anforderungen möglichst gering ist. Insbesondere müssen bei diesem Verfahren alle möglichen Pfade künftiger Anforderungen bekannt sein, was eine dynamische Wegesuche aus Komplexitätsgründen ausschließt. *Relative Capacity Loss* (RCL) [300] ist ein ähnliches Verfahren, bei dem aber nicht die Auswirkung einer Entscheidung auf das gesamte Netz, sondern auf die verbleibende Kapazität jeder einzelnen künftig möglichen Pfadanforderung berücksichtigt wird. Schließlich wird in [299] auch noch eine auf dem RCL-Verfahren basierende Erweiterung vor-

gestellt, die über ein dezentrales Protokoll realisierbar ist und zusätzlich adaptive Wegesuche ermöglicht. Zang vergleicht die Verfahren an Hand von Simulationen. Dabei wird die Ausbreitungsverzögerung für Zustands- und Reservierungsinformationen im Netz mit berücksichtigt. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu allen früheren ähnlichen Untersuchungen, bei denen vereinfachend von einer zentralen Instanz ausgegangen wird, die zu jedem Zeitpunkt die volle Kenntnis über den gesamten Netzzustand hat.

Ein neuerer Vergleich der Verfahren *First-Fit*, *Random*, *Most-Used* und *Least-Used* findet sich in der Arbeit von Zhu [305]. Dort werden sowohl für eine lineare Kette als auch für vermaschte Topologien die mit den verschiedenen Verfahren jeweils erzielbaren Verlustwahrscheinlichkeiten untersucht. Für sehr einfache und kleine Szenarien wird eine approximative Analyse basierend auf einem mehrdimensionalen Markoff-Zustandsraum vorgestellt. Bereits bei Szenarien mit mehr als zwei Netzabschnitten und mehr als zwei Wellenlängen pro Abschnitt wird die Analyse sehr aufwändig, so dass praktisch alle wesentlichen Ergebnisse simulativ abgeleitet werden. Neben dieser nur eingeschränkt verwendbaren Analyse enthält der Beitrag eine Untersuchung, wie sich unterschiedliche geographische Verteilungen der Verkehrsanforderungen auswirken. Es zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Leistungswerte vom jeweiligen Verkehrsmuster, das grundsätzliche Verhalten der verschiedenen Absuchstrategien bleibt jedoch erhalten. Insbesondere liefern das *Most-Used*-Verfahren und das sehr viel einfacher zu realisierende *First-Fit*-Verfahren sehr ähnliche Ergebnisse in allen untersuchten Szenarien.

Alle Arbeiten zur Untersuchung von Absuchstrategien für die Belegung von Wellenlängenkä-nälen zeigen:

- Die Absuchstrategie beeinflusst zwar die Leistungsfähigkeit eines Netzes ohne Konver-sion, hat aber eine deutlich geringere Bedeutung als die Einführung von alternativen Wegmöglichkeiten.
- Die in Analysen häufig zu Grunde gelegte zufällige Absuche liefert deutlich schlechtere Ergebnisse als eine sequentielle Absuche.
- Durch aufwändige adaptive Absuchverfahren kann gegenüber der sequentiellen Absuche eine Verbesserung erzielt werden. Diese ist allerdings bei allen gezeigten Studien sehr gering, so dass der deutlich höhere Realisierungs- bzw. Berechnungsaufwand in den meisten Fällen keine entsprechende Leistungsverbesserung mit sich bringt.

#### **4.2.7 Strategien zur Platzierung und Verwendung von Konvertern**

Für WDM-Netze mit partieller Konversion ist eine Strategie für die Zuteilung der Konverter zu Verbindungsanforderungen erforderlich. Im Verhältnis zur Gesamtanzahl von Veröffentlichun-gen zur Verkehrslenkung in WDM-Netzen gibt es zu diesem Themenbereich nur wenige Ver-öffentlichungen. Zwar gibt es eine Reihe von Arbeiten zur Platzierung einer begrenzten Anzahl

von Konvertern bei der Planung und Dimensionierung von WDM-Netzen, aber nur wenige dieser Arbeiten enthalten zusätzlich auch Betrachtungen für dynamische Verkehrsbedingungen.

Iness und Mukherjee untersuchen in [124] mehrere Strategien zur Platzierung von Konvertern für drei Konzepte partieller Konversion (volle Konversion in einigen Knoten; *share-per-node* oder *share-per-link* in allen Knoten; begrenztes Konversionsspektrum). Für die mit verschiedenen Platzierungsverfahren dimensionierten Netze werden ausführliche Leistungsuntersuchungen für dynamischen Verkehr durchgeführt. Dabei wird allerdings nur eine sehr einfache Verkehrslenkungsstrategie betrachtet, die keine optimierte Konverterverwendung beinhaltet (starre Verkehrslenkung mit *First-Fit*-Absuche der Wellenlängen entlang des kürzesten Pfades). Die Untersuchungen zeigen, dass die Höhe der Netzlast ebenso wie die Anzahl verfügbarer Wellenlängen große Auswirkungen auf die durch Konversion erzielbare Leistungssteigerung hat. Sie zeigen auch, dass bei einer optimierten Platzierungsstrategie die Blockierwahrscheinlichkeiten für partielle und für volle Konversion ähnliche Werte erreichen können, wohingegen bei ungünstiger Platzierung sehr große Unterschiede möglich sind.

Thiagarajan konzentriert sich in [266] auf die Entwicklung eines effizienten Platzierungsalgorithmus' für Netze, in denen nur eine Teilmenge der Knoten mit Konvertern bestückt ist. Die Bewertung der jeweiligen Dimensionierung erfolgt analytisch, wobei eine starre Verkehrslenkung entlang des kürzesten Weges zu Grunde gelegt wird. Über die Verwendung von Konvertern für eine Verbindungsanforderung sowie über die Absuchreihenfolge der Wellenlängenkanaäle wird keine Aussage gemacht. Die Studien bestätigen, dass bereits mit einer geringen Anzahl von optimal platzierten Konvertern ein zur vollen Konversion vergleichbares Blockierungsverhalten des Netzes erreicht werden kann.

In einem umfassenden Beitrag von Xiao und Leung [293] wird eine Strategie zur optimalen Platzierung einer beschränkten Anzahl von Konvertern sowie eine Strategie zur Belegung dieser Konverter für dynamischen Verkehr vorgestellt. Es werden Cross-Connects mit *share-per-node*-Struktur betrachtet, die eine beschränkte Anzahl von Konvertern ohne Bereichsbeschränkung haben können. Zur Platzierung der Konverter wird zuerst volle Konversion angenommen und die Konverterbelegung simulativ bestimmt. Hierbei werden für jede Verbindungsanforderung die Wellenlängen so gewählt, dass die Anzahl der erforderlichen Konversionen auf dem fest vorgegebenen Weg minimiert wird. Mit Hilfe der Belegungsverteilung wird dann in einer zweiten Stufe eine optimale Verteilung einer beschränkten Konverterzahl vorgenommen. Hierzu wird eine lineare Optimierung verwendet, für die mehrere Kosten- bzw. Zielfunktionen vorgestellt werden. Diese optimieren entweder auf den erzielbaren Gesamtdurchsatz oder auf die gleichmäßige Verteilung der Konverter. Schließlich werden die in dieser Weise dimensionierten Netze bewertet. Dazu wird eine Strategie zur Verwendung der vorhandenen Konverter bei dynamischem Verkehr vorgestellt, die auf einem SP-Algorithmus mit entsprechend angepassten Kantengewichten (auch für Konverter-Links) beruht. Dadurch wird sichergestellt, dass

die Anzahl der benötigten Konverter minimiert wird und gegebenenfalls dort ein Konverter belegt wird, wo noch die meisten freien vorhanden sind. Kommen mehrere Knoten in Frage, wird der Knoten mit der größten Konverteranzahl gewählt. Die für größere Beispielnetze durchgeführten Studien zeigen, dass mit diesem Verfahren bereits mit sehr geringer Konverteranzahl sowohl die Blockierwerte als auch die maximale Blockierung eines Knotens ähnlich zu den Werten bei voller Konversion sind. Allerdings unterscheiden sich maximale und durchschnittliche Blockierung immer noch sehr stark, und der Einfluss von Alternativwegen wird bei dieser Arbeit nicht betrachtet.

Eine Heuristik zur Platzierung von Konvertern stellt Venugopal in [278] vor, die von ihm in [279] auf Konverter mit beschränktem Konversionsbereich erweitert wird. Die mit diesen heuristischen Ansätzen dimensionierten Netze werden simulativ unter dynamischen Verkehrsbedingungen untersucht. Die Verkehrslenkung beruht auf einer adaptiven Pfad-Berechnung, die implizit auch eine Strategie zur Verwendung von Konvertern enthält. Dies wird über einen Hilfsgraphen für den verwendeten SP-Algorithmus erreicht, in dem die Konverter durch sogenannte Konversions-Links mit veränderlichem Kantengewicht repräsentiert werden. Es werden allerdings keine genauen Aussagen bzw. Untersuchungen gemacht, wie diese Gewichte für eine optimale Lösung festzulegen sind. Die Studien zeigen, dass der durch Konversion erzielbare Gewinn entscheidend von der Verkehrslast, dem Vermaschungsgrad und der Größe des Netzes abhängt. Gute Werte für die Blockierwahrscheinlichkeit ergeben sich, wenn die Konverter bevorzugt in Knoten mit hohem Vermaschungsgrad und damit auch mit hoher Verkehrslast platziert werden. Es wird ebenfalls gezeigt, dass bei geeigneter Platzierung Konverter mit beschränktem Konversionsbereich ähnliche Ergebnisse liefern wie unbeschränkte Konverter.

Einen Sonderfall für die Realisierung der Konversion betrachtet Kovacevic [152]. Es wird angenommen, dass Konversion nicht in den optischen Cross-Connects, sondern innerhalb der Zugangsknoten durch sogenannte „elektronische Konversion“ erfolgt. Dadurch erfordert eine Wellenlängenkonversion weitere Ressourcen in Form eines Empfängers und eines Senders sowie eines Wellenlängenkanals auf den Zugangs-Links. Aus diesem Grund wird eine Verkehrslenkungsstrategie vorgeschlagen, welche die Anzahl der benötigten Konversionen für jede Verbindungsanforderung minimiert. Allerdings wird auch hier von einer einzigen, fest vorgegebenen Wegmöglichkeit für jedes Knotenpaar ausgegangen. Es wird simulativ gezeigt, dass diese Art der Konversion tendenziell schlechter ist als Konversion innerhalb der Cross-Connects, was hauptsächlich an zusätzlichen Blockierungen auf den Zugangs-Links bei hoher Last liegt. Insbesondere bei großen Netzen und bei relativ geringer Auslastung sind bei der gewählten Verkehrslenkungsstrategie aber nur relativ wenige Konversionen für einen Pfad erforderlich, womit der Unterschied zur Konversion in den optischen Cross-Connects sehr gering wird.

Schließlich soll hier noch der umfangreiche Übersichtsbeitrag von Yates über Arbeiten zum Einfluss von Wellenlängenkonversion in rekonfigurierbaren WDM-Netzen erwähnt werden [297]. Dabei werden auch Vorschläge zur Verkehrslenkung bei dynamischem Verkehr betrachtet. Die allgemeine Schlussfolgerung ist, dass sich die umfangreiche Verwendung von Konvertern in WDM-Netzen aus Gründen der Leistungsfähigkeit allein nicht lohnt, da bereits mit partieller Konversion ein ähnliches Verhalten der Netze erreicht werden kann. Zu beachten ist aber, dass hinsichtlich der Verwendung von Konvertern in WDM-Netzen weitere Aspekte wie beispielsweise betriebliche Gesichtspunkte mit in Betracht gezogen werden müssen.

#### **4.2.8 Kombinierte Verkehrslenkung für Arbeits- und Schutzpfade**

Eine Reihe neuerer Arbeiten berücksichtigt Szenarien, bei denen eine Verbindungsanforderung neben dem Nutzpfad (Arbeitspfad) gleichzeitig auch Reservekapazitäten benötigt. Dadurch ergibt sich als neuer Parameter die Art der geforderten Absicherung der Nutzkapazitäten (sogenannte „Schutzanforderungen“). Neben einem dediziert zugeordneten und vollständig disjunkten Reservepfad ist auch eine gemeinsame Nutzung von Reservekapazitäten durch mehrere Arbeitspfade möglich.

In [253] untersuchen Struyve und Demeester simulativ drei Verkehrslenkungsstrategien (starre Verkehrslenkung entlang des kürzesten Weges; dynamische Berechnung des kürzesten Weges; dynamische Berechnung des kürzesten Weges mit lastabhängiger Annahmeschwelle) in Kombination mit drei Klassen von Schutzanforderungen der Verbindungswünsche (kein Schutz; gemeinsame Nutzung der Schutzpfade für disjunkte Arbeitspfade; dedizierte Schutzpfade). Es werden Netze ohne Konversion und Netze mit voller Konversion für Poisson-Verkehr betrachtet. Im WR-Fall werden die Wellenlängen nach der *First-Fit*-Strategie abgesucht. Die Ergebnisse zeigen, dass höhere Schutzanforderungen auch die Blockierung erhöhen, dass der Gewinn durch Konversion vor allem bei geringer Last und bei dynamischer Wegesuche mit lastabhängiger Annahmeschwelle groß ist, und dass die Verbesserung durch zusätzliche Alternativwege größer ist als die Verbesserung durch Konversion bei einem fest vorgegebenem Weg.

Auch Mohan betrachtet Verkehrslenkung für Arbeitspfade mit gleichzeitigen Schutzanforderungen [191]. Dabei wird eine neue Idee für die gemeinsame Nutzung von Reservekapazitäten durch mehrere Anforderungen vorgestellt: Falls zur Erfüllung einer Verbindungsanforderung erforderlich, können bereits reservierte Reservekapazitäten entweder durch andere Schutzpfade oder auch durch einen Arbeitspfad belegt werden. Dadurch können gewisse Fehlerfälle nicht mehr kompensiert werden, wodurch die Dienstgüte des Schutzmechanismus' reduziert wird. Andererseits sinkt durch die hierdurch mögliche höhere Auslastung des Netzes die Blockierwahrscheinlichkeit für Verbindungsanforderungen. Die Stärke dieses Effektes kann durch mehrere Parameter eingestellt werden. Die simulativen Untersuchungen werden für ein alter-

natives Verkehrslenkungsschema mit link-disjunkten Pfaden durchgeführt und zeigen, dass bei geringer Last bereits mit sehr kleiner Reduktion der Schutzgüte eine große Verbesserung der Leistungsfähigkeit erreicht werden kann.

Einen anderen Aspekt der gemeinsamen Verkehrslenkung für Arbeits- und Schutzpfade betrachtet Kodialam [149]. Es werden drei Fälle hinsichtlich der für die Verkehrslenkung verfügbaren Information untersucht: (i) es ist nur die insgesamt verfügbare Bandbreite auf einem Link bekannt, (ii) es ist die jeweils für Arbeits- und Schutzpfade belegte Bandbreite bekannt, und (iii) es ist der exakte Verlauf aller Arbeits- und Schutzpfade bekannt. Abhängig von dieser Information werden unterschiedlich aufwändige Mechanismen zur gemeinsamen Nutzung von Bandbreite für verschiedene Schutzpfade betrachtet. Für die Verkehrslenkung kommt dabei entweder eine einfache Heuristik oder ein auf linearer Optimierung basierendes Verfahren zum Einsatz. Die wichtigste Erkenntnis ist, dass bereits mit der Verfügbarkeit der unter (ii) beschriebenen teilweisen Information eine zur vollständigen Information vergleichbare Leistungsfähigkeit bei geringerem Realisierungsaufwand erreicht werden kann.

Die meisten Arbeiten zu Schutzmechanismen betrachten nur die Auswirkung von Einzelfehlern im Netz. Eine Ausnahme stellt das von Sengupta in [238] vorgeschlagene Verfahren dar, das auch für mehrfache Fehler geeignet ist. Dazu wird auf das sogenannte *Multihop*-Konzept zurückgegriffen: In einem Hilfsgraphen werden alle von einem Fehlerfall nicht betroffenen Pfadmöglichkeiten erfasst, zur Erfüllung einer Verbindungsanforderung kann dann ein Teil dieser Pfade verkettet werden.

## 4.2.9 Abschnittsweise Verfahren

Die bisher beschriebenen Untersuchungen gehen von einer zentralen Instanz mit vollständiger Information über das Netz aus, die alle Entscheidungen zur Verkehrslenkung trifft. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Arbeiten dagegen betrachten dezentrale, auf beschränkter lokaler Information an jedem Knoten beruhende Verfahren.

Mei schlägt in [182] verteilte Verfahren für WR- und WI-Netze vor. Er unterscheidet zwei Klassen an Hand des Ausgangspunktes der Reservierung: Diese kann entweder von der Quelle oder vom Ziel einer Verbindungsanforderung initiiert werden. In beiden Fällen ist eine Ende-zu-Ende-Signalisierung erforderlich und in den Simulationen wird die entsprechende Ausbreitungsverzögerung der Reservierungsnachrichten berücksichtigt. Die an einem Gitternetz durchgeführten Studien zeigen, dass bei verteilten Protokollen Konverter relativ große Verbesserungen bewirken, dass eine Reservierung durch das Ziel gegenüber einer Reservierung durch die Quelle vorteilhaft ist, und dass die Höhe der Ausbreitungsverzögerung einen starken Einfluss auf das Blockierverhalten hat.

In [183] erweitert Mei seine Verfahren in mehrfacher Hinsicht. Die Knoten haben zusätzliche, wenn auch nicht vollständige Informationen über den aktuellen Netzzustand, es wird eine Variante basierend auf einer „Ein-Weg-Reservierung“ (*one-way-reservation*) beschrieben, und schließlich eine sogenannte „genügsame“ (*frugal*) Reservierung vorgeschlagen. Bei dieser erfolgt eine Kanalreservierung nicht unmittelbar nach Eintreffen des Kontrollpaketes, sondern erst ab dem Zeitpunkt des tatsächlichen Verbindungsaufbaus. Insbesondere die beiden letzten Aspekte beinhalten Ideen, die von der Durchschaltvermittlung bereits hin zum *Burst Switching* führen [69, 213, 274, 287].

Mohan beschreibt in [190] ein verteilt arbeitendes Verkehrslenkungsverfahren, das als Besonderheit einen Mechanismus zur Verbesserung der Fairness zwischen unterschiedlich weit entfernten Knotenpaaren beinhaltet. Die Wegemenge besteht aus einer Menge kürzester Wege, die sequentiell abgesucht werden. Die im Netz vorhandenen Wellenlängen werden in zwei Gruppen aufgeteilt. Der Zugriff durch eine Verbindungsanforderung auf die erste Gruppe ist ohne Einschränkungen möglich, der Zugriff auf die zweite Gruppe wird durch dynamisch veränderliche Prioritäten geregelt. Diese Prioritäten werden abhängig von der Auslastung des Netzes und von der bisher von einem Knotenpaar erfahrenen Blockierung so angepasst, dass die Blockierwahrscheinlichkeiten für Knotenpaare mit unterschiedlichem Abstand ausgeglichen werden können. Über die Absuchreihenfolge der Wellenlängen innerhalb eines Bereiches sowie über die angenommene Konversionsfähigkeit des Netzes wird keine Aussage gemacht. Die simulativ gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass die Fairness zwischen den Knotenpaaren in einem weiten Bereich über die Prioritätenvergabe geregelt werden kann. Außerdem ist das vorgeschlagene Verfahren den in früherer Literatur beschriebenen Fairness-Mechanismen basierend auf starren Reservierungs- oder Schwellwert-Mechanismen [40] oder einer mit steigender Entfernung größer werdenden Menge von Alternativwegen [109] überlegen.

Zwei Varianten basierend auf dem SOC-Verfahren mit Crankback stellt Cheng vor [57]. Die Wellenlängenzuteilung berücksichtigt verschiedene Prioritäten der Verbindungsanforderungen. Bei der statischen Variante werden die verfügbaren Wellenlängen in Teilmengen unterteilt, die den jeweiligen Prioritäten fest zugeordnet sind. Bei der flexiblen Variante liegt nur die Anzahl der Wellenlängen jeder Prioritätsklasse fest, die Zuordnung einer Wellenlänge zu einer bestimmten Klasse kann flexibel erfolgen. Die sehr knappen Untersuchungen zeigen, dass mit dem flexiblen Verfahren eine geringere Gesamtblockierung erreicht werden kann.

Schließlich untersucht Ramaswami in [220] einige Realisierungsaspekte eines verteilten Protokolls für die Verkehrslenkung in WDM-Netzen, macht aber keine Aussagen zu Strategien für die Wegesuche oder Wellenlängenzuweisung. Das vorgeschlagene Protokoll arbeitet in zwei Phasen: Vor dem eigentlichen Verbindungsaufbau erfolgt eine von der Quelle initiierte Reservierungsphase.

## 4.2.10 Weitere Arbeiten

Neben den bisher genannten Arbeiten gibt es aus dem Themenbereich der Verkehrslenkung für dynamischen Verkehr in WDM-Netzen einige weitere Arbeiten mit speziellen Schwerpunkten oder Einschränkungen.

### Ringförmige Netze

So betrachten einige Autoren ausschließlich Ring-Netze, in denen jedem Knotenpaar maximal zwei Wege zur Verfügung stehen, was die Verkehrslenkung stark vereinfacht. Bala [24] untersucht die Fairness (d. h. die Differenz in der Blockierung zwischen Knotenpaaren mit unterschiedlichem Abstand) simulativ sowie mit zwei approximativen Analysen. Betrachtet werden zwei Parameter: die Anzahl der verfügbaren Wellenlängen sowie die Auswirkung von punktueller Konversion. Bei großen, aus verbundenen Ringen bestehenden Netzen ergibt sich bereits eine starke Reduktion der Blockierung bei Konversion in ungefähr 25% der Knoten während weitere Konverter nur geringe Verbesserungen liefern. Bei kleinen Ringen verläuft die Verbesserung gegenüber der Konverterzahl dagegen nahezu linear. Weitere Arbeiten zu Ring-Netzen stammen von Schein [235], der in seinem Modell zusätzlich Blockierungsmöglichkeiten an den Zugangsknoten (durch belegte Sender bzw. Empfänger) berücksichtigt, und Law [162], der Grenzen für den erzielbaren Durchsatz in *Hub*-basierten Ringnetzen (aller Verkehr von/zu einem Knoten) ohne Konversion ableitet.

### Verkehrsverhalten

Während fast alle Untersuchungen (insbesondere die analytischen Ansätze) Poisson-Verkehr für die Verbindungsanforderungen voraussetzen, gibt es inzwischen einige wenige Arbeiten, die auch ein anderes Verkehrsverhalten betrachten. Dabei konnte in vorbereitenden Untersuchungen für diese Arbeit bereits gezeigt werden, dass das Verkehrsverhalten einen starken Einfluss auf die Leistungsfähigkeit sowohl von abschnittswisen [247] als auch von globalen [245] Verkehrslenkungsstrategien haben kann.

Subramaniam [260] stellt ein analytisches Modell zur Berechnung der Blockierwahrscheinlichkeit vor, das neben Poisson-Verkehr auch andere Verkehrsmuster beinhaltet. Es werden zwei Verkehrsmodelle mit höherer bzw. geringerer Spitzigkeit als bei Poisson-Verkehr vorgestellt. Beide beruhen auf der in [95] näher beschriebenen *Bernoulli-Poisson-Pascal*-Näherungsmethode. Mit dieser wird ein Verhalten der Anforderungen auf einem Link beschrieben, bei dem der Zwischenankunftsabstand vom jeweiligen Netzzustand abhängig ist. Für die Verkehrslenkung werden statische kürzeste Wege und eine zufällige Auswahl der Wellenlängen verwendet, zwischen gleichlangen Wegen wird mit gleicher Wahrscheinlichkeit zufällig ausgewählt. Es wird auch partielle Konversion berücksichtigt, indem die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Knoten eine geforderte Konversion durchführen kann, als Parameter eingeführt wird.

Die Ergebnisse werden für zwei spezielle Beispielnetze abgeleitet, für welche die getroffene Annahme der Unabhängigkeit der Last auf unterschiedlichen Links relativ gut zutrifft. Die durchgeführten Studien zeigen, dass mit höherer Spitzigkeit des Verkehrs sowohl die Blockierwahrscheinlichkeiten stark zunehmen als auch die mögliche Reduktion der Blockierwahrscheinlichkeiten durch Konversion stark abnimmt. Andererseits ist die Steigerung der möglichen angebotenen Last für eine gegebene Blockierung durch Konversion in einem weiten Bereich unabhängig von der Spitzigkeit.

Auch Maier beschränkt sich nicht auf Poisson-Verkehr, betrachtet allerdings nur Ring-Netze. Er untersucht punktuelle [174] und bereichsbeschränkte [175] Konversion sowohl für eine Verkehrslenkung basierend auf einer dynamischen SP- als auch basierend auf einer *Least-Loaded-Path*-Suche. Neben einer Bestätigung dafür, dass Konversion in einer Teilmenge der Knoten ausreichend ist, liegt ein weiterer Schwerpunkt in beiden Arbeiten auf der Untersuchung von Verkehrsverhalten gemäß dem in [260] vorgestellten und oben beschriebenen Modell. Die interessante Erkenntnis hierbei ist, dass – jeweils verglichen mit Poisson-Verkehr – eine höhere Spitzigkeit des Verkehrs zu höheren Blockierungen aber auch zu höherer Fairness führt, während das Verhalten für Verkehr mit geringerer Spitzigkeit genau umgekehrt ist.

### **Umlegen bestehender Verbindungen**

Alle bisher zitierten Arbeiten setzen voraus, dass bestehende Verbindungen nicht durch eine neue Verbindungsanforderung beeinträchtigt werden, dass also insbesondere bereits eingerichtete Verbindungen nicht auf andere Pfade umgelegt werden dürfen. Diese Annahme ist für optische Transportnetze in vielen Fällen berechtigt, da bei Umkonfigurationen jeweils große Verkehrsströme beeinträchtigt würden. Es lassen sich aber – insbesondere beim Einsatz einer optischen Transportebene für Internet-Verkehr – auch Szenarien denken, bei denen kurzfristige Unterbrechungen bestehender Verkehrsflüsse erlaubt sein könnten, um anschließend eine insgesamt höhere Leistungsfähigkeit des Netzes zu erhalten. In diesem Fall können Verkehrslenkungsstrategien Mechanismen für das Umlegen bestehender Pfade (*re-routing*) beinhalten.

Ein entsprechendes Verfahren wird von Lee vorgeschlagen [166]. Er betrachtet Netze ohne Konversion mit einem zweistufigen Verkehrslenkungsverfahren. In einer ersten Phase wird für jede Wellenlänge der kürzeste freie Pfad berechnet, bei mehreren gleichlangen Pfaden wird eine sequentielle Absuche angewandt. Kann in dieser Phase für eine Anforderung kein Weg gefunden werden, so wird in der zweiten Phase untersucht, ob durch Umlegen einer minimalen Anzahl der bereits eingerichteten Verbindungen ein durchgehender Wellenlängenpfad gefunden werden kann. Dabei dürfen die Verbindungen nur auf andere Wellenlängen entlang des bestehenden Weges umgelegt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass mit diesem Verfahren die Blockierung in WR-Netzen deutlich gesenkt werden kann und sich der WI-Blockierung annähert.

Mohan [189] erweitert diese Arbeit von Lee, indem er Verfahren vorschlägt, die auch punktuelle Konversion und Netze mit mehreren Fasern pro Link behandeln können. Außerdem wird ein wesentlich effizienterer Algorithmus zur Pfadsuche vorgeschlagen, der auch die bei Lee vorgenommene Unterteilung in zwei Phasen aufhebt. Stattdessen kann durch Konstruktion eines entsprechend gewichteten Graphen die Suche nach einem freien Pfad einschließlich der minimal erforderlichen Pfad-Umlegungen in einem Schritt erfolgen. Die ausführlichen Studien bestätigen die Ergebnisse von Lee und zeigen, dass in den meisten Fällen nur wenige Pfad-Umlegungen erforderlich sind.

### Weitere Schwerpunkte

Einen neuartigen Ansatz für ein Verkehrslenkungsverfahren in WDM-Netzen stellen Hyytiä und Virtamo in [122] vor. Basierend auf einem sogenannten *Markov decision process* [226] wird ein aufwändiges, simulationsbasiertes Verfahren beschrieben, das eine beliebige Strategie zur Wegesuche und Wellenlängenzuweisung (*standard policy*) iterativ verbessern kann, wobei in dieser Arbeit nur ein Iterationsschritt durchgeführt wird. Dazu wird das gesamte System als Markoff-Prozess dargestellt und für jeden Zustand werden die künftigen „Kosten“ für alle möglichen Entscheidungsalternativen unter weiterer Anwendung der *standard policy* simulativ abgeschätzt. Ausgehend von diesen Abschätzungen wird die günstigste Entscheidung getroffen. Dabei zeigt sich, dass die iterativen Verfahren zwar die zu Grunde gelegten einfachen heuristischen Basisverfahren verbessern können, dass aber adaptive Verfahren die gleiche Güte bei weit geringerem Gesamtaufwand erreichen können. Hauptnachteile des beschriebenen iterativen Ansatzes sind der große Berechnungsaufwand (v. a. durch die eingebetteten Simulationen) und das Fehlen von explizit benennbaren Entscheidungsregeln.

Während in absehbarer Zeit optische Transportnetze tendenziell aus relativ wenigen, großen Knoten aufgebaut sein werden, hat Zhang bereits 1995 die bei sehr großen Netzen mit Millionen von Knoten auftauchenden Probleme betrachtet [302]. Er stellte Verkehrslenkungsverfahren und -algorithmen vor, die logarithmisch mit der Netzgröße skalieren. Dazu wird das Netz in Regionen und Ebenen aufgeteilt und die Verkehrslenkung in jedem Bereich separat durchgeführt. Für die Wegesuche innerhalb eines Bereiches werden einfache SP-Algorithmen verwendet. Allerdings berücksichtigt Zhang keinerlei besondere Spezifika optischer Netze: Er geht von einer Wellenlänge pro Link aus, jeder Ruf beansprucht einen festen Anteil der Bandbreite eines Wellenlängenkanals.

Bala betrachtet in [26] eine spezielle Variante optischer Netze, sogenannte *linear lightwave networks* (LLN, lineare optische Netze). Bei einem LLN sind innerhalb eines Wellenlängen-Bandes für die Signale nur die linearen Operationen Kombination, Aufteilung, Verstärkung möglich. Für die Verkehrslenkung ergibt sich ein neuer Freiheitsgrad durch die Wahl des Wellenlängen-Bandes. Die möglichst maximale Ausnutzung eines Bandes erweist sich als optimal; der höchste Netzdurchsatz ergibt sich bei einem Kanal pro Band (was einem „klassischen“

---

WDM-Netz entspricht). Obwohl LLNs technologisch einfacher zu realisieren sind als WDM-Netze basierend auf Cross-Connects, haben sie sich wegen der großen Fortschritte für das flexible Schalten von Wellenlängenkanälen nicht durchgesetzt.

#### 4.2.11 Bewertung der bisherigen Arbeiten

Eine zusammenfassende Betrachtung der zahlreichen in der Literatur vorgestellten Arbeiten zur Verkehrslenkung in WDM-Netzen mit dynamischem Verbindungsauf- und abbau lässt folgende Schlussfolgerungen zu.

- Es existieren jeweils zahlreiche Untersuchungen basierend auf Simulationen wie auch auf analytischen Ansätzen. Dabei zeigt sich, dass Analysen nur in stark vereinfachten Fällen, insbesondere im Hinblick auf die Komplexität der Verkehrslenkungsstrategie, eingesetzt werden können. Außerdem liegt bei einigen Analysen der Rechenzeitbedarf bereits in der gleichen Größenordnung wie bei Simulationen. Daher wird für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen weitgehend auf Simulationen zurückgegriffen.
- Der Einfluss unterschiedlicher Verkehrs-Charakteristika wurde bisher nur punktuell untersucht. Das Ankunftsverhalten der Verbindungsanforderungen wird in fast allen Arbeiten als Poisson-Prozess angenommen. Die Haltedauern der Verbindungen werden in allen Arbeiten als negativ-exponentiell angenommen. Deshalb wird in Abschnitt 6.3 ausführlich davon abweichendes Verkehrsverhalten untersucht.
- Es gibt zwar einige wenige Vorschläge für Verkehrslenkungsverfahren bei partieller Konversion, aber keine detaillierten Untersuchungen entsprechender Strategien. Insbesondere der Zusammenhang zwischen der Konverterverwendung und der Wahl von Alternativwegen wurde bisher nicht ausreichend untersucht. Aus diesem Grund werden in Kapitel 6 Strategien zur Verwendung von Konvertern genauer untersucht.
- In der Literatur wurden zwar zahlreiche Einzeleffekte, diese aber meist isoliert untersucht. Es fehlen sowohl umfassende Darstellungen der Wechselwirkung zwischen den zahlreichen Parametern als auch Untersuchungen mit Betrachtung möglichst vielfältiger Randbedingungen. Dies ist ein wichtiges Ziel der später vorgestellten quantitativen Untersuchungen.
- Entsprechend der großen Anzahl an Einflussgrößen wurde bisher auch keine umfassende, für beliebige Randbedingungen und einen möglichst großen Wertebereich der Parameter geeignete Verkehrslenkungsstrategie vorgestellt. Aus diesem Grund ist es ein wichtiges Ziel dieser Arbeit, die erforderlichen Komponenten einer möglichst vielseitig verwendbaren Strategie zu identifizieren.

## 4.3 Entwurf von Verkehrslenkungsstrategien

Basierend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Literatur-Auswertung stellt dieser Abschnitt ein mögliches Schema zur Darstellung der Komponenten („Teilstrategien“) einer Verkehrslenkungsstrategie für WDM-Netze mit dynamischem Verbindungsauf- und abbau dar. Das anschließende Unterkapitel 4.4 geht auf die in dieser Arbeit entworfenen und untersuchten konkreten Strategien näher ein.

In Abschnitt 4.3.1 werden zuerst Möglichkeiten für die Grundausrichtung eines Verkehrslenkungsverfahrens gezeigt. Diese kann durch weitere Teilstrategien ergänzt bzw. verfeinert werden, die getrennt nach globalen (Abschnitt 4.3.2) und abschnittsweisen (Abschnitt 4.3.3) Verfahren dargestellt werden. Mit *global*<sup>2</sup> werden dabei solche Verfahren bezeichnet, die eine Wegesuche Ende-zu-Ende, d. h. basierend auf Informationen über das gesamte Netz durchführen können, während einem *abschnittsweisen* Verfahren in jedem Knoten nur lokale Informationen zur Verfügung stehen. Schließlich wird im Abschnitt 4.3.4 noch die Interaktion zwischen Verkehrslenkung und Verbindungsannahme bei WDM-Netzen genauer betrachtet.

### 4.3.1 Grundausrichtung von Strategien für die Verkehrslenkung

Ein Hauptunterschied zwischen bekannten Strategien für elektronisch vermittelnde Netze und Strategien für WDM-Netze besteht darin, dass bei WDM-Netzen zusätzlich zur Auswahl eines Weges auch noch die Festlegung eines Wellenlängenkanals erfolgen muss (siehe Abschnitt 4.1). Um die daraus resultierende Vielzahl der denkbaren Varianten strukturieren zu können, werden im Folgenden die wesentlichen Bestandteile einer Verkehrslenkungsstrategie identifiziert und Gruppen zugeordnet.

Bild 4.7 zeigt mögliche Grundausrichtungen für die Verkehrslenkung sowie Beispiele für zugehörige Parameter bei WDM-Netzen. Die drei gezeigten Orientierungsmöglichkeiten können dabei mit unterschiedlicher Gewichtung kombiniert werden, wodurch eine große Anzahl von Strategien realisierbar wird. Die in dieser Arbeit untersuchten Strategien berücksichtigen ebenfalls alle Komponenten in variierender Kombination und Gewichtung. In realen Netzen können weitere Gesichtspunkte wie Entgelte, Verkehrstrennung oder administrative Aspekte (z. B. Festlegung auf einen bestimmten Betreiber) für die Verkehrslenkung eine Rolle spielen.

Die im Bild gezeigten Parameter können sowohl für einzelne Verbindungsanforderungen als auch netzweit betrachtet werden. Die Betrachtung der Weglängen findet sich in vielen vorgeschlagenen Verkehrslenkungsverfahren. Dies liegt vor allem daran, dass quasi beliebige Netz-

---

2. „Global“ wird hier nicht im umgangssprachlichen Sinne von „weltweit“, sondern im Sinne von „netzweit“, d. h. das gesamte betrachtete Kommunikationsnetz umfassend, verwendet.



**Bild 4.7:** *Mögliche Grundausrichtungen und Parameterbeispiele für die Verkehrslenkung*

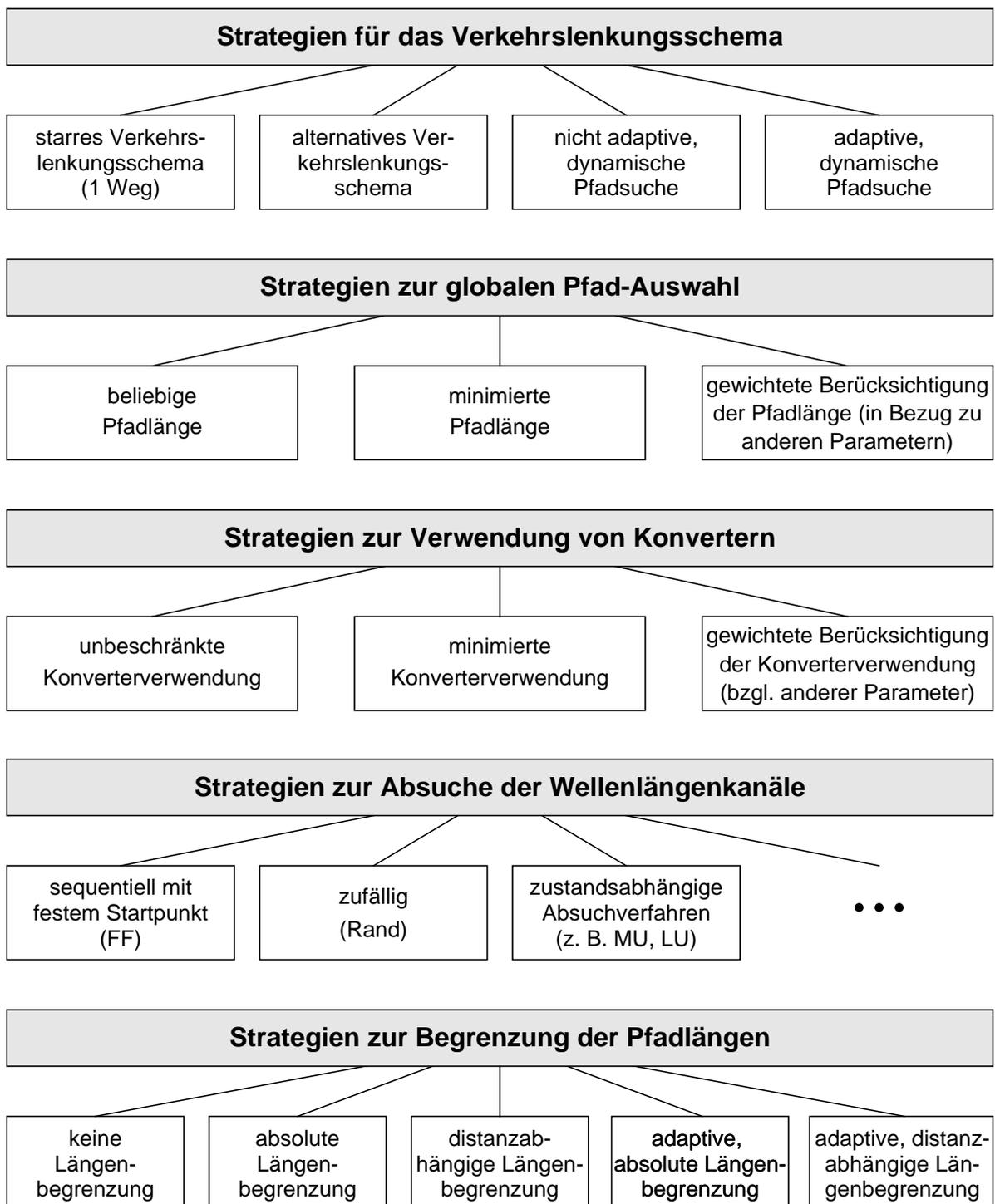
und Strategie-Eigenschaften durch die Modellierung mittels eines entsprechend gewichteten Graphen auf Weglängen abgebildet werden können und dann für die Wegesuche bekannte graphentheoretische Algorithmen zur Verfügung stehen. Vermittlungsressourcen wurden in bisherigen Netzen selten betrachtet, da die größere Ressourcen-Knappheit meist bei den Übertragungskapazitäten auftrat. In optischen Netzen liegt aber häufig die umgekehrte Situation vor, was eine entsprechende Anpassung der Verkehrslenkung nahelegt. Lastparameter schließlich werden häufig nicht isoliert, sondern in Kombination mit anderen Parametern berücksichtigt.

### 4.3.2 Bestandteile globaler Strategien

Die für globale Verkehrslenkungsstrategien angenommene Sicht auf das gesamte Netz erlaubt sehr differenzierte Mechanismen. Bild 4.8 stellt mögliche Bestandteile einer solchen globalen Strategie dar, wobei die Auflistung nur die wesentlichen Möglichkeiten umfasst:

- Für das Verkehrslenkungsschema wird unterschieden zwischen einem starren Schema, bei dem nur eine einzige Wegmöglichkeit für jedes Knotenpaar vorhanden ist, und einem alternativen Schema, bei dem mehrere Wegalternativen zur Verfügung stehen. Dazu kommen noch zwei Varianten für die dynamische, d. h. erst beim Auftreten eines Verbindungswunsches erfolgende Wegsuche: Diese kann den Netzzustand berücksichtigen (adaptiv) oder aber unabhängig von diesem realisiert sein (nicht adaptiv).
- Stehen mehrere Pfade für einen Verbindungswunsch zur Verfügung, gibt es unterschiedliche Vorgehensweisen zur Auswahl eines bestimmten Pfades aus dieser Menge. Oft berücksichtigt diese Entscheidung die Pfadlänge. Im einfachsten Fall kann die Pfadlänge beliebig sein. Häufig wird auch eine Minimierung der Pfadlänge angestrebt, oder sie wird in Kombination mit anderen Parametern berücksichtigt. Als Längenmaß können dabei unterschiedliche Größen wie beispielsweise geographische Distanzen oder die Anzahl der durchlaufenen Vermittlungsknoten verwendet werden.

- Während in WR-Netzen keine Konverter vorhanden sind und in WI-Netzen Konverter keinen Engpass darstellen und damit beliebig verwendet werden können, bekommt bei partieller Konversion die Strategie zur Verwendung von Convertern eine große Bedeutung. Es werden drei Fälle unterschieden:
  - unbeschränkte Konverterverwendung: entlang eines Weges dürfen Konverter bei Bedarf beliebig in Anspruch genommen werden,



**Bild 4.8:** Strukturierung der Bestandteile von globalen Verkehrslenkungsstrategien

- minimierte Konverterverwendung: die Minimierung der benötigten Anzahl von Konvertern hat höchste Priorität; dafür werden beispielsweise längere Pfade in Kauf genommen,
  - gewichtete Berücksichtigung der Konverterverwendung: die Verwendung von Konvertern wird gemeinsam mit anderen Parametern betrachtet, wozu eine entsprechende Gewichtung einer einzelnen Konverternutzung durchgeführt werden muss.
- Im Rahmen dieser Arbeit werden vier bedeutende Strategien zur Absuche von Wellenlängenkanälen verwendet, die bereits in Abschnitt 4.1 vorgestellt wurden. Zwei dieser Strategien sind nicht adaptiv (FF, Rand), zwei weitere sind adaptiv (MU, LU). Wie im Bild 4.8 angedeutet gibt es eine Vielzahl weiterer Vorschläge in der Literatur. Die durchgeführten und in Kapitel 6 beschriebenen Studien sowie Ergebnisse aus der Literatur [299] zeigen aber, dass die betrachteten Strategien das Spektrum der Möglichkeiten sehr gut abdecken.

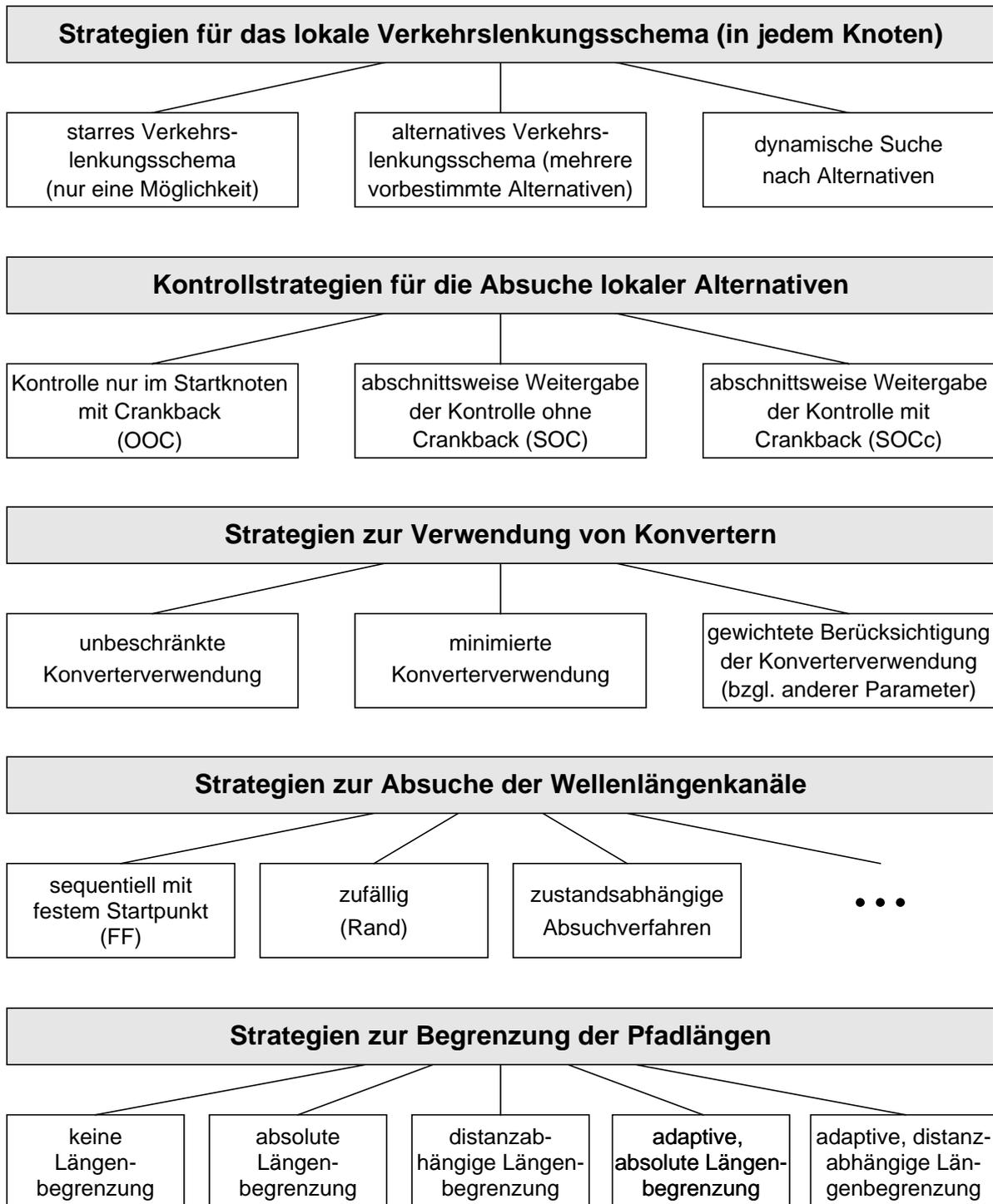
Die hier vorgestellten Wellenlängen-Absuchstrategien sind auch auf die Auswahl eines Weges aus mehreren gegebenen Alternativen übertragbar. In dieser Arbeit basieren alle untersuchten Verfahren mit vorgegebener Wegemenge auf einer Sortierung der Alternativen entsprechend ihrer Länge und einer sequentiellen Absuche beginnend bei der kürzesten Alternative. Aus diesem Grund wird die Wegauswahl im gezeigten Schema nicht separat aufgelistet.

- Begrenzungsstrategien legen den maximalen Umfang an Ressourcen fest, der für eine Verbindung erlaubt ist. In dieser Arbeit werden insbesondere verschiedene Strategien zur Begrenzung der Pfadlänge vorgestellt und untersucht. Im einfachsten Fall findet keine Begrenzung statt. Außerdem werden zwei nicht adaptive Verfahren betrachtet: Bei der absoluten Längenbegrenzung wird eine maximal zulässige Gesamtlänge gültig für alle Verbindungen im Netz verwendet, bei der distanzabhängigen Längenbegrenzung hängt die zulässige Maximallänge von der Distanz der Endknoten einer Verbindungsanforderung ab. Die Länge wird dabei jeweils durch die Anzahl der Verbindungsabschnitte definiert, die Distanz zweier Knoten entspricht der Länge des kürzesten Weges zwischen diesen Knoten. Bei den beiden adaptiven Verfahren wird die eben beschriebene absolute oder distanzabhängige Begrenzung nur ab einer bestimmten Belegung der betroffenen Übertragungsstrecken berücksichtigt. Für die Belegung können dabei jeweils die maximale oder die durchschnittliche Belegung entlang eines Weges berücksichtigt werden.

### 4.3.3 Bestandteile abschnittsweiser Strategien

Bild 4.9 zeigt eine Strukturierung der wesentlichen Elemente von abschnittsweise arbeitenden Strategien. Zur Realisierung eines Verbindungsaufbaus besitzt jeder Knoten eine *Verkehrslenkungstabelle*, die zu jedem möglichen Ziel den für den nächsten Verbindungsabschnitt zu wäh-

lenden Nachbarknoten (bzw. die Liste der möglichen Nachbarknoten) enthält. Jeder Knoten trifft nur lokale Entscheidungen und hat keinen Einfluss auf Entscheidungen in nachfolgenden Knoten. Dadurch ändern sich die ersten beiden Komponenten im Vergleich zum Schema für globale Strategien:



**Bild 4.9:** Strukturierung der Bestandteile von abschnittswisen Verkehrslenkungsstrategien

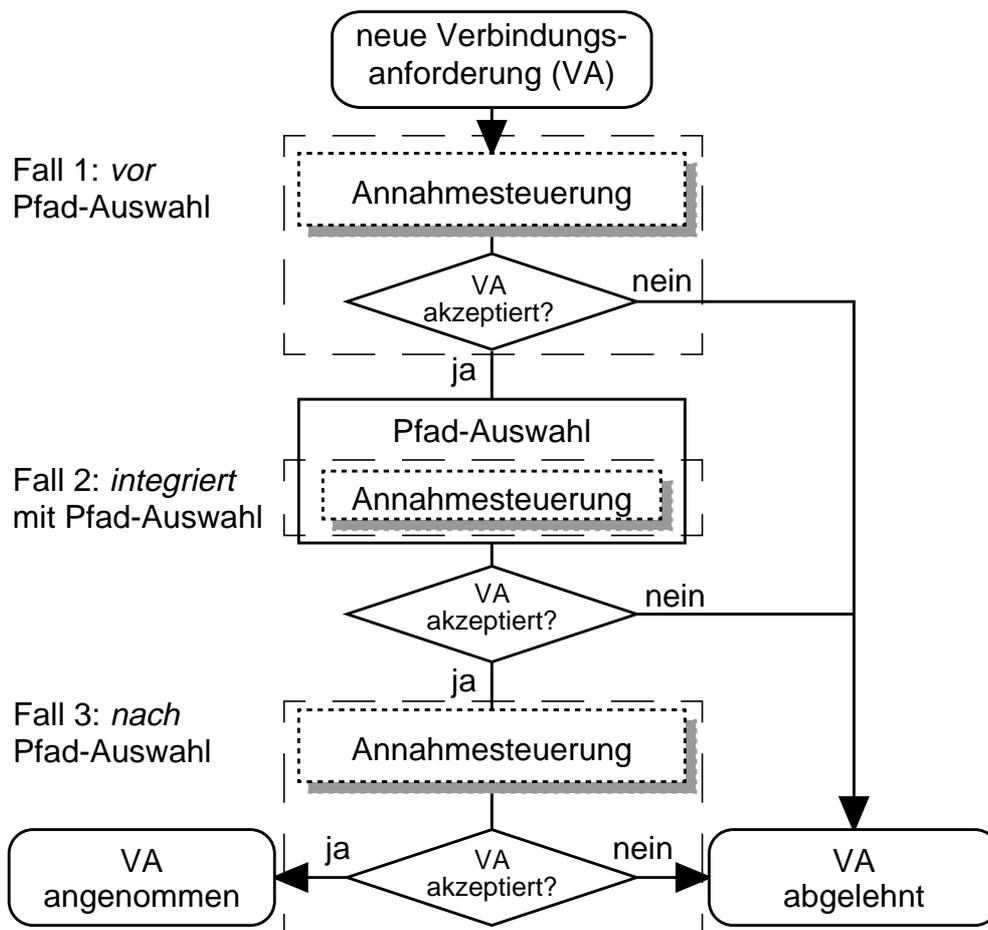
- Das Verkehrslenkungsschema beschreibt für jeden Zielknoten die Nachbarknoten, welche für den nächsten Abschnitt zu diesem Ziel verwendet werden können. Bei allen in dieser Arbeit betrachteten Verfahren ist die Auswahl einer Alternative nur vom Ziel der Verbindungsanforderung abhängig, nicht von der Quelle. Es kann nur ein einzelner Nachbarknoten erlaubt sein (starres Schema), oder es können mehrere Nachbarknoten zur Auswahl stehen (alternatives Schema). Eine dynamische Suche ist ebenfalls denkbar; da bei den meisten Netztopologien jeder Knoten nur eine geringe Anzahl von Nachbarknoten hat, kommt dieser Variante jedoch eine geringe Bedeutung zu.
- An die Stelle der bei globalen Verfahren beschriebenen Pfadauswahl treten nun Verfahren für die knotenübergreifende Kontrolle der Absuche lokaler Alternativen. Es werden drei Hauptvarianten hinsichtlich der Kontrolle über die Auswahl von Wegalternativen betrachtet, die bereits aus der Literatur zu elektronisch vermittelnden Netzen, insbesondere Telefonnetzen, bekannt sind. Bei allen Verfahren ist sichergestellt, dass eventuell bereits reservierte Ressourcen beim Scheitern eines Verbindungsaufbaus wieder frei gegeben werden.
  - Beim OOC-Verfahren (*originating office control*) kann nur der Startknoten zwischen alternativen Nachbarknoten wählen, alle folgenden Knoten bis zum Ziel müssen jeweils den Erstweg wählen. Ist der Erstweg an einem Knoten nicht verfügbar (weil entweder alle Kanäle belegt sind oder aber auf freie Wellenlängen wegen fehlender Konverter nicht zugegriffen werden kann), so wird die Kontrolle an den Startknoten zurückgegeben (*crankback*). Dieser kann eventuell vorhandene Alternativen wählen.
  - Beim SOC-Verfahren (*sequential office control*) wird nach jeder erfolgreichen Belegung eines Abschnittes die Kontrolle zum entsprechenden Folgeknoten weiter gegeben. Hat an irgendeiner Stelle des Verbindungsaufbaus ein Knoten alle seine Alternativen abgesucht, ohne einen weiterführenden Abschnitt zum gesuchten Zielknoten belegen zu können, wird der Verbindungswunsch abgelehnt.
  - Bei SOCc (*sequential office control with crankback*) ist zusätzlich zur Weitergabe an den Nachfolgeknoten entsprechend dem SOC-Verfahren auch eine Rückgabe der Kontrolle an den Vorgängerknoten (*crankback*) möglich, falls ein Knoten alle seine Alternativen erfolglos abgesucht hat.

Die restlichen drei Teilstrategien in Bild 4.9 zur Verwendung von Converttern, zur Absuche der Wellenlängen und zur Begrenzung der Pfadlängen behalten im Wesentlichen ihre Bedeutung bei. Dabei ist zu beachten, dass in jedem Knoten nur lokale und keine netzweiten Informationen vorliegen. Bei den betrachteten Strategien wirkt sich dies insbesondere auf die Wellenlängenabsuche aus: Die Verfahren MU und LU benötigen gemäß ihrer Definition netzweite Informationen und können deshalb für die betrachteten abschnittswisen Verfahren nicht verwendet werden.

#### 4.3.4 Interaktion zwischen Verkehrslenkung und Verbindungsannahme

Eine wichtige Aufgabe im Rahmen der Verkehrslenkung ist die Entscheidung, ob eine Verbindungsanforderung vom Netz angenommen werden soll oder nicht. Die hierzu erforderliche Annahmesteuerung kann innerhalb der Verkehrslenkung zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt werden. Die für WDM-Netze sinnvollen Optionen sind in Bild 4.10 durch gestrichelte Blöcke gekennzeichnet:

- Annahmesteuerung *vor* der Pfad-Auswahl. Vor der Wegesuche und Pfad-Auswahl wird bereits entschieden, ob für einen Verbindungswunsch überhaupt versucht werden soll, freie Ressourcen zu finden. Falls nur an dieser frühen Stelle eine Annahmesteuerung stattfindet, wird der Verbindungswunsch später immer angenommen, falls ein freier Pfad gefunden wird.
- Annahmesteuerung *integriert* mit der Pfad-Auswahl. Während der Wegesuche und Pfad-Auswahl wird bereits berücksichtigt, welche Ressourcen für den Verbindungswunsch verwendet werden dürfen. Die Pfad-Auswahl liefert daher im Erfolgsfall einen gültigen und freien Pfad zurück. Durch die enge Kopplung der Annahmesteuerung mit der Pfad-



**Bild 4.10:** Mögliche Durchführung der Annahmesteuerung innerhalb der Verkehrslenkung

Auswahl sind vielfältige Verkehrslenkungsmechanismen realisierbar. Beispielsweise kann in Anlehnung an das in [181] beschriebene Verfahren die Rufannahme mit einer von der freien Kapazität entlang des vorgesehenen Weges abhängigen Wahrscheinlichkeit erfolgen.

- Annahmesteuerung *nach* der Pfad-Auswahl. Die Pfad-Auswahl liefert einen Pfad mit freien Ressourcen, falls ein solcher im Netz verfügbar ist. In einer nachgeschalteten Annahmesteuerung wird entschieden, ob dieser Pfad dann von der jeweiligen Verbindungsanforderung auch genutzt werden darf.
- Kombinationen der obigen Möglichkeiten. In der Praxis wird häufig die mit der Pfad-Auswahl integrierte Annahmesteuerung um weitere Kontrollstufen vor und nach der Pfad-Auswahl ergänzt.

Innerhalb der Annahmesteuerung können verschiedene Kriterien für die Entscheidung über die Annahme einer Verbindung herangezogen werden. Dabei können netzweite Gesichtspunkte wie beispielsweise die Gesamtauslastung des Netzes, auf die beteiligten Knoten bezogene Kriterien wie beispielsweise maximale Anzahl von Verbindungen, oder verbindungsbezogene Aspekte wie beispielsweise die Last auf dem Direktweg oder auf Alternativwegen berücksichtigt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit stehen Verfahren für die Annahmesteuerung nicht im Mittelpunkt. In vielen Fällen wird die einfachste Variante verwendet, d. h. eine Annahme falls ein freier Pfad gefunden wird. In einigen separat beschriebenen Fällen wird eine mit der Pfadauswahl integrierte Annahmesteuerung verwendet, welche die Auslastung der betroffenen Übertragungsabschnitte und in einigen Fällen weitere Parameter wie den Bedarf einer Verbindung an Vermittlungsressourcen berücksichtigt.

## 4.4 Beschreibung von Verkehrslenkungsstrategien

Die in Kapitel 6 untersuchten Strategien werden in diesem Abschnitt getrennt nach globalen und abschnittsweisen Strategien vorgestellt. Die Bestandteile der einzelnen Strategien werden aus den Schemata des vorigen Abschnitts ausgewählt.

### 4.4.1 Globale Strategien

In dem im vorigen Abschnitt gezeigten Schema (Bild 4.8) werden fünf Elemente unterschieden. Die ersten beiden Elemente beschreiben die Grundeigenschaften und legen auch den Namen der jeweiligen Strategie fest. Sie werden im nachfolgenden Bild 4.11 vorgestellt. Die restlichen drei Elemente sind ergänzende Strategie-Elemente, die im folgenden Bild nicht gezeigt sind und daran anschließend beschrieben werden.

## Übersicht der Hauptstrategien

Die schematische Darstellung in Bild 4.11 zeigt nur den relevanten Ausschnitt, d. h. die ersten beiden Elemente aus dem gesamten Schema für globale Strategien.

- Beim Verfahren AGR-x (*alternative global routing with x pre-calculated alternatives*) wird ein alternatives Verkehrslenkungsschema verwendet, bei dem für jedes Knotenpaar die x kürzesten, vollständig kantendisjunkten Wege vorberechnet werden. Die Alternativen werden nach ansteigender Länge sortiert und in sequentieller Reihenfolge beginnend beim kürzesten Weg abgesucht.

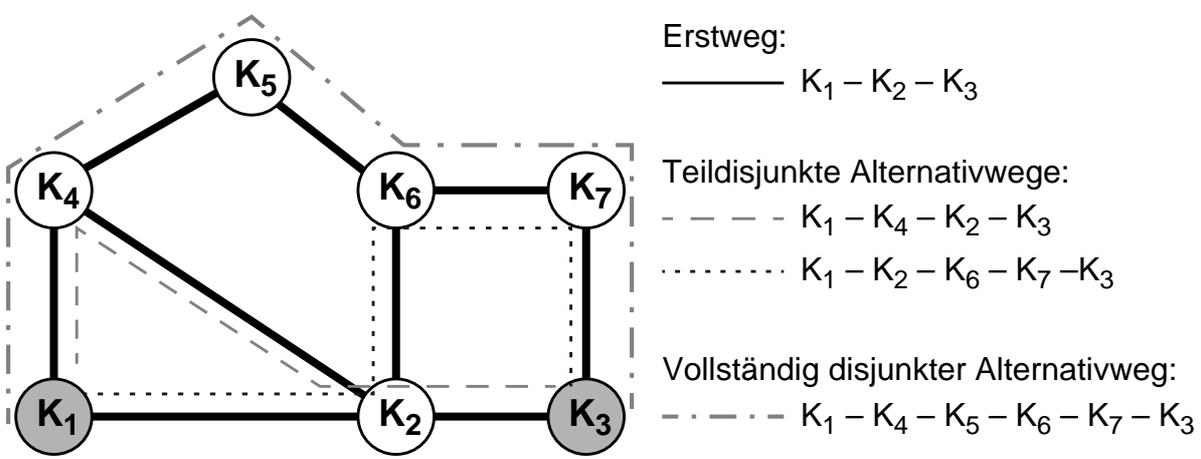
Bezeichnung	Schematische Darstellung und Kurzbeschreibung	
AGR-x $x > 1$ <i>(alternative global routing with x pre-calculated alternatives)</i>		alternatives Verkehrslenkungsschema minimierte Pfadlänge
AGR-1 <i>(fixed global routing)</i>		starres Verkehrslenkungsschema minimierte Pfadlänge
AGR-LD <i>(alternative global routing on link-disjoint paths)</i>		alternatives Schema mit spezieller Wahl der Alternativen (s. Text) minimierte Pfadlänge kombiniert mit spezieller Auswahlstrategie (s. Text)
DGR <i>(dynamic global routing)</i>		adaptives, dynamisches Verkehrslenkungsschema gewichtete Berücksichtigung der Pfadlänge
DGR-x <i>(dynamic global routing with x pre-calculated alternatives)</i>		zweistufiges Verfahren: Kombination aus AGR-x und DGR (s. Text)

**Bild 4.11:** Grundeigenschaften der verwendeten globalen Verkehrslenkungsstrategien

- Das Verfahren AGR-1 ist ein Sonderfall von AGR-x, für den sich spezifische Begriffe etabliert haben. Das Verkehrslenkungsschema umfasst nur den kürzesten Pfad und wird deshalb als „starres Schema“ bezeichnet (*fixed routing*).
- Beim Verfahren AGR-LD (*alternative global routing on link-disjoint paths*) wird ein spezielles Verkehrslenkungsschema verwendet, bei dem sich die Menge der möglichen Wege aus drei Teilen zusammen setzt:
  - Als Erstweg wird der kürzeste Weg verwendet.
  - Für jeden Abschnitt des Erstweges wird der kürzeste zu diesem Abschnitt kantendisjunkte Weg in die Menge der Alternativen aufgenommen. Damit ergibt sich eine mit der Länge des Erstweges steigende Anzahl von Alternativen.
  - Zusätzlich wird der kürzeste zum Erstweg vollständig kantendisjunkte Weg in die Menge der möglichen Wege aufgenommen.

Bild 4.12 zeigt an einem aus sieben Knoten bestehenden Beispielnetz exemplarisch die für das Knotenpaar  $(K_1, K_3)$  entstehenden Alternativwege bei AGR-LD. Die Absuche in der auf diese Weise für jedes Knotenpaar gegebenen Wegemenge geschieht wie folgt:

- In einem ersten Schritt wird versucht, einen Pfad entlang des Erstweges zu finden.
  - Schlägt dies fehl, so hängt der nächste Schritt von der Anzahl der entlang des Erstweges blockierten (d. h. vollständig belegten) Links ab. Ist exakt ein Link blockiert, so wird der zu diesem Link disjunkte Alternativweg untersucht. Sind mehrere Links blockiert, so wird der vollständig disjunkte Alternativweg untersucht.
- Bei DGR (*dynamic global routing*) handelt es sich um ein adaptives Verfahren, bei dem keine Wege vorberechnet werden. Statt dessen wird jeweils beim Auftreten eines Verbindungswunsches eine Pfadsuche im gesamten Netz durchgeführt. Diese Suche berücksichtigt die Pfadlänge in Kombination mit anderen Parametern.



**Bild 4.12:** Beispiel zur Bestimmung der Wegemenge für Verbindungen zwischen  $K_1$  und  $K_3$  beim Verfahren AGR-LD

- Das Verfahren DGR- $x$  (*dynamic global routing with  $x$  pre-calculated alternatives*) stellt eine Kombination aus AGR- $x$  und DGR dar. In einer ersten Stufe findet eine Pfadsuche gemäß AGR- $x$  statt (Auswahl aus  $x$  vorberechneten Alternativen). Wird hierbei kein freier Pfad gefunden, so wird eine dynamische Pfadsuche gemäß DGR durchgeführt.

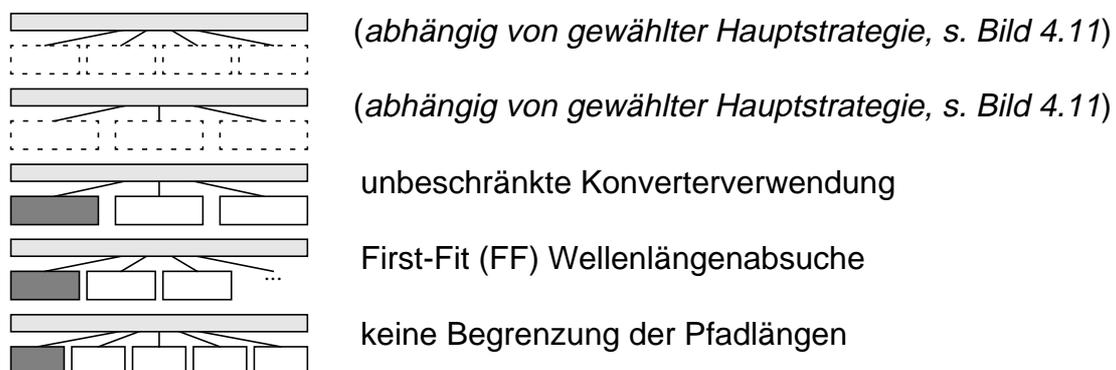
Bei allen Verfahren mit alternativem Verkehrslenkungsschema werden die Wegalternativen sequentiell jeweils ausgehend vom gleichen Startpunkt abgesucht. Außerdem wird bei allen Verfahren standardmäßig eine möglichst symmetrische Aufteilung der Last angestrebt: Falls mehrere identisch gewichtete (im Allgemeinen also gleich lange) Alternativen vorhanden sind, werden zwischen diesen die Verbindungsanforderungen möglichst gleichmäßig verteilt. Gleichwertige Alternativen treten insbesondere bei regelmäßigen Netztopologien häufig auf. Zu diesen zählen beispielsweise die Vollvermaschung oder das symmetrische Gitternetz, die später ebenfalls untersucht werden.

### Übersicht der zusätzlichen Strategie-Elemente

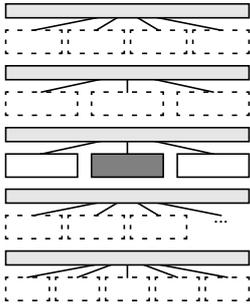
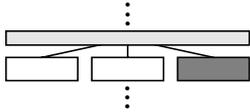
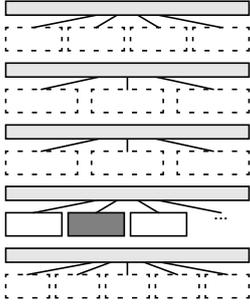
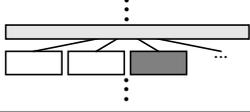
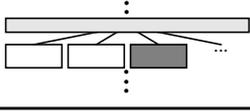
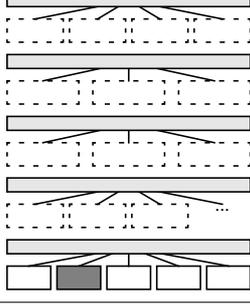
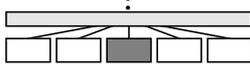
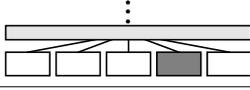
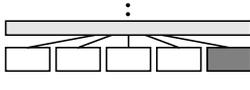
Alle beschriebenen Strategien können jeweils durch eine Reihe weiterer Elemente eine unterschiedliche Ausprägung bekommen. In dieser Arbeit werden die drei im Schema auf Seite 122 eingeführten ergänzenden Strategie-Elemente Konverterverwendung, Wellenlängen-Absuche und Pfadlängen-Begrenzung verwendet.

Bild 4.13 zeigt die sogenannte „Standard-Variante“ für diese Elemente, die bei den späteren Untersuchungen immer dann verwendet wird, wenn keine anderen Angaben gemacht werden: Konverter können – soweit verfügbar – unbeschränkt verwendet werden, die Wellenlängen werden gemäß dem Verfahren *First-Fit* (FF) ausgehend jeweils vom gleichen Startpunkt sequentiell abgesucht, und die Länge der Pfade ist unbegrenzt.

In Bild 4.14 werden die anderen im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls eingesetzten Varianten für die ergänzenden Strategie-Elemente gezeigt. Aus Platzgründen wird in der schematischen Darstellung nur für die jeweils erste Variante das gesamte Schema dargestellt, für die anderen Varianten wird nur noch die relevante Zeile gezeigt.



**Bild 4.13:** Standard-Variante für ergänzende Strategie-Elemente

Element	Bezeichnung	Schematische Darstellung und Kurzbeschreibung	
Konverterverwendung	MinKonv		minimierte Konverterverwendung
	integrierte Betrachtung (spezieller Graph)		gewichtete Berücksichtigung der Konverter
Wellenlängenabsuche	Random (Rand)		zufällige Wellenlängenabsuche
	Most-Used (MU)		adaptive Wellenlängenabsuche (Beginn bei der netzweit meistbelegten Wellenlänge)
	Least-Used (LU)		adaptive Wellenlängenabsuche (Beginn bei der netzweit am seltensten belegten Wellenlänge)
Pfadlängenbegrenzung	AbsLimit		absolute Längenbegrenzung einheitlich für alle Verbindungen
	RelLimit		distanzabhängige Längenbegrenzung
	AbsLimit adaptiv		absolute Längenbegrenzung unter Berücksichtigung der Link-Belegung
	RelLimit adaptiv		distanzabhängige Längenbegrenzung unter Berücksichtigung der Link-Belegung

**Bild 4.14:** Übersicht der verwendeten ergänzenden Strategie-Elemente

- Für die Konverterverwendung wird eine mit „MinKonv“ bezeichnete Strategie untersucht, bei der die Minimierung der Anzahl der benötigten Konverter für eine Verbindung höchste Priorität hat. Zusätzlich gibt es noch ein Verfahren, bei dem die Konverterverwendung in einem speziellen Graphen modelliert und gemeinsam mit anderen Parametern betrachtet wird. Dies kann beispielsweise bei der DGR-Strategie angewandt werden (nähere Erläuterungen siehe weiter unten im Text zu Bild 4.17).
- Für die Wellenlängenabsuche werden neben der Standard-Variante *First-Fit* weitere der bereits in Abschnitt 4.1 beschriebenen Verfahren verwendet (*Random*, *Most-Used*, *Least-Used*).
- Für die Begrenzung der Pfadlängen wird eine absolute Längengrenze (AbsLimit) und eine von der Distanz zwischen Start- und Zielknoten abhängige Grenze (RelLimit) sowie jeweils eine adaptive, d. h. netzzustandsabhängige Variante dieser beiden Verfahren betrachtet.

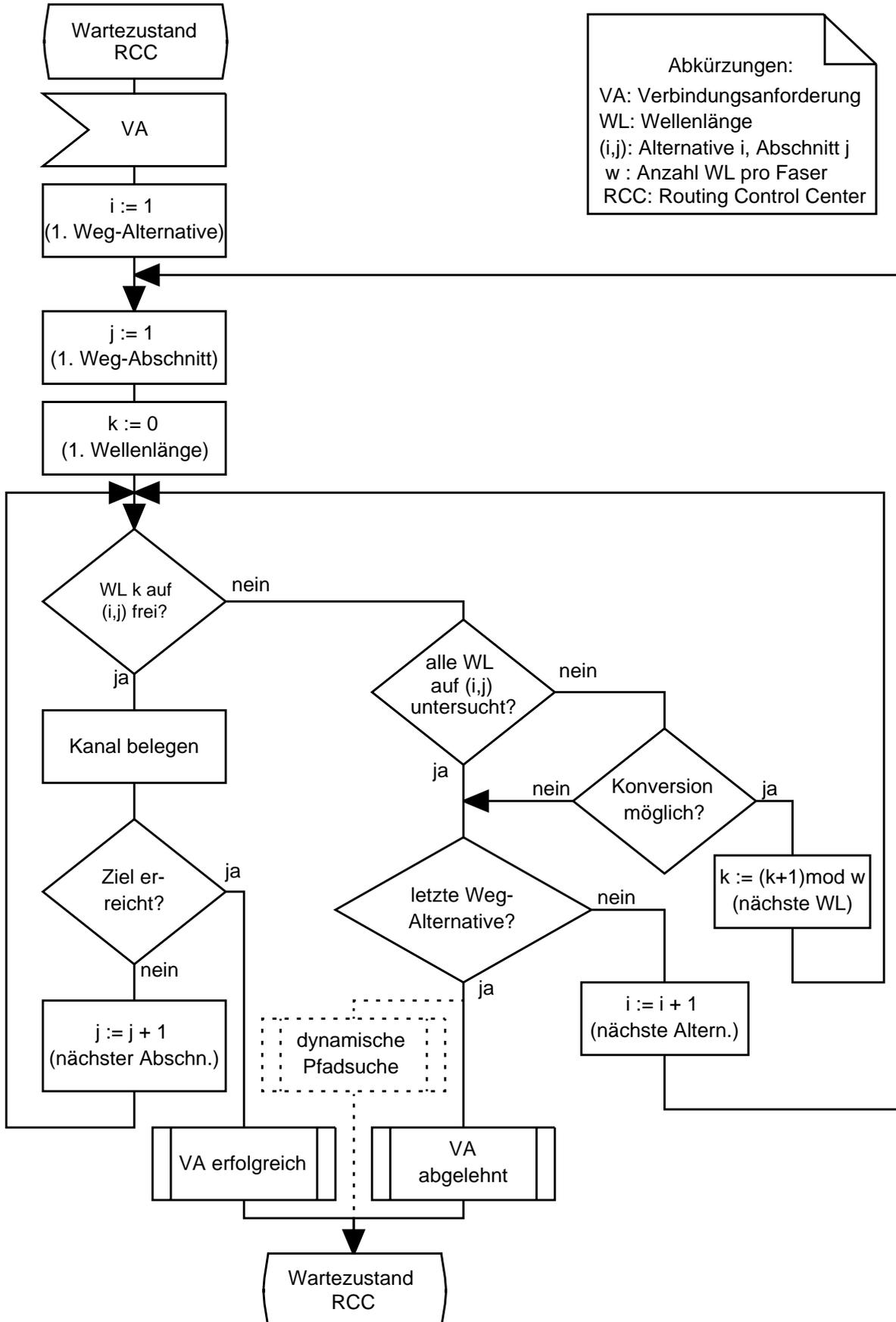
### **Realisierung wichtiger Strategien**

Aus Platzgründen wird nur für einige wichtige Strategien die Realisierung genauer vorgestellt. Bild 4.15 zeigt den Ablauf des Verfahrens AGR-x sowie gestrichelt die Erweiterung für DGR-x, welche im anschließenden Bild 4.16 näher erläutert wird. Gezeigt ist die Standard-Variante für die ergänzenden Strategie-Elemente (unbeschränkte Konverterverwendung, *First-Fit*-Wellenlängenabsuche, keine Pfadlängenbegrenzung).

Die zentrale Verkehrslenkungsinstanz (*routing control center*, RCC) führt – ausgelöst durch eine auftretende Verbindungsanforderung – eine Suche nach einem freien Pfad durch. Dabei gibt es zwei Hauptschleifen: In der äußeren Schleife werden alle vorhandenen Wegalternativen abgesucht, in der inneren Schleife alle Wellenlängenkanäle auf der jeweiligen Alternative. Innerhalb dieser inneren Schleife kann bei Bedarf eine Wellenlängen-Konversion durchgeführt werden, falls freie Konverter vorhanden sind. Im Startknoten einer Verbindung wird diese Konversion immer als möglich angenommen, da davon ausgegangen wird, dass die Verbindung auf jeder beliebigen Wellenlänge eingerichtet werden kann.

Bevor die zentrale Verkehrslenkungsinstanz wieder in den Ruhezustand übergeht, d. h. die Verbindungsanforderung vollständig abgearbeitet ist, werden in den mit „VA erfolgreich“ bzw. „VA abgelehnt“ bezeichneten Prozeduren noch eine Vielzahl von Statistiken entsprechend aktualisiert.

Die gestrichelt eingezeichnete Prozedur zur „dynamischen Pfadsuche“ ist bei der AGR-x Strategie nicht implementiert. Sie wird bei der Strategie DGR-x im Anschluss an eine erfolglose Absuche aller vorgegebenen Alternativen an Stelle der Prozedur „VA abgelehnt“ durchgeführt. Bei der Strategie DGR wird diese Prozedur direkt nach Auftreten einer Verbindungsanforde-

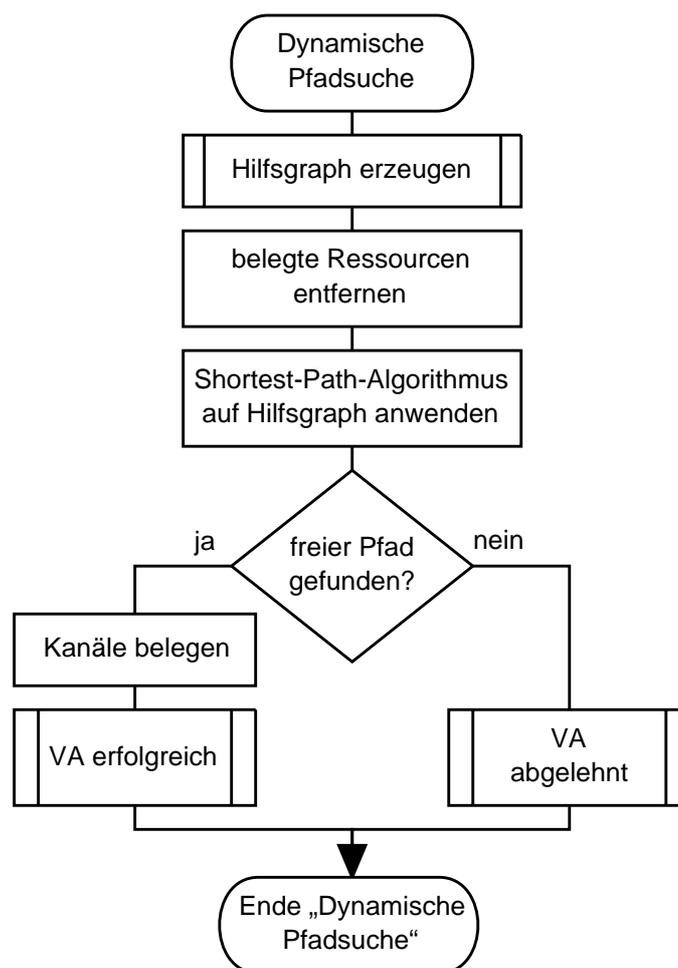


**Bild 4.15:** Ablaufdiagramm für die Standardvariante der globalen Strategien AGR-x und DGR-x (gestrichelt gezeichnete Ergänzung)

rung aufgerufen, es gibt keine Absuche vorgegebener Wegalternativen. Bild 4.16 zeigt schematisch den entsprechenden Ablauf dieser dynamischen Pfadsuche.

Bei der dynamischen Pfadsuche wird in einem ersten Schritt aus dem gegebenen Netz unter Berücksichtigung des momentanen Netzzustandes ein Hilfsgraph gemäß dem weiter unten näher erläuterten Graphenmodell erzeugt. In diesem Graphen werden die momentan belegten Netzressourcen entfernt bzw. als nicht verwendbar markiert. Anschließend wird mit einem Shortest-Path-Algorithmus (SP) nach einem freien Pfad gesucht, wobei hierbei weitere Strategie-Elemente (wie beispielsweise maximale Pfadlängen) berücksichtigt werden können. Falls ein freier Pfad gefunden wird, werden die entsprechenden Ressourcen belegt, ehe abschließend – wie beim vorigen Ablaufdiagramm beschrieben – die entsprechenden statistischen Auswertungen durchgeführt werden.

Der zur dynamischen Pfadsuche verwendete Hilfsgraph wird aus der Netztopologie und dem momentanen Netzzustand gewonnen. Die Erzeugung dieses Hilfsgraphen wird an Hand des Netzes in Bild 4.17 exemplarisch beschrieben. Das Beispielnetz besteht aus vier Knoten  $K_1$



**Bild 4.16:** Schematisches Ablaufdiagramm der dynamischen Pfadsuche

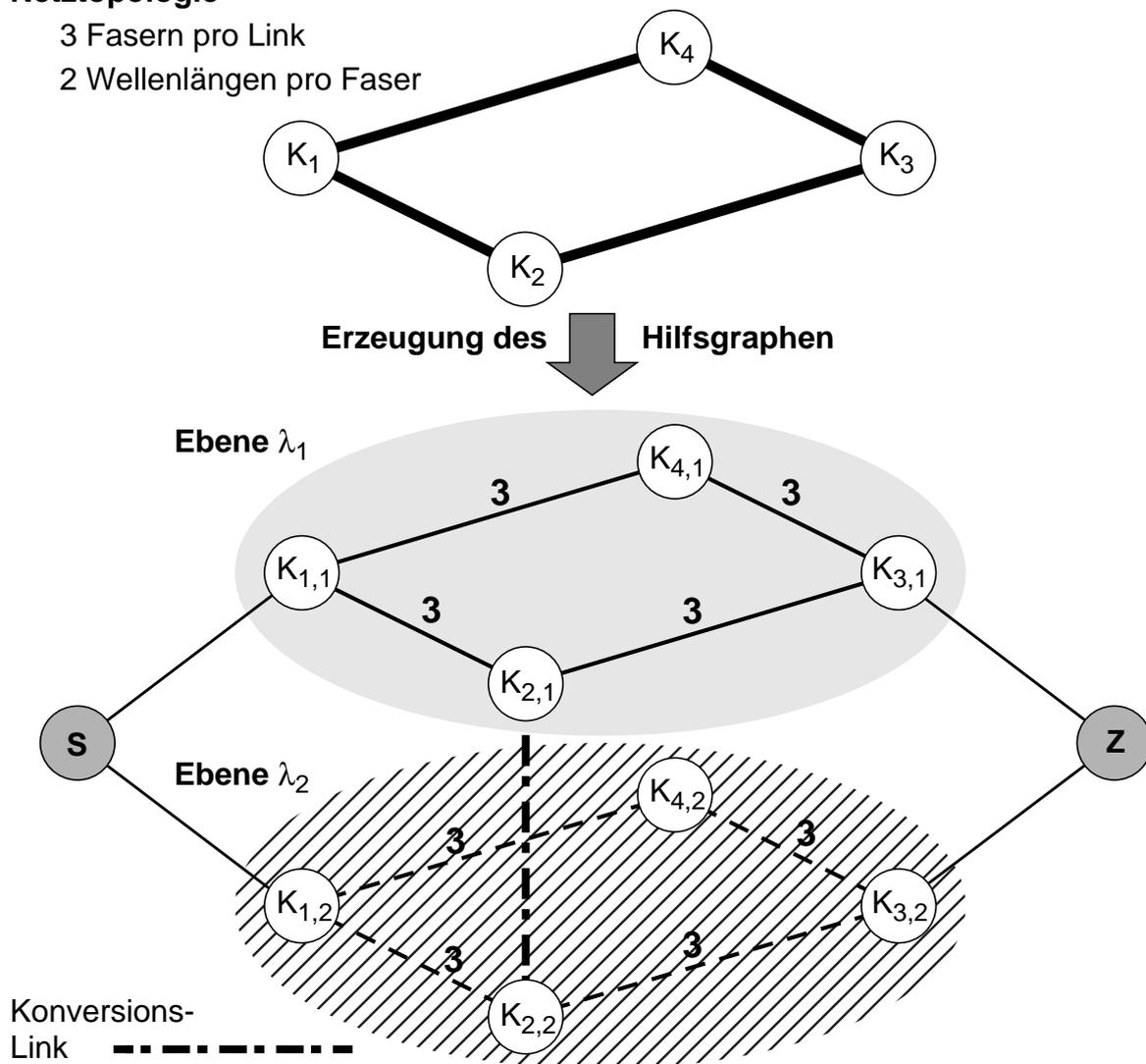
bis  $K_4$ , alle Links enthalten jeweils drei Fasern, auf jeder Faser sind jeweils zwei Wellenlängenkanäle verfügbar ( $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ ).

Im Hilfsgraphen wird für jede Wellenlänge eine eigene Ebene mit allen Knoten erzeugt (aus  $K_1$  werden die Knoten  $K_{1,1}$  in der ersten und  $K_{1,2}$  in der zweiten Ebene). Die Links des Hilfsgraphen enthalten eine der ursprünglichen Faserzahl des zugehörigen Netz-Links entsprechende Anzahl von Kanälen (im Bild einheitlich 3 Kanäle). Sind in einem Knoten Konverter vorhanden, so werden diese durch sogenannte Konversions-Links zwischen den Wellenlängen-Ebenen im Hilfsgraphen dargestellt (im Bild ist ein Konverter im Knoten  $K_2$  angenommen).

Sind bereits einige Verbindungen im Netz vorhanden, so werden die davon belegten Ressourcen aus dem Hilfsgraphen entfernt. Schließlich wird für den Start- und Zielknoten der neuen Verbindungsanforderung jeweils ein zusätzlicher Knoten erzeugt ( $S$  bzw.  $Z$  im Bild 4.17) und

### Netztopologie

- 3 Fasern pro Link
- 2 Wellenlängen pro Faser



**Bild 4.17:** Beispiel für das Graphenmodell zur dynamischen Pfadsuche bei einer Verbindungsanforderung zwischen den Knoten  $K_1$  und  $K_3$

mit den zugehörigen Knoten auf allen Ebenen verbunden. Die Länge (allgemein: das Gewicht) dieser Links wird zu Null gesetzt, wodurch der gleichberechtigte Zugriff auf alle Wellenlängen ermöglicht wird. In dem so entstehenden Graph kann mit einem SP-Algorithmus nach einem freien Pfad zwischen den Knoten  $S$  und  $Z$  gesucht werden. Durch entsprechende Wahl der Link-Gewichte im Hilfsgraphen können unterschiedliche Strategien realisiert werden, wie die zwei folgenden Beispiele verdeutlichen:

- Wird das Gewicht des Konversions-Links größer als die Summe aller anderen Linkgewichte, so werden erst alle (beliebig langen) Wege ohne Konversion gewählt, ehe der Konverter benutzt wird. Eine solche Gewichtung führt also zu einer Minimierung der Konverterbelegung.
- Wird das Gewicht des Konversions-Links zu Null gewählt, so wird der Konverter belegt, bevor eine die minimale Weglänge überschreitende Alternative gewählt wird. Diese Gewichtung führt zu einer vergleichsweise hohen Nutzung der Konverter bei gleichzeitig relativ geringen Weglängen.

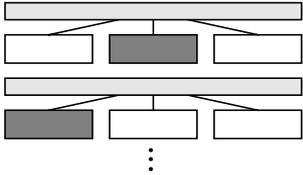
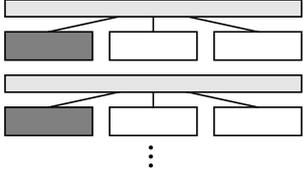
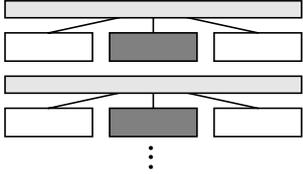
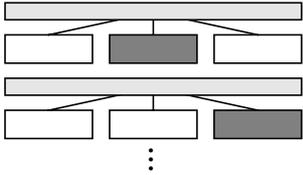
#### 4.4.2 Abschnittsweise Strategien

Dieser Abschnitt stellt die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten abschnittswisen Strategien aufbauend auf dem in Bild 4.9 (Seite 124) gezeigten Schema vor. Wie bei den globalen Strategien legen die ersten beiden Elemente die Bezeichnung der Strategie fest, während die restlichen drei Elemente ergänzende Eigenschaften beschreiben.

Bild 4.18 zeigt die betrachteten Grundverfahren OOC- $x$ , SOC- $x$  und SOCC- $x$ . Die schematische Darstellung enthält nur die ersten beiden Elemente. Die Kontrolle über die Auswahl der Weg-Alternativen entspricht dabei jeweils den in Abschnitt 4.3.3 bereits beschriebenen Verfahren OOC, SOC und SOCC. Zusätzlich zu diesen für Telefonnetze entwickelten Verfahren [95] enthalten die Verfahren in dieser Arbeit eine Absuche der vorhandenen Wellenlängenkanäle unter Nutzung von eventuell vorhandenen Konvertern.

Der Parameter  $x$ ,  $x \geq 1$  bezeichnet die Anzahl der in jedem Knoten für jedes Ziel zur Verfügung stehenden Alternativen. Ein Sonderfall ergibt sich für  $x = 1$ . In diesem Fall steht nur ein Weg für jedes Ziel zur Verfügung, es liegt also ein starres Verkehrslenkungsschema vor. Dadurch wirken sich die verschiedenen Kontrollstrategien nicht mehr aus: Die Verfahren OOC-1, SOC-1 und SOCC-1 liefern also identische Ergebnisse. Aus diesem Grund ist im Bild auch nur das Verfahren OOC-1 beispielhaft aufgeführt.

Die ergänzenden Strategie-Elemente entsprechen weitgehend denen für globale Verfahren, allerdings haben bei abschnittswisen Verfahren alle Elemente nur eine lokale Bedeutung (d. h. nur der Zustand des Knotens und der am Knoten angeschlossenen Links kann berück-

Bezeichnung	Schematische Darstellung und Kurzbeschreibung
OOC-x $x > 1$	 alternatives Verkehrslenkungsschema  Kontrolle nur im Startknoten
OOC-1	 starres Verkehrslenkungsschema  Kontrolle nur im Startknoten
SOC-x $x > 1$	 alternatives Verkehrslenkungsschema  abschnittsweise Weitergabe der Kontrolle
SOCC-x $x > 1$	 alternatives Verkehrslenkungsschema  abschnittsweise Weitergabe der Kontrolle mit Crankback

**Bild 4.18:** Grundeigenschaften der verwendeten abschnittswisen Verkehrslenkungsstrategien

sichtigt werden). Die in dieser Arbeit verwendete Standard-Variante für abschnittsweise Verfahren entspricht wie bereits in Bild 4.13 gezeigt einer unbeschränkten Konverterverwendung, sequentieller Absuche der Wellenlängenkanäle, unbegrenzter Pfadlängen, sowie sequentieller Absuche der gegebenen Wegalternativen im Falle eines alternativen Verkehrslenkungsschemas.

Neben dieser Standard-Variante gibt es für die ergänzenden Strategie-Elemente auch bei abschnittswisen Verfahren grundsätzlich ähnlich vielfältige Möglichkeiten wie bei globalen Verfahren. Da der Schwerpunkt der späteren Untersuchungen aber auf globalen Verfahren liegt, wird nur eine mit „MinKonv“ bezeichnete Strategie zur Minimierung der Konverternutzung verwendet. Hierbei werden alle zur Verfügung stehenden Wegalternativen zyklisch abgesehen. Die Anzahl der erlaubten Konverter wird dabei im ersten Zyklus auf Null gesetzt und in jedem weiteren Zyklus um eins erhöht. Die Absuche endet, falls ein geeigneter Pfad gefunden wird, oder falls auch mit voller Konversion kein Pfad gefunden werden kann.

# Kapitel 5

## Modellierung und Dimensionierung

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Untersuchung von Strategien zur Verkehrslenkung und Ressourcen-Belegung. Gegenstand dieses Kapitels sind die hierfür erforderliche Modellierung sowie die Dimensionierung der in den späteren Studien verwendeten Beispielnetze. Der folgende Abschnitt 5.1 enthält die Modellierung des Netzes, der Netzknoten und des Verkehrsverhaltens. Für die Netzdimensionierung und die Untersuchung der Verkehrslenkungsverfahren werden unterschiedliche Verkehrsmodelle verwendet, die in den Abschnitten 5.1.3 und 5.1.4 getrennt beschrieben werden.

Bei den Untersuchungen der Verkehrslenkungsstrategien werden Verbindungen auf Wellenlängenkanal-Ebene dynamisch auf- und abgebaut (im Folgenden auch vereinfacht mit „dynamischer Verkehr“ bezeichnet). Mit *dynamic routing* werden Verkehrslenkungsverfahren bezeichnet, die für diesen dynamischen Verkehr geeignet sind. Im Unterschied hierzu ist die bei der Dimensionierung ebenfalls erforderliche Wegewahl für die statischen Verkehrsbeziehungen zu sehen, die in der englischen Literatur ebenfalls mit *routing* bezeichnet wird (siehe Abschnitt 3.3.1).

Werden sämtliche für die Untersuchung einer Verkehrslenkungsstrategie relevanten Parameter, also sowohl die vielfältigen möglichen Eigenschaften der Strategie als auch die äußeren Randbedingungen gemeinsam betrachtet, so ist es sehr schwer oder sogar unmöglich, die auftretenden Ergebnisse und Effekte den einzelnen Parametern eindeutig zuzuordnen. Deshalb werden im Abschnitt 5.2 die wesentlichen äußeren Einflussparameter klassifiziert.

Zur sinnvollen Durchführung der Untersuchung von Verkehrslenkungsstrategien sind geeignete Netzszenarien erforderlich. Die Dimensionierung der in dieser Arbeit verwendeten Netze wird in Abschnitt 5.3 beschrieben. Es werden die getroffenen Annahmen vorgestellt, die Vorgehensweise bei der Dimensionierung beschrieben und schließlich die verwendeten Beispielnetze mit einigen wesentlichen Charakteristika diskutiert. Das Ziel ist es dabei nicht, die Planung von WDM-Netzen im Detail zu untersuchen. Für die genauere Betrachtung der Planung

und Dimensionierung von WDM-Netzen wird auf die umfangreiche Literatur zu diesem Thema verwiesen (siehe beispielsweise [12, 70, 155, 163, 167, 170, 204, 231]). Weitere Arbeiten finden sich zur Platzierung von Konvertern [258, 266, 279, 282, 293], zur integrierten Betrachtung mehrerer Netzebenen [86, 90], zur Berücksichtigung mehrerer Ausbaustufen der Netzplanung, dem sogenannten *multi-period planning* [210, 211], sowie zur Betrachtung von Schutzmechanismen [102, 275] und von physikalischen Aspekten [215].

## 5.1 Modellierung für die Leistungsbewertung und Netzdimensionierung

Um die Leistungsfähigkeit von Verkehrslenkungsstrategien in dynamischen WDM-Netzen untersuchen zu können, muss die Komplexität des betrachteten Problems reduziert und einer simulativen Untersuchung zugänglich gemacht werden. Dies gilt auch für die Dimensionierung der für die Studien erforderlichen Beispielnetze. Hierzu ist eine Modellierung des realen Systems mit dem Ziel erforderlich, eine vereinfachte Darstellung ohne Vernachlässigung wichtiger Aspekte zu erreichen.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Modellierung, die den Untersuchungen in dieser Arbeit zu Grunde liegt. Dieses Modell wurde in zwei objektorientierte Programme zur Dimensionierung der Beispielnetze und zur Untersuchung der Verkehrslenkungsverfahren umgesetzt. Letzteres basiert auf der in [148] beschriebenen Simulationsbibliothek und verwendet die Methode der ereignisgesteuerten Simulation.

### 5.1.1 Modellierung des WDM-Netzes

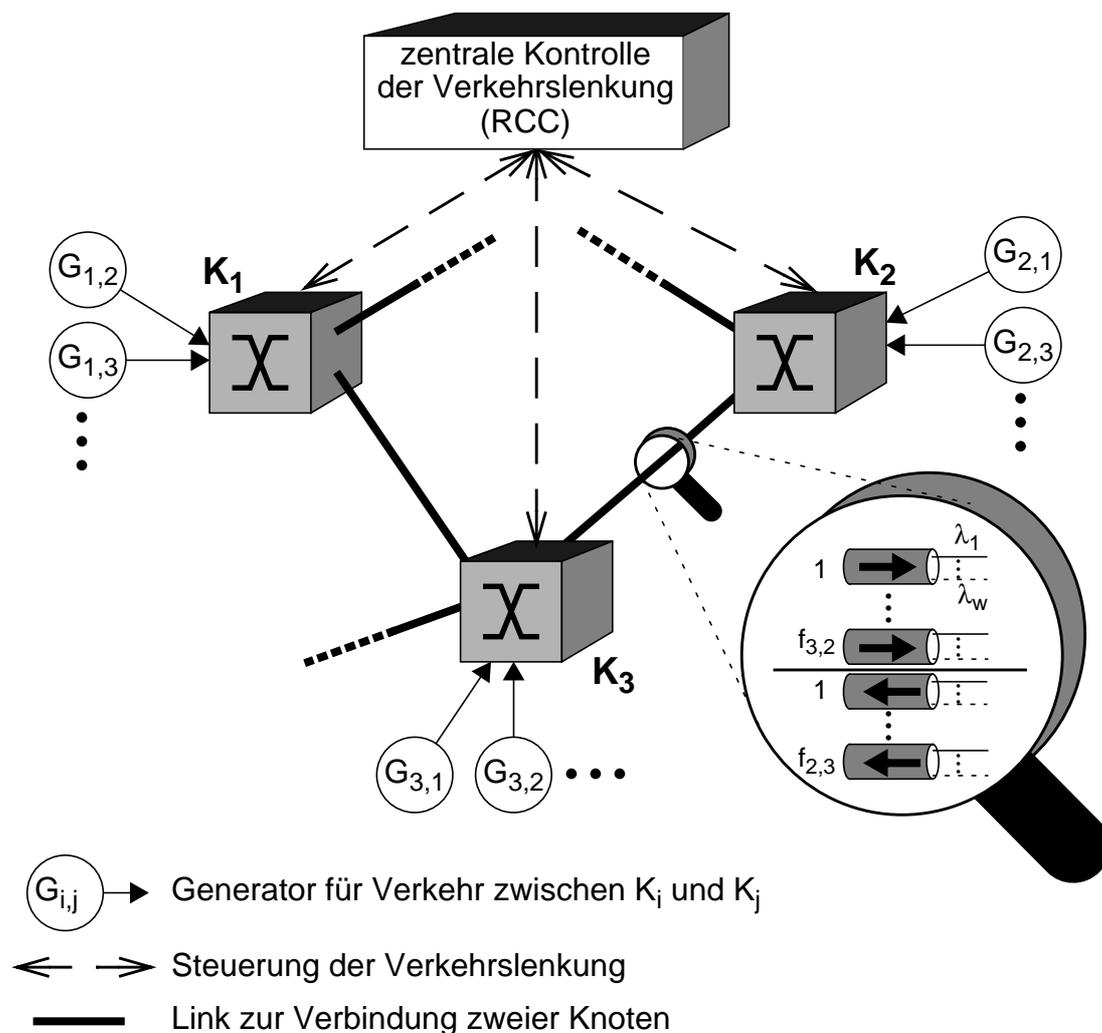
Für die Untersuchung globaler und abschnittsweiser Strategien werden zwei leicht unterschiedliche Netzmodelle verwendet. Sie werden an Hand eines beispielhaften Netzausschnittes bestehend aus drei Knoten im Folgenden erläutert. Die beiden Modelle unterscheiden sich hinsichtlich der Steuerung der Verkehrslenkung. Für die in Abschnitt 5.3 durchgeführte Dimensionierung der Beispielnetze ist dieser Unterschied ohne Bedeutung.

#### 5.1.1.1 Netzmodell für die Untersuchung globaler Strategien

Für die Untersuchung globaler Verkehrslenkungsstrategien wird ein Netzmodell gemäß Bild 5.1 verwendet.

- Für die Netzknoten werden optische Cross-Connects (OCC) angenommen, die mit  $K_1$  bis  $K_3$  (allgemein:  $K_i$ ) bezeichnet werden. Die Modellierung eines Knotens wird im Abschnitt 5.1.2 beschrieben.

- Die Knoten sind durch Links verbunden. Wie im Bild gezeigt, können auf jedem Link mehrere Fasern vorhanden sein, wobei die Anzahl der Fasern ( $f$ ) entsprechend dem Ergebnis der Netzdimensionierung für beide möglichen Richtungen auf jedem Link frei gewählt werden kann. Die Fasern werden – wie heute in Weitverkehrsnetzen üblich – nur für unidirektionale Übertragung genutzt. Auf jeder Faser sind mehrere Wellenlängenkanäle vorhanden. Auch diese Zahl ist ein veränderlicher Simulationsparameter; für alle Studien in dieser Arbeit wird vereinfachend für alle Fasern eines Netzes jeweils die gleiche Anzahl  $w$  an maximal möglichen Wellenlängenkanälen angenommen.
- In den Netzknoten treten Verbindungsanforderungen auf. Diese werden durch sogenannte *Verkehrsgeneratoren* erzeugt. Für jedes Knotenpaar im Netz existiert ein eigener, am Ursprungsknoten angeschlossener Generator, der das gewünschte Verkehrsverhalten



**Bild 5.1:** Netzmodell bei globaler Verkehrslenkung für ein Beispielnetz mit drei OCCs ( $K_1$  bis  $K_3$ )

nachbildet. Eine genauere Erläuterung der Verkehrsmodellierung findet sich in Abschnitt 5.1.4.

- Die Verkehrslenkung wird netzweit von einer zentralen Verkehrslenkungsinstanz (*routing control center*, RCC) gesteuert. Das RCC besitzt die vollständige Information über den aktuellen Netzzustand, d. h. den Status sämtlicher Verbindungen, Knoten und Links, und trifft sämtliche Verkehrslenkungsentscheidungen<sup>1</sup>. Um die erforderlichen Informationen über das Netz zu sammeln und die Verkehrslenkungsentscheidungen an die Knoten mitzuteilen, findet wie im Bild angedeutet eine Kommunikation zwischen dem RCC und den Knoten statt.

Der Simulationsablauf gestaltet sich wie folgt. Die Verbindungsanforderungen werden von den Verkehrsgeneratoren zufällig gemäß der gewählten Verkehrsmodellierung erzeugt. Eine neue Anforderung wird an das RCC gemeldet, das daraufhin entsprechend der implementierten Strategie einen gültigen freien Pfad sucht. Wird ein solcher gefunden, so werden die Ressourcen im Netz belegt und nach der ebenfalls gemäß der Verkehrsmodellierung zufällig festgelegten Haltedauer der jeweiligen Verbindung wieder freigegeben. Kann kein freier Pfad gefunden werden, so tritt ein sogenanntes *Verlustereignis* (kurz: *Verlust*) ein: Die Verbindungsanforderung wird abgelehnt und aus der Liste der Anforderungen entfernt; eine Wiederholung derselben Anforderung findet nicht statt.

Für das beschriebene Netzmodell sind einige Vereinfachungen gegenüber realen WDM-Netzen vorgenommen worden. Physikalische Übertragungsparameter und die Beeinflussung der WDM-Signale durch Vermittlungsstufen werden nicht im Detail berücksichtigt. Mit der Beschränkung der maximalen Pfadlänge steht nur ein relativ einfacher Mechanismus zur Abbildung der vielfältigen Effekte zur Verfügung, welche die Übertragung von WDM-Signalen beeinflussen. Der Vorteil besteht darin, dass Regeneratoren und mögliche Beschränkungen für die Verkehrslenkung auf Grund analoger Signalveränderungen nicht betrachtet werden müssen. Ohne diese Abstraktion würde die Komplexität des Modelles stark erhöht werden. Zwei Arten von Netzen entsprechen diesem Modell in der Realität:

- Transparente optische Netze: Die Übertragung findet im gesamten Netz rein optisch statt; es gibt keine Regeneration innerhalb des Netzes. Auf Grund technologischer Beschränkungen kann in naher Zukunft eine transparente Lösung nur in relativ kleinen Teilnetzen oder Netzbereichen erreicht werden.
- Netze mit ausreichender Regeneration: Im Grenzfall findet für jeden Kanal in jedem Knoten eine Regeneration statt, so dass keine Übertragungsbeschränkungen auftreten. In

---

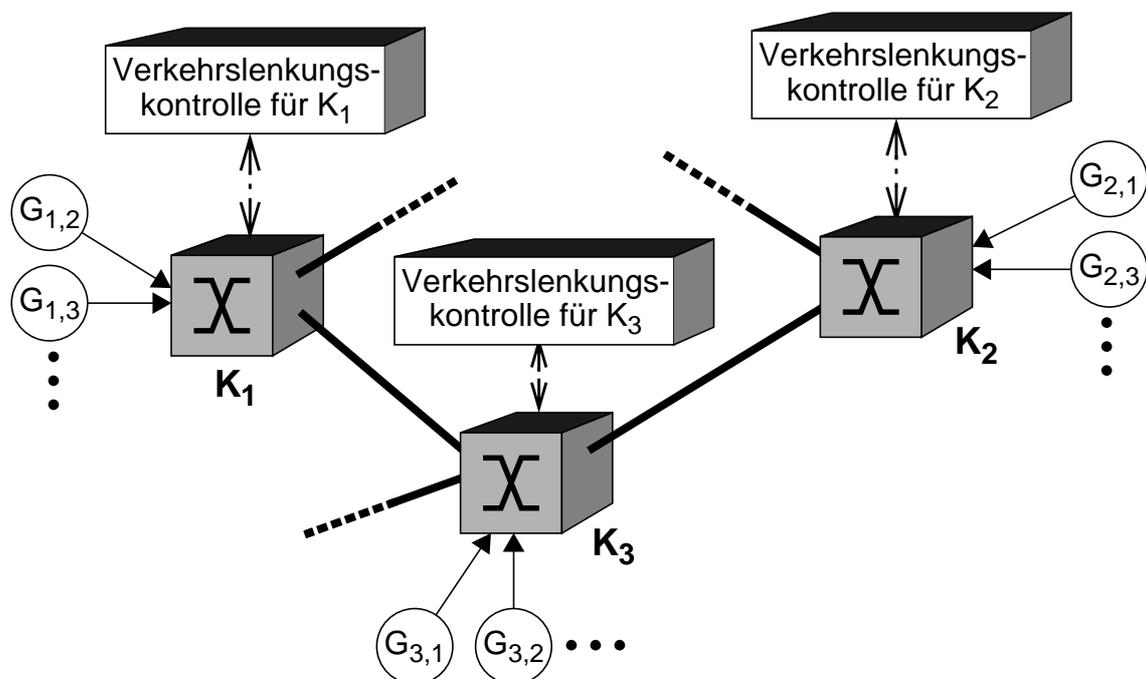
1. Dieses Modell entspricht zwei sehr unterschiedlichen Realisierungsformen. Es entspricht sowohl einem auch in der Realität zentral ausgeführten RCC als auch einer verteilten Lösung, bei der jeder Knoten die vollständige Netzinformation zur Verfügung hat. Die erste Realisierung erfordert einen Informationsaustausch zwischen dem RCC und jedem einzelnen Knoten, letzteres erfordert einen umfangreichen Informationsaustausch zwischen den vermittelnden Netzknoten.

vielen Fällen (z. B. bei relativ geringem Knotenabstand) kann die Zahl der Regeneratoren aber ohne Einschränkung der Möglichkeiten für die Wegewahl reduziert werden.

Vereinfachend wird weiter angenommen, dass für eine Verbindung an ihrem Ursprungsknoten eine beliebige Wellenlänge gewählt und eine am Zielknoten ankommende Verbindung immer terminiert werden kann. Dadurch können Verluste nur innerhalb des Netzes auftreten, nicht aber an dessen Rand.

### 5.1.1.2 Netzmodell für die Untersuchung abschnittsweiser Strategien

Für die Untersuchung abschnittsweiser Strategien sind hinsichtlich des Netzmodells die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen sowie die Modellierung der Knoten und des Verkehrsverhaltens gegenüber dem Modell für globale Strategien unverändert. Das Modell unterscheidet sich jedoch hinsichtlich der Steuerung der Verkehrslenkung (Bild 5.2). Es existiert kein zentrales RCC mehr, dafür besitzt jeder Knoten eine eigene Verkehrslenkungsinstanz. Diese enthält eine sogenannte Verkehrslenkungstabelle, die für jedes mögliche Ziel einen (oder gegebenenfalls eine Liste von) zu wählenden Nachbarknoten enthält, sowie eine Kontrollinstanz zur Auswahl zwischen den möglichen Alternativen. Das verwendete Modell stellt gewissermaßen den Grenzfall einer verteilten Verkehrslenkung dar, da die Knoten keine Informationen über den Netzzustand untereinander austauschen. In der Literatur hat sich hierfür der Begriff *isolierte Verkehrslenkung* etabliert.



**Bild 5.2:** Netzmodell für abschnittsweise Verkehrslenkung mit verteilten, isoliert arbeitenden Steuerinstanzen für die Verkehrslenkung

Diese verteilte Verkehrslenkungskontrolle erfordert auch einen anderen Prozess zum Aufbau einer Verbindung. Wenn ein Knoten eine Verbindungsanforderung empfängt, wird diese lokal bearbeitet: Der Knoten versucht, gemäß seiner Verkehrslenkungstabelle einen freien Kanal zu einem der erlaubten Nachbarknoten zu finden. Kann ein freier Abschnitt belegt werden, so wird die Verbindungsanforderung an den entsprechenden Nachbarknoten weitergegeben, der für die Realisierung des nächsten Verbindungsabschnitts zuständig ist.

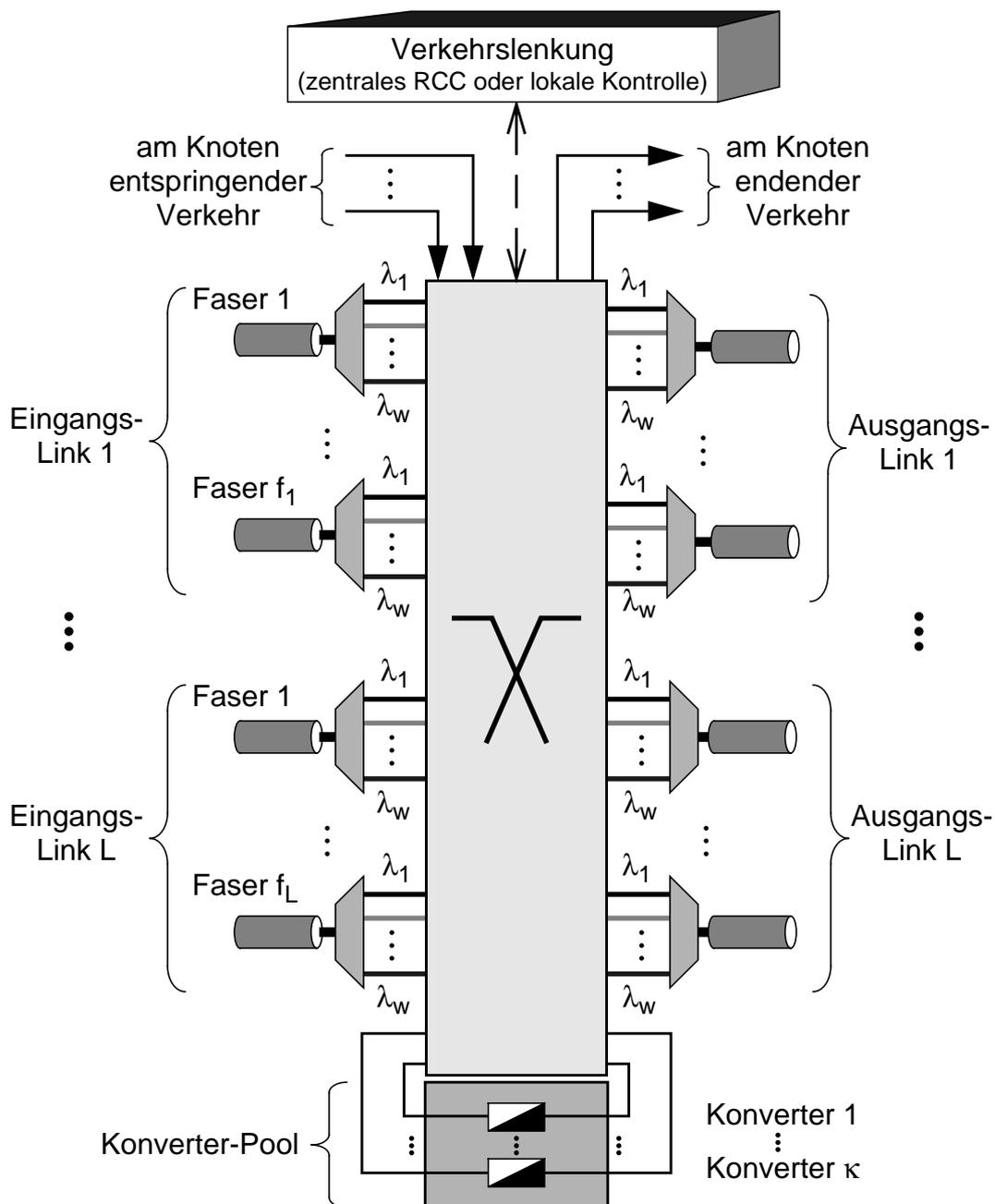
### 5.1.2 Knotenmodell

Den Untersuchungen in dieser Arbeit liegt ein Knotenmodell gemäß Bild 5.3 zu Grunde. Für alle Knoten eines Netzes wird dieses Schema angenommen, wobei die Größe bzw. Dimensionierung jedes Knotens individuell gewählt werden kann. Das Modell eines Knotens setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen:

- **Eingangsstufe.** An einem Knoten können mehrere Links mit unterschiedlicher Faserzahl enden. Eine Demultiplex-Stufe am Ende jeder Faser separiert die jeweiligen WDM-Signale, so dass nach der Eingangsstufe alle Wellenlängenkanäle räumlich getrennt vorliegen.
- **Ausgangsstufe.** Sie stellt das genaue Gegenstück zur Eingangsstufe dar und multiplext die Wellenlängenkanäle auf die Fasern der unterschiedlichen abgehenden Links.
- **Sender und Empfänger** für den am Knoten entspringenden bzw. endenden Verkehr. Lokale, d. h. am selben Knoten ausgehende und endende Verbindungen werden ausgeschlossen. Die Wellenlänge einer neuen Verbindung kann am Sender frei gewählt werden. Außerdem wird angenommen, dass weder Sender noch Empfänger einen Engpass darstellen können. Auf Seiten des Senders kann dies realisiert werden, indem entweder verstellbare Sende-Laser oder aber eine ausreichende Anzahl Laser für jede Wellenlänge vorhanden sind.
- **Schaltmatrix.** Sie stellt den ersten Bestandteil der Vermittlungsstufe dar und erlaubt die räumliche Vermittlung einzelner Wellenlängenkanäle. Die Schaltmatrix ist blockierungsfrei, d. h. sie kann einen beliebigen freien Eingang mit einem freien Ausgang verbinden. Dabei gilt die Einschränkung, dass keine Umsetzung der Wellenlänge vorgenommen werden kann, dies ist nur im Konverter-Pool möglich. Für  $n_1$  ankommende Wellenlängenkanäle,  $n_2$  lokale Sender und  $\kappa$  Konverter ergibt sich bei einem symmetrischen Knoten eine Schaltmatrix der Größe  $(n_1 + n_2 + \kappa) \times (n_1 + n_2 + \kappa)$ .
- **Konverter-Pool.** Dieser zweite Bestandteil der Vermittlungsstufe ist optional. Für die Konverter gilt die Annahme, dass sie jede ankommende Wellenlänge auf jede beliebige der insgesamt möglichen  $w$  Wellenlängen umsetzen können. Die im Pool vorhandenen Konverter können prinzipiell von allen den Knoten durchlaufenden Verbindungen belegt

werden. In der Literatur wird für dieses Schema häufig die Bezeichnung *share-per-node* verwendet. Je nach Bestückung des Konverter-Pools lassen sich WR-Netze (keine Konverter), WI-Netze (unbegrenzte Konversion, d. h. die Anzahl der Konverter im Pool entspricht der Anzahl der ausgehenden Wellenlängenkanäle) oder Netze mit partieller Konversion realisieren.

- Verbindung zur Verkehrslenkungskontrolle. Je nach verwendeter Verkehrslenkungsstrategie (global oder abschnittsweise) existiert eine Verbindung zum zentralen RCC oder zur lokalen Verkehrslenkungsinstanz.



**Bild 5.3:** Modellierung eines optischen Cross-Connects

Das gewählte Modell bietet den Vorteil, dass durch einfache Variation der Parameter viele unterschiedliche Knotenfunktionen nachgebildet werden können. Das Modell kann – wie im 2. Kapitel bereits beschrieben – auf unterschiedliche Arten realisiert werden. Dabei sind technische Umsetzungen möglich, die mit weniger Komponenten als die im Bild 5.3 gezeigte Knotenarchitektur auskommen. So ist es beispielsweise technisch einfacher, an Stelle einer einzelnen, großen Schaltmatrix für jede Wellenlänge eine eigene Schaltmatrix zu verwenden. Außerdem ist es günstiger, in WI-Netzen keinen Konverter-Pool einzusetzen, sondern die Konverter direkt jedem Wellenlängenkanal am Ausgang (oder auch am Eingang) zuzuordnen. Dadurch kann die Schaltmatrix im Vergleich zur direkten Umsetzung des Knotenmodells aus Bild 5.3 stark verkleinert werden.

### 5.1.3 Verkehrsmodell für die Dimensionierung der Beispielnetze

Für die Dimensionierung der Beispielnetze werden statische Verbindungsanforderungen für alle Knotenpaare des jeweiligen Netzes angenommen. Es werden ausschließlich Wellenlängenkanäle betrachtet, gemäß ITU-T Standard G.872 also die Ebene des *optical channel layer network*.

Für die Knotenpaare kann unabhängig voneinander jeweils eine beliebige Anzahl von Wellenlängenkanälen als zu erfüllende Verkehrsanforderungen vorgegeben werden. Diese Anforderungen werden in einer sogenannten Verkehrsmatrix zusammengefasst, deren Einträge die geforderte Verbindungsanzahl  $v_{i,j}$  für ein gerichtetes Knotenpaar repräsentieren. Für jedes im Netz vorhandene Knotenpaar  $(K_i, K_j)$  existieren also jeweils zwei voneinander unabhängige Verbindungsanforderungen  $v_{i,j}$  und  $v_{j,i}$ . Diese Werte werden im Folgenden auch als *Planungswert* bezeichnet.

### 5.1.4 Verkehrsmodell für die Untersuchung der Verkehrslenkungsverfahren

Für die Leistungsbewertung der Verkehrslenkungsverfahren wird der dynamische Auf- und Abbau von Wellenlängenverbindungen betrachtet. Alle Verbindungsanforderungen sind unidirektional, für den Generator  $G_{i,j}$  also von  $K_i$  nach  $K_j$  gerichtet<sup>2</sup>.

Das durch einen Generator nachgebildete Verkehrsverhalten eines Knotenpaares wird durch zwei Größen beschrieben:

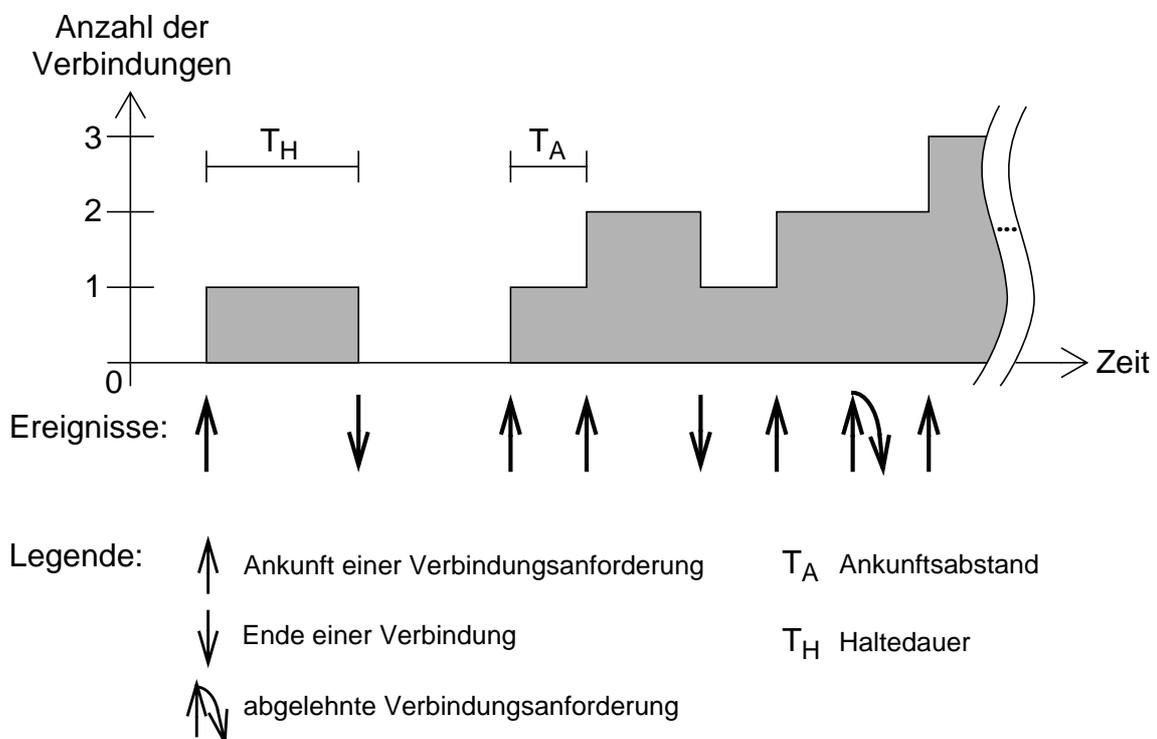
2. Dies liefert identische Ergebnisse zu symmetrischen bidirektionalen Verbindungen, falls dafür die Netzdimensionierung exakt verdoppelt wird, um für die jeweiligen Rückkanäle die identischen Ressourcen zur Verfügung zu haben. Unterschiede würden sich nur für die Annahme ergeben, dass Hin- und Rückrichtung einer Verbindung auf unterschiedlichen Wegen verlaufen können, was in heutigen Transportnetzen nicht der Fall ist und auch in dieser Arbeit nicht betrachtet wird.

- Der *Ankunftsabstand* gibt den zeitlichen Abstand zwischen zwei Verbindungsanforderungen wieder und wird durch die Zufallsvariable  $T_A$  beschrieben.
- Die *Haltedauer* ( $T_H$ ) beschreibt die Zeitdauer, für die eine erfolgreich aufgebaute Verbindung besteht, ehe die von ihr belegten Ressourcen wieder freigegeben werden.

Bild 5.4 veranschaulicht die Zusammenhänge an einem sogenannten „Belegungsgebirge“, das hier die Anzahl der erfolgreich aufgebauten Verbindungen eines Knotenpaares über der Zeit wiedergibt. Die im Bild ebenfalls angedeutete Ablehnung einer Verbindungsanforderung kann beispielsweise durch eine Überlastsituation auf einem speziell für diese Verbindung benötigten Link zu Stande kommen. Da die Verbindungsanforderung keine Wartemöglichkeit beispielsweise für eine spätere Wiederholung hat, stellt eine solche Ablehnung ein Verlustereignis dar. Das betrachtete System entspricht also einem reinen *Verlustsystem* (im Gegensatz zu der zweiten großen Klasse von Systemen, den *Wartesystemen* [158]).

Sowohl  $T_A$  als auch  $T_H$  sind statistisch unabhängig und werden jeweils durch Verteilungen beschrieben, die durch ihren Mittelwert ( $E[T_A]$  bzw.  $E[T_H] = h$ ) und Variationskoeffizienten ( $c_A$  bzw.  $c_H$ , allgemein:  $c$ ) charakterisiert werden können. In Anlehnung an [79, 157] werden drei unterschiedliche Verteilungen verwendet:

- Eine negativ-exponentielle Verteilung der jeweiligen Zufallsvariable liefert einen Variationskoeffizienten  $c = 1$ . Ein auch in der Literatur sehr häufig verwendetes Verkehrsmo-



**Bild 5.4:** Exemplarischer zeitlicher Verlauf der von einem Generator erzeugten Verbindungen

dell beruht auf  $c_A = c_H = 1$ . Es handelt sich um einen Poisson-Ankunftsprozess mit negativ-exponentiell verteilten Haltedauern (oft auch vereinfacht als *Poisson-Verkehr* bezeichnet).

- Mit einer hyper-exponentiellen Verteilungsfunktion wird ein Variationskoeffizient  $c > 1$  erreicht. Mit  $c_A > 1$  kann beispielsweise auf einfache Art ein Ankunftsprozess höherer „Spitzigkeit“ [126] nachgebildet werden.
- Um einen Variationskoeffizienten  $c < 1$  zu erreichen, werden die Zufallsvariablen  $T_A$  bzw.  $T_H$  jeweils als Summe zweier Zufallsvariablen gebildet, wovon in der vorliegenden Realisierung eine konstant und eine negativ-exponentiell verteilt ist. Anschaulich interpretiert wird damit ein eher deterministisches Verhalten beschrieben. Die Sonderfälle  $c_A = 0$  bzw.  $c_H = 0$  beschreiben einen periodischen Ankunftsprozess bzw. eine deterministische Haltedauer der Verbindungen.

Der Verteilungstyp und damit die Variationskoeffizienten sind für alle Knotenpaare im Netz identisch. Die Mittelwerte dagegen können jeweils individuell festgelegt werden. Damit ergibt sich ein identisches Verhaltensmuster aller Verbindungen, während das durch die Formel

$$A_{i,j} = \frac{E[T_H]}{E[T_A]} \quad (5.1)$$

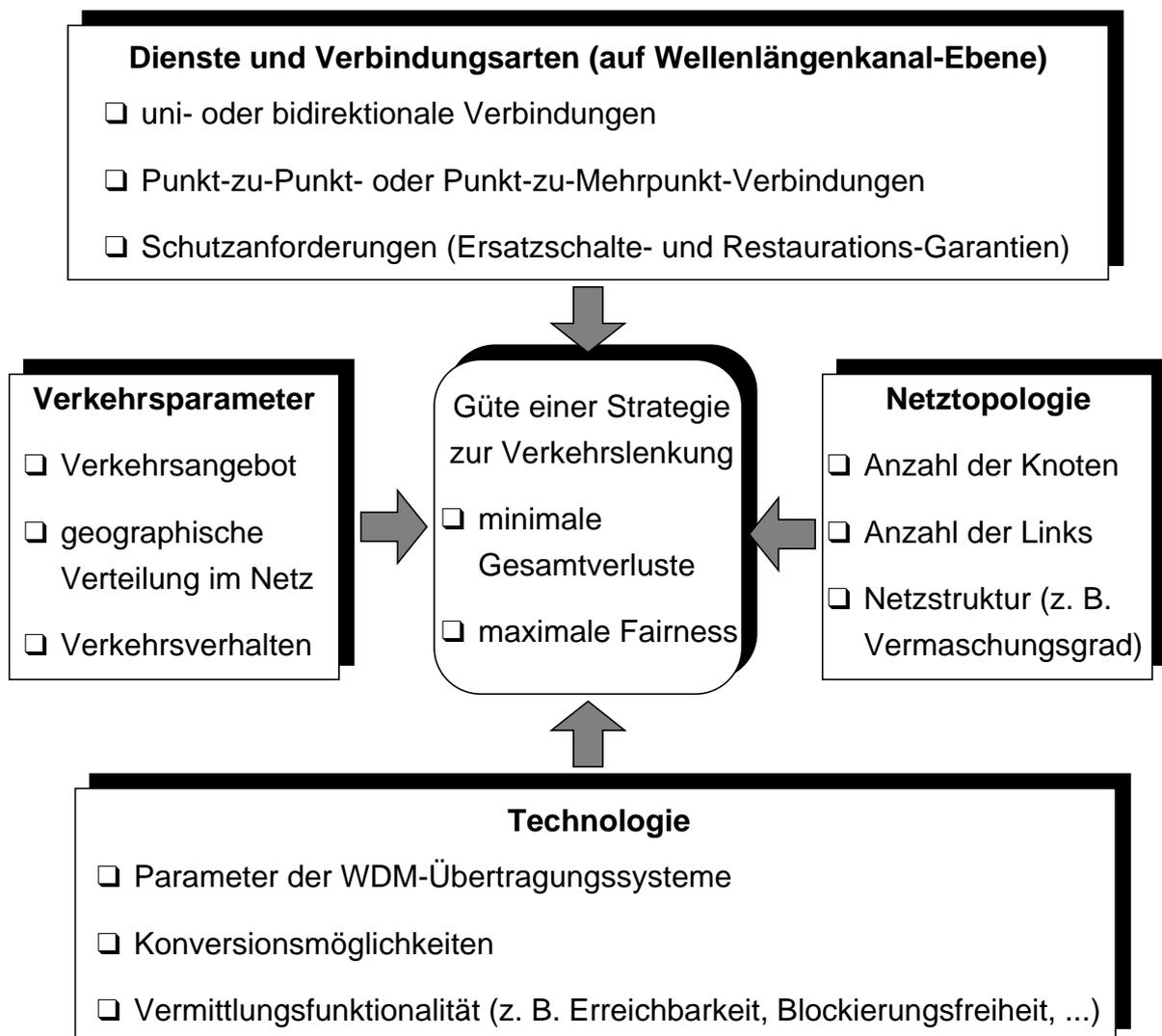
gegebene Verkehrsangebot für jedes Knotenpaar einen anderen Wert annehmen kann. Für die Studien in dieser Arbeit entspricht  $A_{i,j}$  jeweils dem für die Dimensionierung des Netzes bei statischen Verkehrsannahmen verwendeten Wert, dem sogenannten Planungswert (siehe voriger Abschnitt). Für einen Simulationslauf wird dabei für alle Knotenpaare des Netzes derselbe Wert für  $E[T_H]$  verwendet, während  $E[T_A]$  für jedes Knotenpaar entsprechend der Verkehrsmatrix gewählt wird.

## 5.2 Klassifizierung wesentlicher Einflussparameter

Die Güte einer Verkehrslenkungsstrategie hängt einerseits von den gewählten Eigenschaften der Strategie ab, andererseits von einigen die Systemumgebung definierenden Randbedingungen, unter denen diese Strategie betrachtet wird. Diese „äußeren“ Randbedingungen lassen sich durch Parameter beschreiben, die im Folgenden *Einflussparameter* genannt werden. Sie sind auch für die Planung und Dimensionierung von WDM-Netzen von Bedeutung.

Bild 5.5 zeigt eine Aufteilung wesentlicher Einflussparameter in vier Gruppen, auf die sich sowohl die im nachfolgenden Abschnitt beschriebene Dimensionierung der Beispielnetze als auch die den Schwerpunkt dieser Arbeit bildenden Untersuchungen des dynamischen Verhaltens in Kapitel 6 konzentrieren. Diese Liste kann prinzipiell erweitert werden, beispielsweise indem eine genauere Betrachtung physikalischer Aspekte der Übertragung oder Vermittlung mit einbezogen wird.

- **Dienste und Verbindungsarten:** In dieser Arbeit wird die Wellenlängenkanal-Ebene betrachtet. Wichtige Kriterien sind dabei, ob die Verbindungen uni- oder bidirektional sind und ob bei bidirektionalen Verbindungen die beiden Richtungen entlang unterschiedlicher Wege verlaufen dürfen. Weitere Parameter wie die Einrichtung von Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen oder die Garantie von Schutzanforderungen stellen zusätzliche Anforderungen an die Verkehrslenkung, welche in dieser Arbeit nicht betrachtet werden.
- **Verkehrsparameter:** Neben der Höhe des Verkehrsangebots beeinflussen weitere Parameter die Verkehrslenkung. Die geographische Verkehrsverteilung legt fest, wie groß die Verkehrsanforderungen zwischen den einzelnen Knoten sind. Eine häufig gewählte Variante für Studien ist die gleichförmige Verteilung, doch können in realen Netzen auch



**Bild 5.5:** Wesentliche Einflussparameter bei der Untersuchung einer Verkehrslenkungsstrategie

starke Häufungen bei einzelnen Knoten auftreten (sogenannter „Hot Spot-Verkehr“). Auch das zeitliche Verkehrsverhalten, beschrieben beispielsweise durch den Ankunftsprozess für Verbindungsanforderungen und die Verteilungsfunktion der Haltedauern, beeinflusst die Leistungsfähigkeit einer gegebenen Verkehrslenkungsstrategie.

- Netztopologie: Hier sind vor allem die Größe des Netzes – ausgedrückt durch die Anzahl der Knoten – sowie die Struktur des Netzes von Bedeutung. Für letztere ist das Verhältnis der Link-Anzahl zur Knoten-Anzahl eine wichtige Größe, woraus sich der Vermauschungsgrad (die mittlere Anzahl der Ein- und Ausgänge eines Knotens) ableitet.
- Technologie: Hierzu zählen sowohl Eigenschaften der Übertragungssysteme als auch der Vermittlungssysteme. Bei WDM-Übertragungssystemen spielt insbesondere die auf jeder Faser verfügbare Anzahl von Wellenlängenkanälen eine wichtige Rolle. Die Vermittlungsfunktionalität wird wesentlich von den vorhandenen Konversionsmöglichkeiten sowie von weiteren Parametern wie beispielsweise dem Blockierverhalten der Schaltmatrix beeinflusst. Es werden die drei folgenden, im Abschnitt 2.2.2.2 bereits vorgestellten Konversionsszenarien betrachtet: keine Konversion (WR-Fall), unbegrenzte Konversionsmöglichkeiten (WI-Fall) sowie begrenzte Konversion durch eine beschränkte Anzahl von Konvertern in den Knoten.

Die Güte einer Verkehrslenkungsstrategie kann auf unterschiedliche Art ausgedrückt werden. Im Wesentlichen kommen alle in Abschnitt 3.3.3 genannten Optimierungsziele für Verkehrslenkungsstrategien in Frage. In den weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit werden die folgenden Maße für die Bewertung einer Verkehrslenkungsstrategie betrachtet:

- die Gesamtverlustwahrscheinlichkeit (kurz: Gesamtverluste), die in dieser Arbeit als die Anzahl abgelehnter Verbindungsanforderungen bezogen auf die Gesamtanzahl aufgetretener Verbindungswünsche definiert ist,
- die Auslastung knapper Ressourcen, welche in den Untersuchungen in dieser Arbeit die Wellenlängenkonverter darstellen, sowie
- die Fairness, welche sich auf die Gleichbehandlung von Verbindungen zwischen Knotenpaaren unterschiedlicher Distanz bezieht.

Die Distanz  $d_{ij}$  eines Knotenpaares ist durch die Länge des kürzesten Weges zwischen den Knoten  $K_i$  und  $K_j$  gegeben. In dieser Arbeit wird die Distanz meist an Hand der Anzahl der Verbindungs- bzw. Weg-Abschnitte bestimmt.

Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wird angenommen, dass alle Verbindungen unabhängig von der Distanz ihrer Endknoten gleichberechtigt sind. Dies ist motiviert durch den zunehmenden und insbesondere in Transportnetzen ausgeprägten Trend, distanzunabhängige Preismodelle zu verwenden, bei denen vermehrt andere Gesichtspunkte wie beispielsweise die Bandbreite, das Verkehrsvolumen oder Ersatzschalte-Garantien die Preisgestaltung dominie-

ren. Dies gilt sowohl für sogenannte *carrier's carrier* Dienste als auch für die innerhalb eines Betreiberetzes bereitgestellten hochbitratigen Transportdienste.

Basierend auf diesen Annahmen wird für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Verkehrslenkungsverfahren eine möglichst große Fairness gewünscht, d. h. eine möglichst weitgehende Gleichbehandlung von Verbindungen unterschiedlicher Distanz.

## 5.3 Dimensionierung der Beispielnetze

Für die Netzdimensionierung wird die in Abschnitt 5.1 beschriebene Modellierung mit einigen zusätzlichen Annahmen verwendet. Für die Netzknoten werden die möglichen Lokationen vorgegeben. Die Platzierung der Knoten erfolgt dort, wo Verkehr entspringt bzw. endet. In den verwendeten Beispielnetzen gibt es also keine reinen Transitknoten. Außerdem wird die Anzahl der Wellenlängenkanäle pro Faser als Parameter jeweils einheitlich für alle Fasern im Netz vorgegeben.

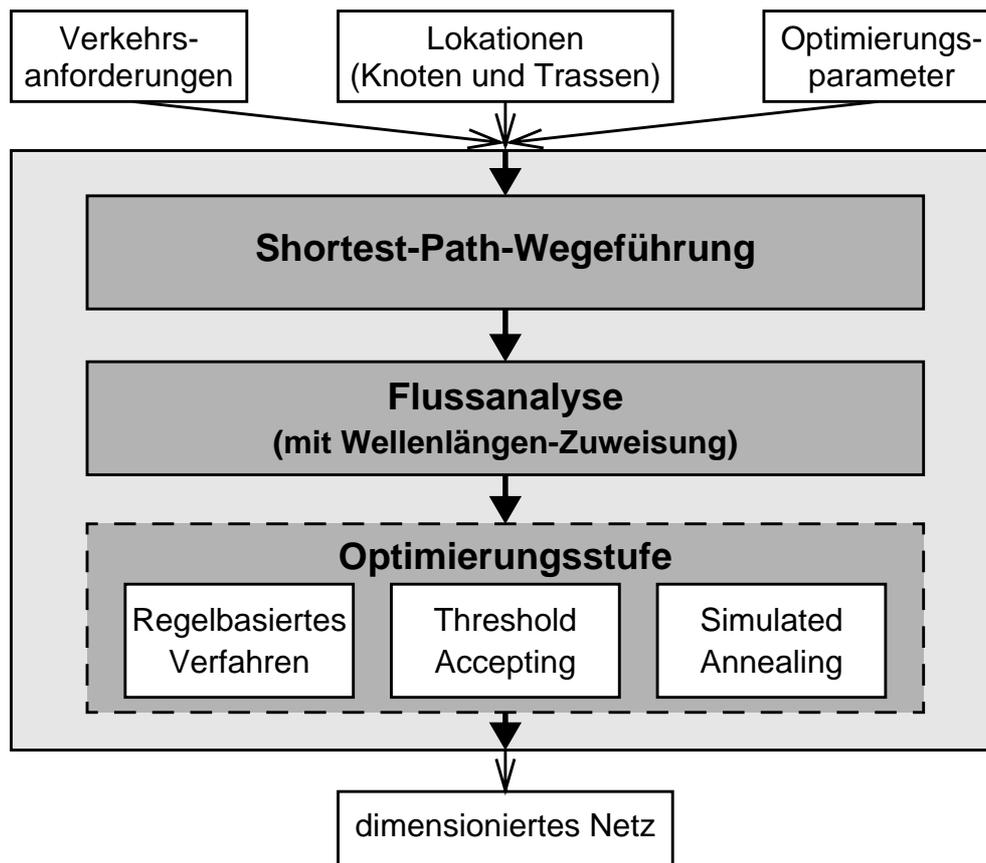
Nachfolgend wird zuerst das Vorgehen für die Netzdimensionierung beschrieben. Anschließend folgt eine Übersicht über die verwendeten Beispielnetze und deren wesentliche Charakteristika.

### 5.3.1 Verfahren und Regeln für die Dimensionierung

Gegenüber dem in Kapitel 3 beschriebenen allgemeinen Verfahren der Netzplanung wird für die Dimensionierung der Beispielnetze ein vereinfachtes Vorgehen gemäß Bild 5.6 gewählt, da der Schwerpunkt in dieser Arbeit nicht auf den unterschiedlichen Aspekten der Dimensionierung von WDM-Netzen liegt. Neben den statischen Wellenlängenkanal-Anforderungen für alle Knotenpaare stellen die Menge der Netzknoten sowie die durch Übertragungssysteme nutzbaren Trassen zwischen diesen Knoten die wichtigsten Eingangsdaten dar. Für die weiter unten erläuterte optionale Optimierungsstufe sind gegebenenfalls weitere Daten zur Steuerung der Optimierung erforderlich, die im Bild als *Optimierungsparameter* bezeichnet werden.

In einer ersten Stufe wird für alle Anforderungen der kürzest mögliche Weg (*Shortest-Path*, SP) gesucht, wobei alle erlaubten Trassen in Betracht gezogen werden. In einem zweiten Schritt wird für jede Trasse analysiert, welcher Verkehr (d. h. welche Anzahl von Wellenlängenkanälen) in jeder Richtung zu tragen ist. Daraus kann die erforderliche Anzahl von Fasern bestimmt werden, wobei beispielsweise das Fehlen von Wellenlängenkonvertern durch eine entsprechende Zuweisung von Wellenlängen zu den einzelnen Verbindungen berücksichtigt werden muss.

Als Ergebnis dieser Stufe liegt in vielen Fällen bereits ein sinnvoll dimensioniertes Netz vor. Insbesondere bei unregelmäßigen Netztopologien kann anschließend in einer Optimierungs-

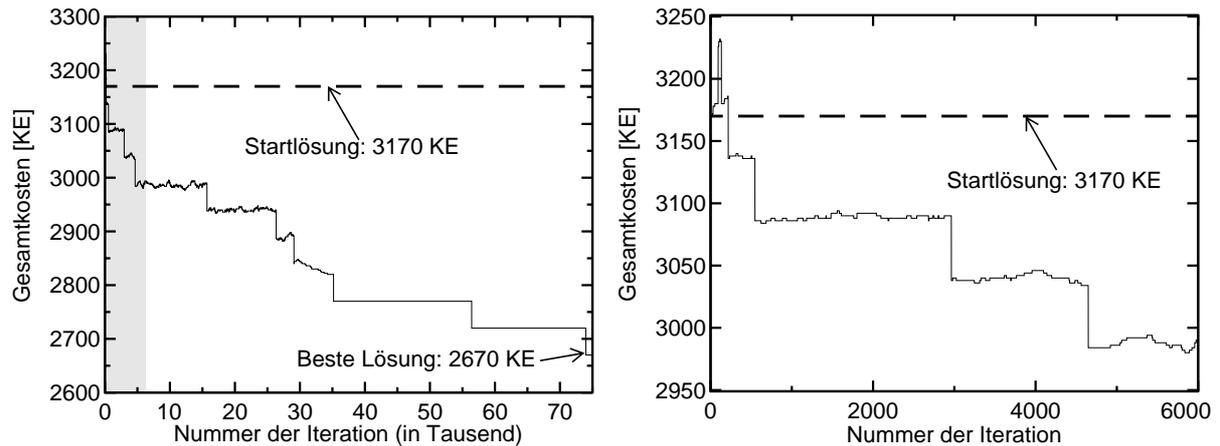


**Bild 5.6:** Vorgehensweise zur Dimensionierung der Beispielnetze

stufe versucht werden, diese Dimensionierung weiter zu verbessern. In diesem Fall wird die bisher erreichte Netzlösung als *Startlösung* für die Optimierung bezeichnet. Für diese Stufe wurden aus der Vielzahl der in Abschnitt 3.2.2.2 vorgestellten Möglichkeiten drei unterschiedliche Verfahren verwendet: ein regelbasiertes, deterministisches Vorgehen sowie zwei Varianten von nicht-deterministischen Optimierungsverfahren (*Threshold Accepting* bzw. *Simulated Annealing*).

Die verwendete Ziel- oder Kostenfunktion der Optimierungsstufe berücksichtigt ausschließlich die Dimensionierung der Übertragungssysteme: Es wird versucht, die Anzahl der benötigten Fasern im Netz und die Anzahl der belegten Wellenlängenkanäle zu minimieren. Dabei führt das Einsparen einer Faser zu einer deutlich größeren Reduktion der Gesamtkosten als das Einsparen einzelner Wellenlängenkanäle.

Bild 5.7 zeigt einen beispielhaften Verlauf der Gesamtkosten (ausgedrückt durch sogenannte Kosteneinheiten, KE) über der Anzahl von Optimierungsschritten (*Iterationen*) unter Verwendung des Verfahrens *Threshold Accepting* (TA). Obwohl der genaue Verlauf stark von den verwendeten Optimierungsparametern und dem speziellen Netzscenario abhängt, ist die stufenweise Verbesserung durch sukzessives Einsparen einzelner Fasern für die gewählten Optimie-



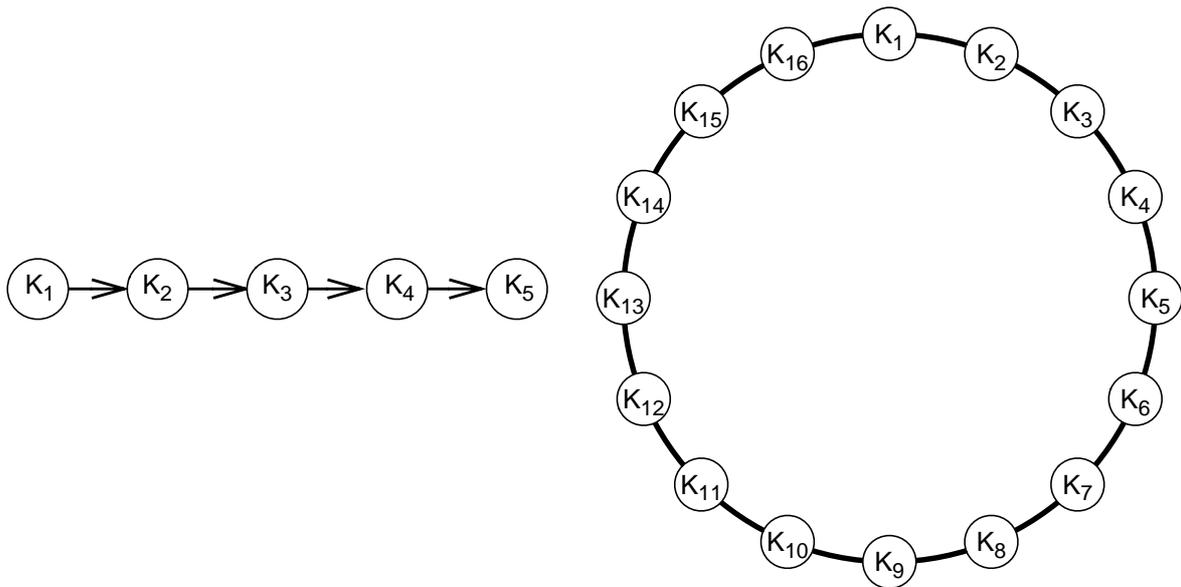
**Bild 5.7:** Beispielhafter Verlauf der Kostenfunktion bei einer Optimierung mit dem Verfahren „Threshold Accepting“; Gesamtverlauf (links) und vergrößerte Darstellung der Anfangsphase (rechts)

rungsverfahren typisch. Bis eine solche Einsparmöglichkeit gefunden wird, sind unterschiedlich viele Umlegungen einzelner Verbindungen erforderlich, die jeweils eine leichte Variation der Gesamtkosten verursachen. Im Bild ist das charakteristische Verhalten des TA-Verfahrens mit abnehmendem Schwellwert ersichtlich: Während zu Beginn der Optimierung auch Erhöhungen der Gesamtkosten akzeptiert werden, werden für hohe Iterations-Nummern nur noch Verbesserungen akzeptiert. Das rechte Diagramm zeigt den im linken Bild grau hinterlegten Anfang der Optimierungsphase in vergrößerter Darstellung. Dabei zeigt sich, dass zu Beginn durchaus Lösungen mit höheren Gesamtkosten als die Startlösung akzeptiert werden müssen, ehe dann bessere Lösungen gefunden werden können.

Die Knoten werden anschließend so dimensioniert, dass sie für alle angeschlossenen Links ausreichend groß sind. Wie bereits bei der Beschreibung des Knotenmodells in Abschnitt 5.1.2 erwähnt, kann für die Untersuchung des dynamischen Verhaltens die Anzahl der Wellenlängenkonverter verändert werden, während die Anzahl angeschlossener Fasern und die Größe der Schaltmatrix unverändert bleiben.

### 5.3.2 Beschreibung der Beispielnetze

Für die Untersuchung der wesentlichen Effekte in WDM-Netzen werden im folgenden Kapitel zuerst unidirektionale lineare Ketten als Vertreter einer sehr einfachen Topologie betrachtet. Die Studien werden für Ketten mit drei, fünf und neun Knoten durchgeführt. Alle Trassen besitzen gerichtete Links und damit Fasern, die – wie in Bild 5.8 angedeutet – von Knoten mit kleinerem Index zu Knoten mit größerem Index verlaufen.

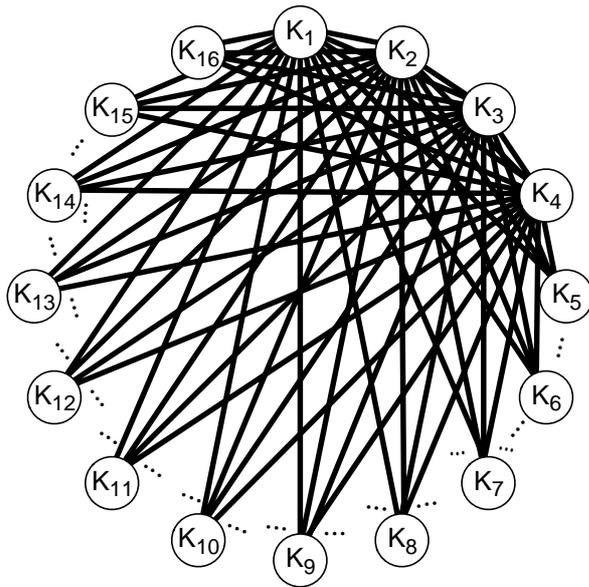


**Bild 5.8:** Lineare, unidirektionale Kette mit fünf Knoten      **Bild 5.9:** Bidirektionaler Ring mit 16 Knoten (Ringnetz)

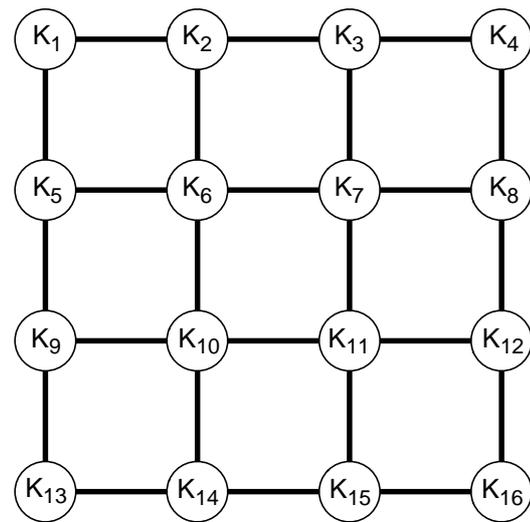
Für die Ketten werden zwei Verkehrsszenarien betrachtet. Im ersten Szenario existieren Verkehrsanforderungen jeweils zwischen Nachbarknoten und zwischen den Endknoten der Kette. In der standardmäßig verwendeten Dimensionierung ist auf jedem Abschnitt eine Faser ( $f = 1$ ) mit  $w = 32$  Wellenlängenkanälen vorhanden. Im zweiten Szenario treten Verkehrsanforderungen von jedem Knoten der Kette zum Endknoten auf. Hier wird eine linear ansteigende Anzahl von Fasern mit jeweils  $w = 16$  Wellenlängen pro Faser verwendet (siehe Abschnitt 6.1.6).

Bei allen anderen Netztopologien sind die Trassen jeweils bidirektional bestückt, d. h. sie tragen Fasern in beide Richtungen. Für die sogenannten *regelmäßigen Topologien* Ring (Bild 5.9), Vollvermaschung (Bild 5.10), Gitter (Bild 5.11) und dem sogenannten Mesh-Torus (Bild 5.12) wurde eine gleichmäßige Verkehrsverteilung angenommen, d. h. die Verkehrsanforderungen zwischen allen Knotenpaaren eines Netzes sind jeweils gleich groß. Für alle diese Netze ist jeweils eine Faser pro gerichtetem Link vorhanden. Die Anzahl der Wellenlängenkanäle beträgt bei der Vollvermaschung und dem Mesh-Torus  $w = 8$ , beim Gitternetz  $w = 16$  und beim Ring  $w = 32$ .

Die Verkehrsanforderungen für die regelmäßigen Netze sind so gewählt, dass im statischen Fall und bei Vernachlässigung von Wellenlängenkonflikten (also im WI-Fall) die Fasern jeweils voll ausgelastet sind. Dadurch wird vermieden, dass auf Grund der Netzdimensionierung große Reservekapazitäten durch nur gering ausgelastete Fasern im Netz vorhanden sind, was zu sehr geringen Verlustwahrscheinlichkeiten bei den dynamischen Betrachtungen des nächsten Kapitels führen würde.



**Bild 5.10:** Vollvermaschung mit 16 Knoten  
(vollständig gezeichnet sind nur die Links  
der Knoten  $K_1$  bis  $K_4$ )



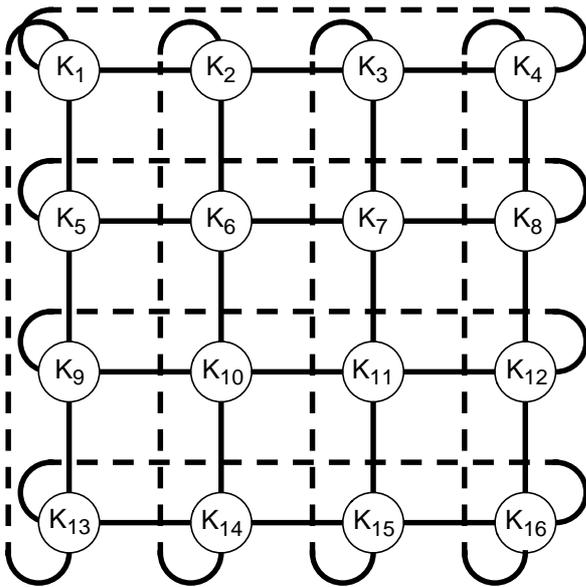
**Bild 5.11:** Gitterförmige Verknüpfung von 16  
Knoten (Gitternetz)

Zusätzlich wird in den folgenden Studien auch das in Bild 5.13 gezeigte unregelmäßige Netz als Beispiel eines fiktiven nationalen Transportnetzes verwendet. Es wird im Folgenden auch als „Deutschlandnetz“ bezeichnet. Zur Festlegung der Verkehrsanforderungen wurde zuerst eine Schätzung regionaler Bevölkerungszahlen durchgeführt. Aus diesen wurde in Anlehnung an das in [203] beschriebene Modell unter Berücksichtigung der Abstände zwischen diesen Regionen ein Verkehrswert für jedes Knotenpaar gewonnen [68].

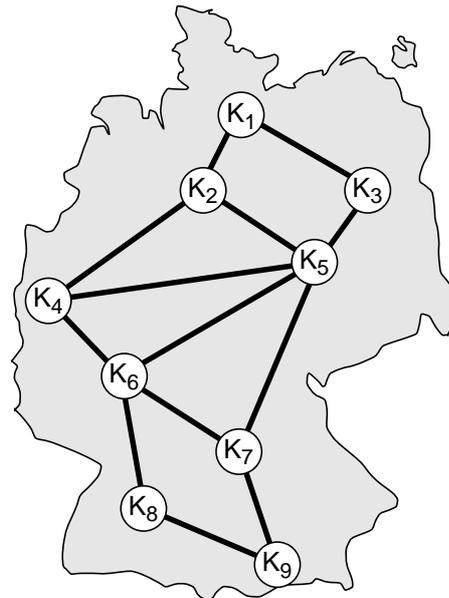
Für die Dimensionierung wird  $w = 8$  angenommen. Dies führt zu einer unterschiedlichen Anzahl von Fasern für die einzelnen Trassen, wobei die Trassen symmetrisch, d. h. mit der gleichen Anzahl von Fasern für beide Richtungen, bestückt sind. Die Dimensionierung ergibt pro Trasse zwischen vier Fasern (zwischen den Knoten  $K_8$  und  $K_9$ ) und 30 Fasern (zwischen den Knoten  $K_3$  und  $K_5$ ). Durch die hohe Faseranzahl hat auch eine – bei den gegebenen Randbedingungen unvermeidbare – partielle mittlere Belegung einzelner Fasern keine negativen Auswirkungen auf die Studien des Folgekapitels.

Tabelle 5.1 (Seite 156) vergleicht die Netze an Hand folgender Parameter:

- Die Anzahl der Knoten  $N$  entspricht der Anzahl von Cross-Connects für die späteren simulativen Untersuchungen. Diese Knoten besitzen eine Doppelfunktion: An ihnen entspringen bzw. enden Verbindungen, und sie dienen der Vermittlung von Wellenlängenkä-nälen im Netz.



**Bild 5.12:** Gleichmäßig vermaschtes Netz mit 16 Knoten („Mesh-Torus“)



**Bild 5.13:** Unregelmäßiges Beispielnetz mit neun Knoten („Deutschlandnetz“)

- Die in der Tabelle angegebene *Anzahl der Trassen*  $T$  bezieht sich auf die tatsächlich mit Fasern belegten Trassen. Als Ausgangspunkt für die Planung waren beim Deutschlandnetz weitere potentielle Trassen möglich, die bei der optimierenden Netzdimensionierung aber nicht mit Ressourcen belegt wurden. Bei allen Netzen außer den linearen Ketten gilt, dass die Anzahl der gerichteten Links  $L$  dem doppelten Wert von  $T$  entspricht, da jede Trasse Fasern für beide mögliche Richtungen trägt.
- Die *Anzahl der Fasern*  $f$  gibt die Gesamtanzahl von Fasern im Netz wieder. Für die linearen Ketten sind die Werte für eine Faser pro Link ( $f = 1$ ) mit jeweils  $w = 32$  Wellenlängen pro Faser angegeben. In späteren Untersuchungen wird diese Kanalzahl auch durch andere Kombinationen von  $f$  und  $w$  erreicht.
- Die *Anzahl der Wellenlängen* pro Faser ist für alle Fasern innerhalb eines Netzes gleich.
- Die *Anzahl der Wellenlängenanforderungen* beschreibt die Summe aller durch die Verkehrsmatrix gegebenen Verkehrsanforderungen im Netz. Diese werden als gerichtete Verbindungen auf Wellenlängen-Ebene interpretiert, die bei der Planung alle realisiert werden. Bei den späteren Untersuchungen des dynamischen Verhaltens beschreiben diese Werte jeweils den Mittelwert des Gesamtverkehrs bei einem sogenannten 100%-igen Angebot.
- Der *Vermaschungsgrad* ergibt sich aus dem Verhältnis der Anzahl gerichteter Links zur Anzahl von Knoten im Netz ( $L/N$ ). Dieser Wert beschreibt die mittlere Anzahl der Paare bestehend aus jeweils einer Ein- und einer Ausgangsstelle der Netzknoten.

Tabelle 5.1: Charakteristische Parameter der Beispielnetze

Netz	lineare Kette			Ring-netz	Vollver-maschung	Gitter-netz	Mesh-Torus	Deutsch-landnetz
Anzahl Knoten	3	5	9	16	16	16	16	9
Anzahl Trassen	2	4	8	16	120	24	32	13
Anzahl Fasern	2	4	8	32	240	48	64	218
Anzahl Wellenlängen pro Faser	32	32	32	32	8	16	8	8
Anzahl Wellenlängen-anforderungen	48	80	144	240	1920	288	240	944
Vermaschungsgrad	0,6	0,8	0,8	2	15	3	4	2,8
physikalische Konnektivität (in %)	66,6	40	22,2	13,3	100	20	26,6	36,1
Durchmesser	2	4	8	8	1	6	4	4
mittlere Distanz	1,3	1,6	1,7	4,26	1	2,6	2,13	1,94

- Die *physikalische Konnektivität* berechnet sich zu  $2 \cdot \frac{T}{N(N-1)}$  und wird in Prozent angegeben. Diese Größe beschreibt das Verhältnis der tatsächlichen Anzahl von Trassen eines Netzes bezogen auf die Anzahl der Trassen, die bei einer Vollvermaschung der gleichen Knotenzahl belegt wären.
- Der *Durchmesser*  $D$  gibt die Anzahl der Abschnitte an, die für den kürzesten Weg (*Shortest-Path*) der am weitesten auseinander liegenden Knotenpaare erforderlich sind:  $D = \max\{d_{ij}\} \quad \forall i, j \in \{1, \dots, N\}$ .
- Die *mittlere Distanz* ist als Mittelwert der kürzesten Wege aller Knotenpaare im Netz definiert. Auch hier wird die Anzahl der Abschnitte als Maß verwendet.

Neben den in diesem Abschnitt vorgestellten Netzszenarien wurden zahlreiche weitere Beispielnetze untersucht, um die im folgenden Kapitel vorgestellten Ergebnisse durch eine breite Basis von Studien abzusichern. Beispielsweise wurden andere unregelmäßige Topologien verwendet, technologische Parameter wie die Anzahl der Wellenlängenkanäle pro Faser variiert, sowie unterschiedliche (geographische) Verkehrsverteilungen und Verkehrsvolumina für die jeweiligen Netztopologien eingesetzt. Da bei der Untersuchung des Verhaltens der Verkehrslenkungsstrategien keine neuen Effekte sichtbar wurden, beschränkt sich diese Arbeit auf die hier vorgestellten Netzszenarien. Wie Tabelle 5.1 zeigt, decken diese bereits ein breites Spektrum von Werten für die charakteristischen Parameter ab.

# Kapitel 6

## Leistungsbewertung der Strategien zur Ressourcen-Belegung und Verkehrslenkung

In diesem Kapitel sollen die in Kapitel 4 entworfenen Verkehrslenkungsstrategien quantitativ bewertet werden. Die Untersuchungen werden mit Hilfe der ereignisgesteuerten Simulation basierend auf der in Kapitel 5 vorgestellten Modellierung durchgeführt. Bei allen Untersuchungen wird der dynamische Auf- und Abbau von Verbindungen auf Wellenlängenkanal-Ebene betrachtet. Alle Ergebnisse werden mit 95%-igen Vertrauensintervallen gezeigt, d. h. der tatsächliche Wert liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% im angegebenen Intervall.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen in dieser Arbeit liegt auf globalen Verkehrslenkungsstrategien. Abschnittsweise Verfahren werden auf Grund ihrer unterschiedlichen Anforderungen und Eigenschaften zu Vergleichszwecken betrachtet. Da keine Gesamtsicht des Netzes vorhanden ist, sind deren Mechanismen einfacher bei eingeschränkter Leistungsfähigkeit. Die Verkehrslenkungskontrolle ist verteilt, was die Robustheit gegen Ausfälle erhöht und prinzipiell schnellere Mechanismen ermöglicht.

Der Abschnitt 6.1 konzentriert sich auf die Auswirkungen der in Abschnitt 5.2 beschriebenen Einflussparameter, indem sehr einfache Szenarien basierend auf unidirektionalen, linearen Ketten unterschiedlicher Länge betrachtet werden. Daran können bereits zahlreiche in WDM-Netzen auftretende Effekte gezeigt werden. In Abschnitt 6.2 werden dann stärker vermaschte Netze betrachtet, und der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt auf den Eigenschaften der Verkehrslenkungsstrategie.

Den Untersuchungen bis zu diesem Abschnitt liegt ein möglichst einfaches Modell für das Verkehrsverhalten zu Grunde. Bisher gibt es sehr wenige fundierte Prognosen über das Verkehrsverhalten in künftigen dynamischen WDM-Netzen. Aus diesem Grund liegt im Abschnitt 6.3

der Schwerpunkt auf der Untersuchung, wie sich unterschiedliches Verkehrsverhalten auf die Leistungsfähigkeit von Verkehrslenkungsstrategien auswirkt.

Am Ende dieses Kapitels beleuchtet Abschnitt 6.4 eine Möglichkeit, die simulativen Untersuchungen des dynamischen Verhaltens mit der Netzplanung und -dimensionierung zu verknüpfen. Dazu werden aus den Untersuchungen der Verkehrslenkungsstrategien konkrete Verbesserungsmöglichkeiten der Netzdimensionierung aufgezeigt.

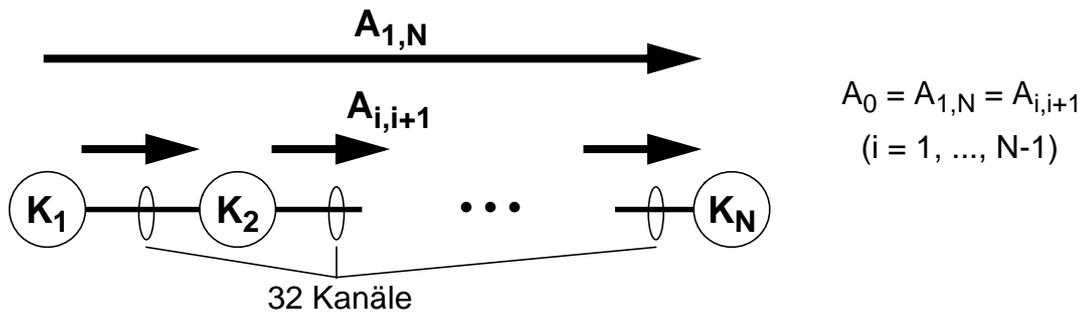
## 6.1 Untersuchungen an linearen Ketten

In diesem Abschnitt werden ausschließlich lineare, unidirektionale Ketten unterschiedlicher Länge untersucht. Bei dieser Topologie gibt es keine Alternativwege für die Verkehrsanforderungen. Dies schränkt die Möglichkeiten für die Pfadauswahl stark ein und reduziert damit die zahlreichen möglichen Strategievarianten deutlich. Außerdem wird der Einflussparameter „Topologie“ ausgeklammert. In den entstehenden vereinfachten Szenarien lassen sich bereits eine Vielzahl der bei WDM-Netzen auftretenden Effekte isoliert untersuchen.

Die Dimensionierungsregeln für die verwendeten Beispiele finden sich in Kapitel 5. Falls nicht ausdrücklich anders erwähnt, werden für die Untersuchungen folgende Parameter verwendet (siehe Skizze in Bild 6.1):

- Topologie: Es werden unidirektionale Ketten bestehend aus  $N$  Knoten untersucht ( $N \in \{3, 5, 9\}$ ).
- Dimensionierung: Es sind jeweils  $n = 32$  Wellenlängenkanäle pro Link vorhanden.
- Verkehrsparameter: Für alle Untersuchungen in diesem Abschnitt werden ein Poisson-Ankunftsprozess für Verbindungsanforderungen sowie negativ-exponentiell verteilte Haltedauern der Verbindungen angenommen. Das Verkehrsprofil wurde möglichst einfach gehalten, wobei Verbindungen unterschiedlicher Länge vorhanden sein müssen, um die spezifischen Effekte bei WDM zeigen zu können. Es werden deshalb Anforderungen zwischen je zwei Nachbarknoten (Angebot  $A_{i, i+1}$ ) sowie Anforderungen vom Anfangs- zum Endknoten der Kette (Angebot  $A_{1, N}$ ) angenommen. Für alle Untersuchungen in diesem Abschnitt sind diese Anteile jeweils gleich groß, ihr Wert wird mit  $A_0$  bezeichnet. Dadurch würde im verlustfreien Fall jeder Link den Verkehr  $2A_0$  transportieren.

In den folgenden Abschnitten werden die Verlustwahrscheinlichkeiten der verschiedenen Systeme betrachtet. Angenommen wird ein reines Verlustsystem bei dem alle abgelehnten Anforderungen verloren gehen. Zwei Arten von Verlusten bzw. Verlustwahrscheinlichkeiten werden unterschieden:



**Bild 6.1:** Lineare, unidirektionale Kette mit Verkehrsbeziehungen

- Gesamtverlustwahrscheinlichkeit: Wahrscheinlichkeit, dass eine im Netz auftretende Anforderung abgelehnt wird. Sie wird berechnet aus dem Verhältnis abgelehnter Anforderungen zur Gesamtanzahl an netzweit auftretenden Anforderungen.
- distanzabhängige Verlustwahrscheinlichkeit: Wahrscheinlichkeit, dass eine Anforderung zwischen Knoten einer bestimmten Distanz abgelehnt wird. Sie wird berechnet aus dem Verhältnis abgelehnter Anforderungen zur Gesamtzahl an Anforderungen aller Knotenpaare einer bestimmten Distanz. Die Distanz wird dabei in Anzahl zwischenliegender Abschnitte (*hops*) ausgedrückt.

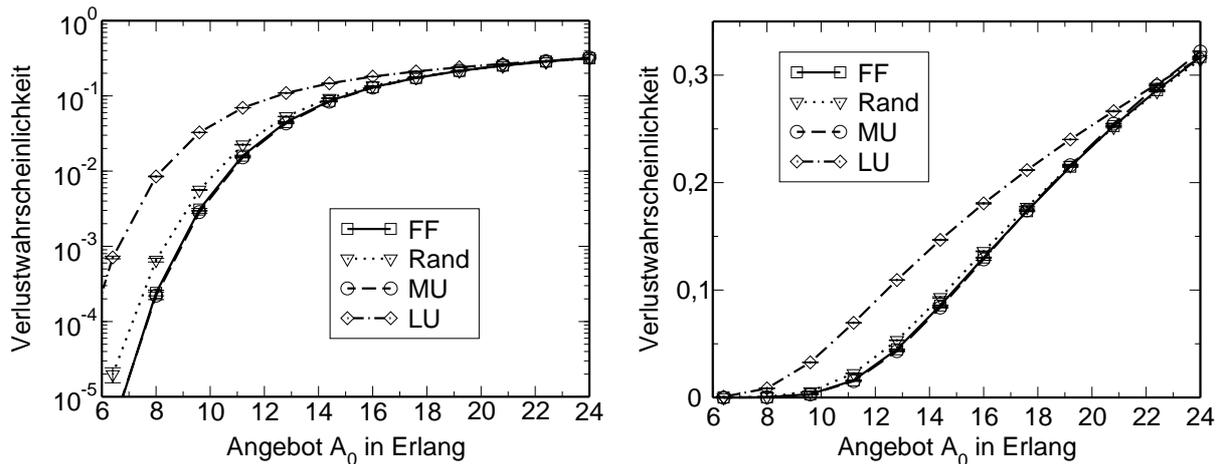
### 6.1.1 Absuchstrategie für Wellenlängenkanäle

Zuerst wird der Einfluss verschiedener Absuchstrategien für Wellenlängenkanäle untersucht. Dazu werden aus der Vielzahl der möglichen Strategien jeweils zwei nicht-adaptive und zwei adaptive Verfahren betrachtet: *First-Fit* (FF), *Random* (Rand), *Most-Used* (MU) und *Least-Used* (LU).

Für die nachfolgenden Untersuchungen wird angenommen, dass jeweils eine Faser mit 32 Kanälen auf jedem Abschnitt der Kette verfügbar ist. In den Knoten sind keine Konverter vorhanden. Bild 6.2 zeigt die Gesamtverlustwahrscheinlichkeit über dem Angebot bei der 3-Knoten-Kette:

- *First-Fit* (FF) und das hinsichtlich der Realisierung aufwändigere *Most-Used* (MU) liefern sehr ähnliche Ergebnisse.
- *Random* (Rand) hat vergleichbaren Aufwand zu FF, verursacht aber höhere Verluste.
- *Least-Used* (LU) ist deutlich schlechter als alle anderen Verfahren.

Da sich bei LU die Belegung durch die Verbindungen zwischen Nachbarknoten gleichmäßig auf alle „Farben“ verteilt, finden Ende-zu-Ende-Anforderungen kaum mehr durchgehend freie Wellenlängenkanäle. Im Gegensatz dazu wird bei FF und bei MU versucht, Verbindungen auf

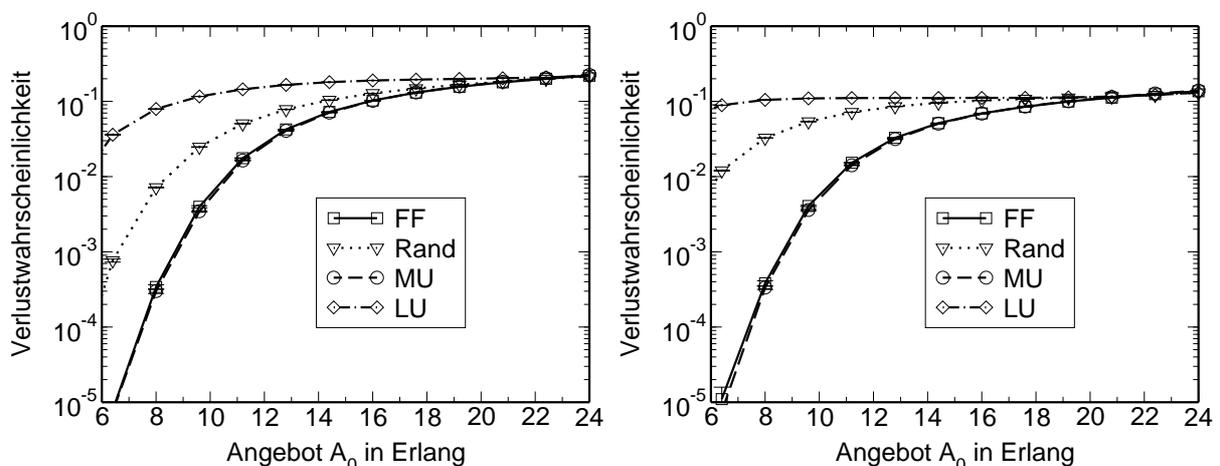


**Bild 6.2:** Gesamtverlustwahrscheinlichkeit für verschiedene Absuchstrategien bei der 3-Knoten-Kette in logarithmischer (links) und linearer (rechts) Darstellung

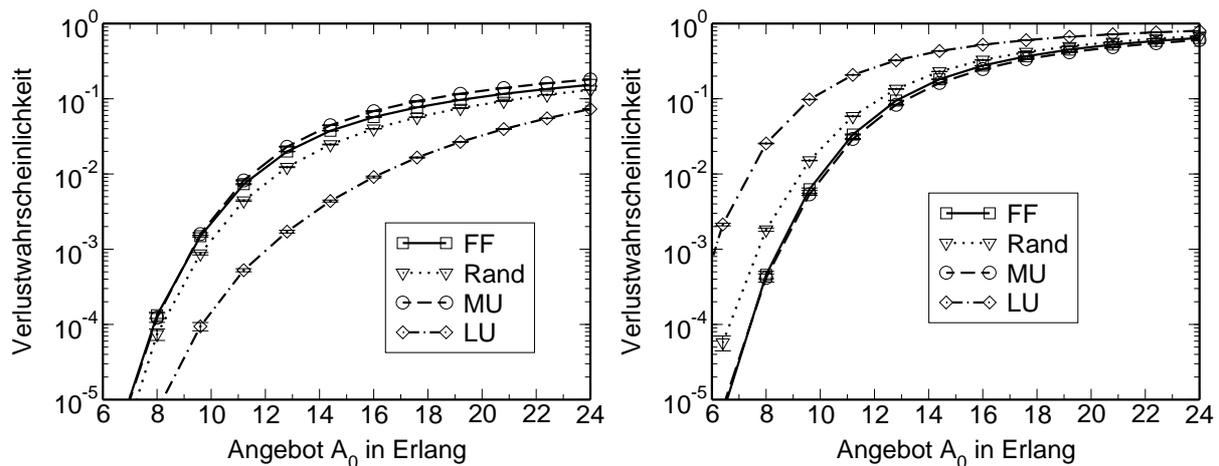
Wellenlängen mit niedrigem Index möglichst dicht zu packen, so dass höhere Wellenlängen-Nummern mit größerer Wahrscheinlichkeit frei bleiben.

Die lineare Darstellung im rechten Diagramm zeigt, dass für große Verkehrsangebote („Hochlastbereich“) ein ungefähr linearer Anstieg der Verlustwahrscheinlichkeit auftritt. Dabei ist zu beachten, dass für  $A_0 = 16$  das Gesamtangebot auf dem ersten Link der Kanalzahl (32) entspricht, für höhere Angebote also starke Überlast auftritt.

Diese Beobachtungen bestätigen sich für Ketten anderer Länge. Bild 6.3 zeigt die Ergebnisse für Ketten mit 5 bzw. 9 Knoten. Es zeigt sich, dass die Nachteile der Strategien Rand und insbesondere LU mit zunehmender Länge der Kette noch verstärkt werden. Für geringe Verkehrsangebote („Niederlast“) hängen die Ergebnisse für FF und MU kaum von der Kettenlänge ab. Für hohe Last ergeben sich mit zunehmender Länge der Kette geringere Gesamtverluste. Wie



**Bild 6.3:** Gesamtverlustwahrscheinlichkeit für verschiedene Absuchstrategien bei der 5-Knoten-Kette (links) und 9-Knoten-Kette (rechts)

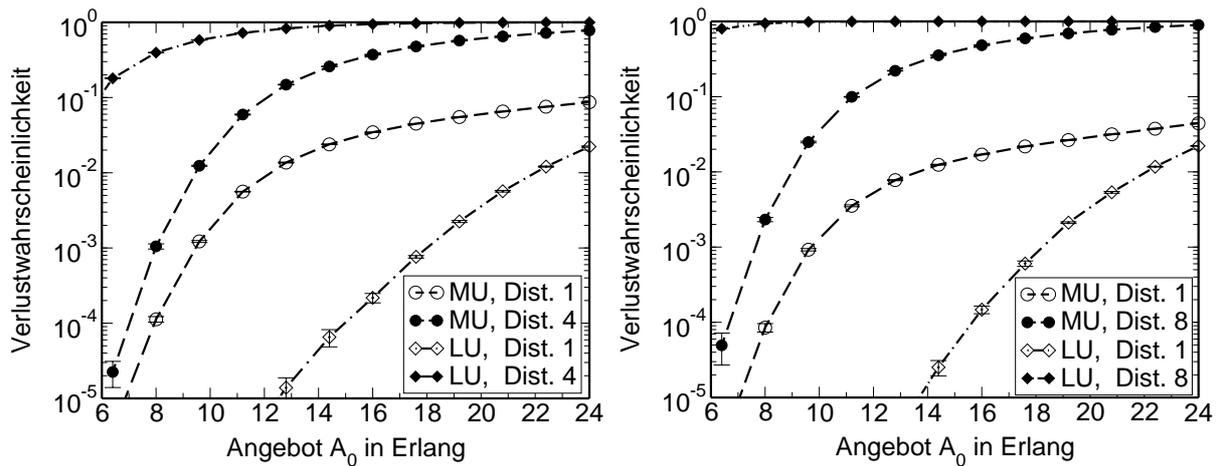


**Bild 6.4:** Verlustwahrscheinlichkeiten für verschiedene Absuchstrategien bei der 3-Knoten-Kette für Knotenpaare mit Distanz 1 (links) und Distanz 2 (rechts)

nachfolgend deutlich wird, rühren diese von den stark zunehmenden Verlusten für Verbindungen über mehrere Abschnitte (sogenannte „lange Verbindungen“) und damit den wesentlich geringeren Verlustwahrscheinlichkeiten der häufiger auftretenden kürzeren Verbindungen her.

Bild 6.4 zeigt an der 3-Knoten-Kette, dass neben den Gesamtverlusten auch die Verluste der einzelnen Knotenpaare betrachtet werden müssen, da die auftretenden Verluste stark von der Distanz (gemessen in Anzahl der Abschnitte) abhängen. Es treten Verbindungen zwischen Nachbarknoten (Distanz 1) und zwischen den Endknoten (Distanz 2) auf. Für Nachbarknoten ist die Strategie LU optimal, während die Verbindungen über zwei Abschnitte hinweg mit dieser Strategie am schlechtesten behandelt werden. Weiter zeigt sich, dass bei allen Strategien die längeren Verbindungen schlechter als die kurzen Verbindungen behandelt werden. Dieser Unterschied ist bei LU und Rand deutlich größer als bei FF oder MU. Auch bei den distanzabhängigen Verlusten zeigt sich eine große Ähnlichkeit zwischen FF und MU.

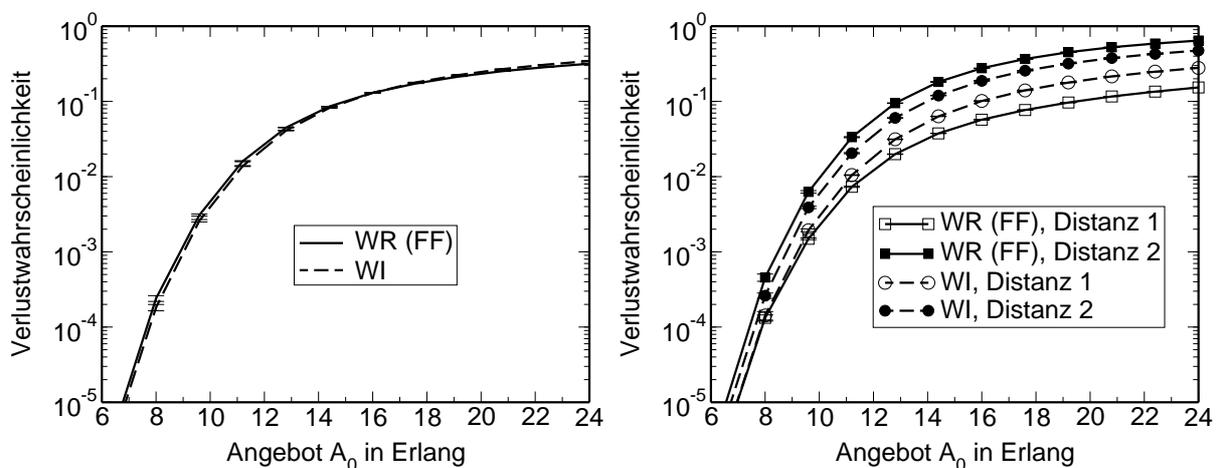
Dieses Verhalten verstärkt sich für längere Ketten und damit größere Distanz-Unterschiede zwischen Nachbarknoten (Distanz 1) und den Endknoten (Distanz  $N - 1$ ). Bild 6.5 zeigt dies für die längeren Ketten an den beiden Strategien MU und LU. Es zeigt sich die mit der Länge der Kette stark abnehmende Fairness (d. h. Gleichbehandlung von Verbindungen unterschiedlicher Länge) von LU sowie die zunehmenden Verluste der Ende-zu-Ende-Verbindungsanforderungen. Auch bei den längeren Ketten liefern MU und das aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellte FF-Verfahren sehr ähnliche Ergebnisse.



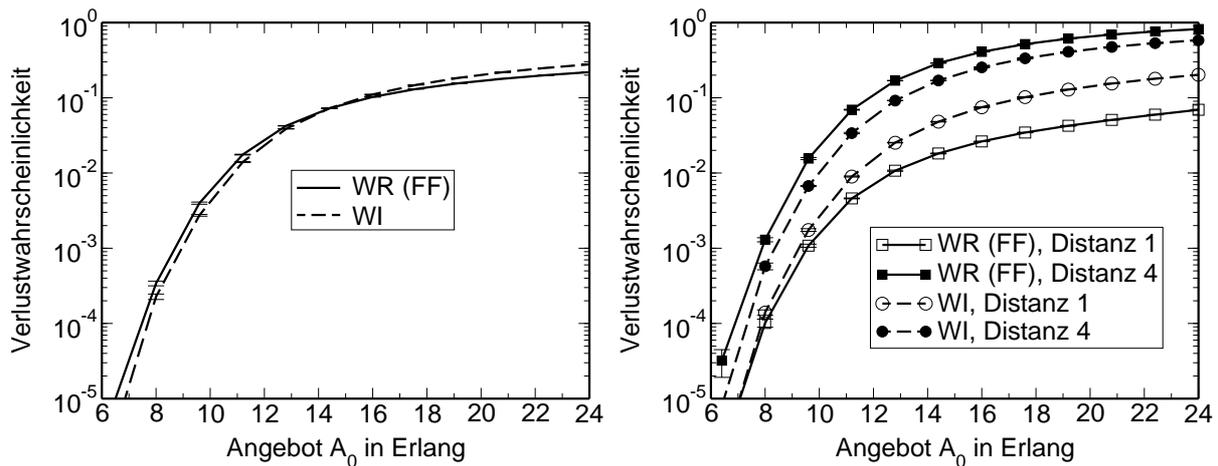
**Bild 6.5:** Distanzabhängige Verlustwahrscheinlichkeiten für verschiedene Absuchstrategien bei der 5-Knoten-Kette (links) und 9-Knoten-Kette (rechts)

## 6.1.2 Wellenlängenkonversion

Neben der Absuchstrategie ist die Konversion von Wellenlängenkanälen der zweite wichtige spezifische Aspekt für WDM-Netze. Zuerst werden die Grenzfälle WR (ohne Konversion) und WI (vollständige Konversion) untersucht. Für den WR-Fall wird die FF-Absuchstrategie betrachtet, während im WI-Fall die Absuchreihenfolge keine Auswirkungen hat. Bild 6.6 zeigt den geringen Unterschied zwischen WR und WI bei der Gesamtverlustwahrscheinlichkeit der 3-Knoten-Kette. Allerdings zeigt sich eine deutliche Verbesserung der Fairness zwischen Verbindungen mit unterschiedlicher Distanz. Dies erklärt auch den geringen Unterschied bei den Gesamtverlusten: Dadurch, dass mehr Verbindungen über zwei Abschnitte realisiert werden



**Bild 6.6:** Einfluss der Konversion auf die Gesamtverlustwahrscheinlichkeit (links) und auf die distanzabhängigen Verluste (rechts) bei der 3-Knoten-Kette

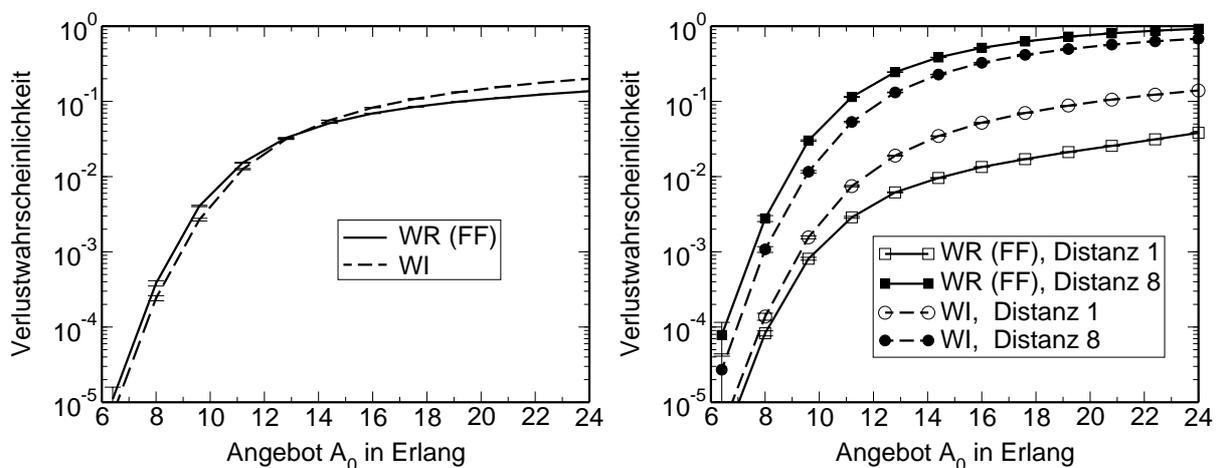


**Bild 6.7:** Einfluss der Konversion auf die Gesamtverlustwahrscheinlichkeit (links) und die distanzabhängigen Verluste (rechts) bei der 5-Knoten-Kette

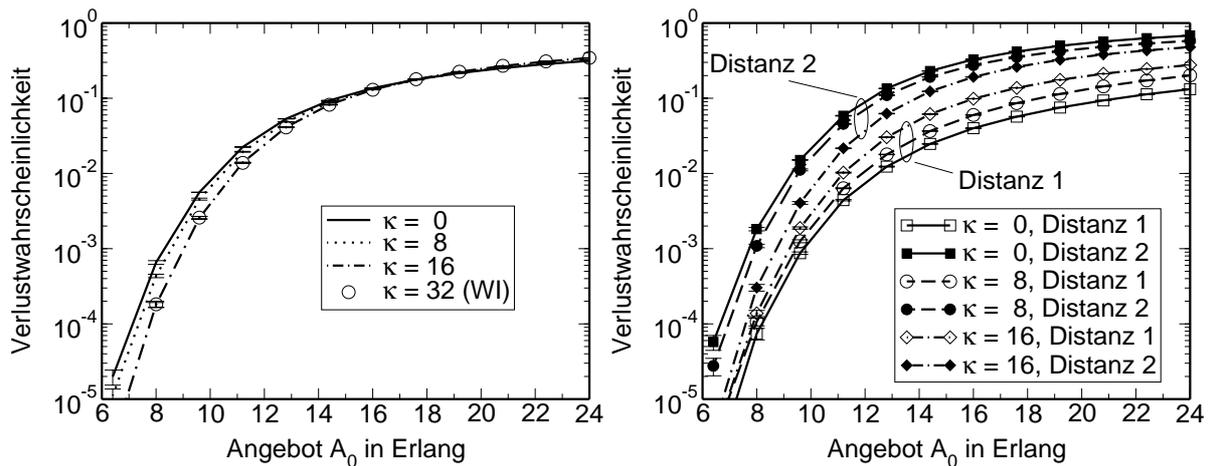
können, fallen vermehrt Ressourcen für Verbindungen zwischen den Nachbarknoten weg. Dieser Effekt führt für hohe Last sogar zu leicht höheren Verlusten der Kette mit Konversion. Bei sehr geringer Last nähern sich die Kurven wieder an, da hier die Verluste gegen Null gehen und somit Konversion keine Vorteile mehr bieten kann.

Wie Bild 6.7 für die 5-Knoten-Kette und Bild 6.8 für die 9-Knoten-Kette zeigen, bleibt bei längeren Ketten das Verhalten bezüglich der Gesamtverluste gleich, während die Benachteiligung der längeren Verbindungen zunimmt. Insbesondere die starke Auswirkung der Wellenlängenkonversion auf die Fairness wurde bei vielen in der Literatur vorgestellten Untersuchungen bisher vernachlässigt.

Der relativ geringe Unterschied bei den Gesamtverlusten zwischen WI und WR legt die Untersuchung von Konzepten mit partieller Konversion nahe. Während diese beim FF-Verfahren innerhalb der durch den WR- und den WI-Fall vorgegebenen engen Grenzen liegen, ergeben



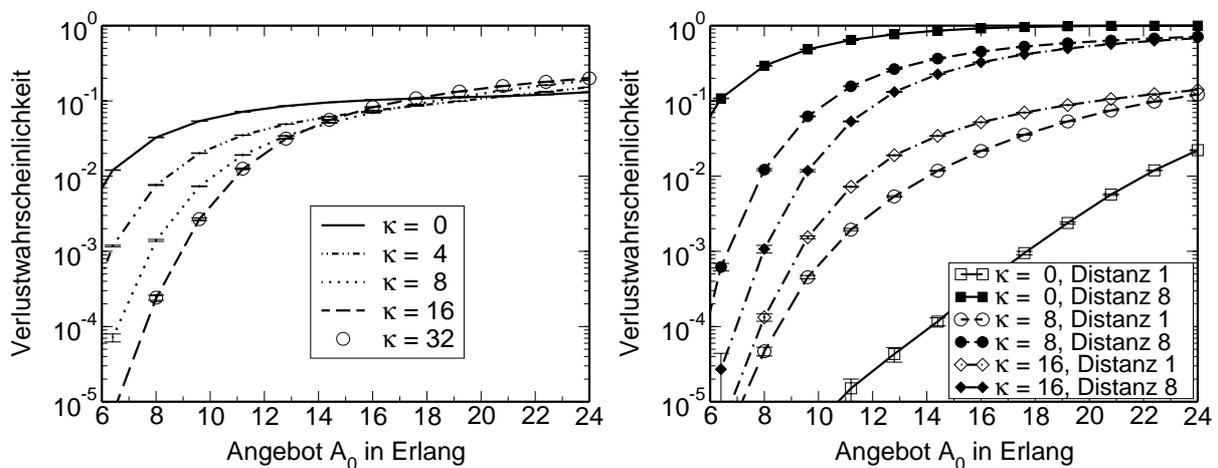
**Bild 6.8:** Einfluss der Konversion auf die Gesamtverlustwahrscheinlichkeit (links) und die distanzabhängigen Verluste (rechts) bei der 9-Knoten-Kette



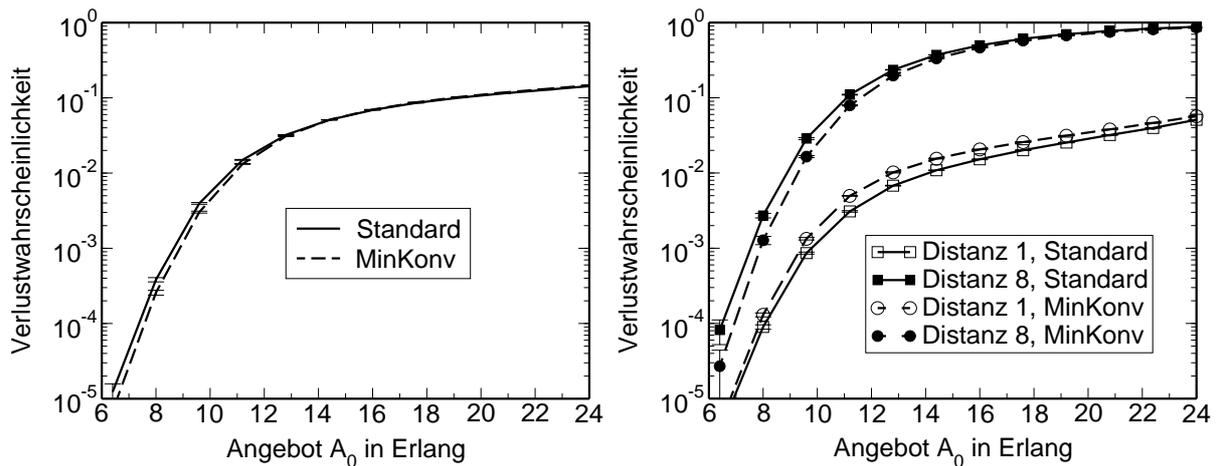
**Bild 6.9:** Einfluss der Konversionsfähigkeit bei zufälliger Wellenlängenabsuche für die 3-Knoten-Kette auf die Gesamtverluste (links) und die dinstanzabhängigen Verluste (rechts)

sich für andere Absuchstrategien teilweise größere Auswirkungen. Bild 6.9 zeigt dies für die zufällige Absuche (Rand) bei der 3-Knoten-Kette. Für einen großen Lastbereich führt eine zunehmende Anzahl von Konvertern zu einer Reduktion der Gesamtverluste. Allerdings ist diese Verbesserung nicht gleichmäßig: Während zwischen 0 und 16 Konvertern eine starke Verbesserung eintritt, führt eine Steigerung von 16 auf 32 Konverter zu keiner sichtbaren Veränderung mehr. Für die Fairness gilt entsprechendes: Konverter verbessern die Fairness deutlich, es wird aber bereits bei teilweiser Konversion die WI-Grenze nahezu erreicht.

Auch diese Beobachtung gilt für unterschiedliche Kettenlängen. Außerdem ist bei der in Bild 6.10 gezeigten 9-Knoten-Kette deutlich zu sehen, dass für sehr hohe Angebotswerte die Verluste um so größer sind, je mehr Konverter vorhanden sind (linkes Diagramm). Die minimale Gesamtverlustwahrscheinlichkeit wird in Abhängigkeit von der Last bei unterschiedlicher Konversionsfähigkeit erreicht. Dies lässt sich wieder durch die mit zunehmender Konver-



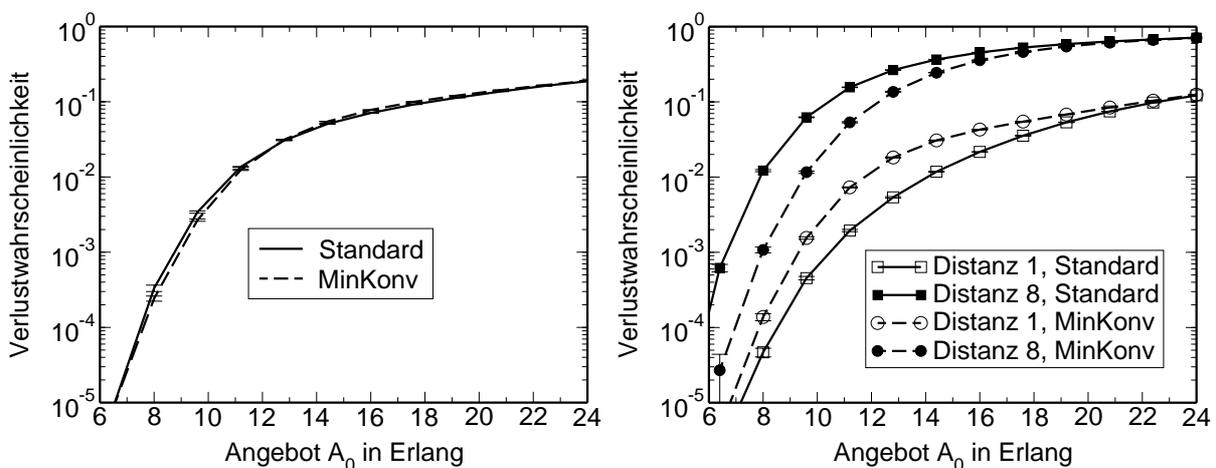
**Bild 6.10:** Einfluss der Konversionsfähigkeit bei zufälliger Wellenlängenabsuche für die 9-Knoten-Kette auf die Gesamtverluste (links) und die dinstanzabhängigen Verluste (rechts)



**Bild 6.11:** Einfluss der Verwendungsstrategie für Konverter bei partieller Konversion mit 2 Konvertern für die 9-Knoten-Kette (links: Gesamtverluste, rechts: distanzabhängige Verluste)

sion steigende Erfolgchance langer Verbindungen erklären, die in diesem Szenario im Vergleich zu den kurzen Verbindungen die achtfache Anzahl von Wellenlängenpfad-Segmenten belegen.

Bei partieller Konversion ergibt sich bezüglich der Verwendung von Konvertern ein weiterer Freiheitsgrad, der bisher in der Literatur kaum beachtet wurde. In den Bildern 6.11 und 6.12 wird die in Abschnitt 4.4 beschriebene Strategie zur minimierten Konverterverwendung (*MinKonv*) mit der bisher betrachteten Strategie (*Standard*) für die 9-Knoten-Kette verglichen. Es wird die FF-Absuchstrategie verwendet. Während sich sowohl im WI- als auch im WR-Fall eine Strategie zur Verwendung von Konvertern nicht auswirken kann, zeigen die Ergebnisse für 2 Konverter (entspricht 6,25% Konversion, Bild 6.11) bzw. 8 Konverter (entspricht 25% Konversion, Bild 6.12) zwei wesentliche Verbesserungen durch die MinKonv-Strategie bei partieller Konversion:



**Bild 6.12:** Einfluss der Verwendungsstrategie für Konverter bei partieller Konversion mit 8 Konvertern für die 9-Knoten-Kette (links: Gesamtverluste, rechts: distanzabhängige Verluste)

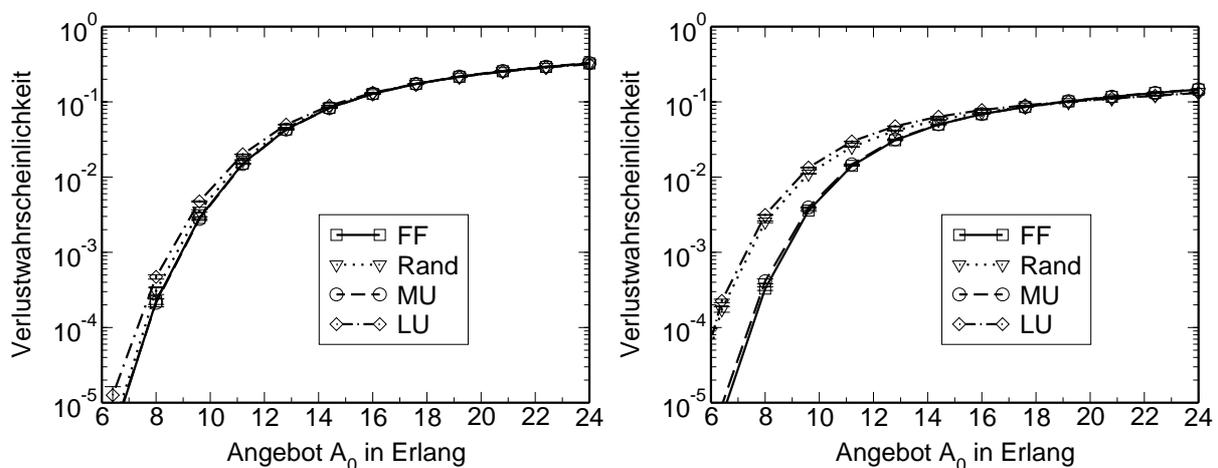
- Für geringe Last können die Gesamtverluste reduziert werden, ohne dass sich bei höherer Last nennenswerte Verschlechterungen ergeben (jeweils linkes Diagramm).
- Die distanzabhängigen Verluste zeigen, dass die Fairness praktisch über den gesamten Lastbereich deutlich verbessert wird (jeweils rechtes Diagramm).

### 6.1.3 Faserzahl

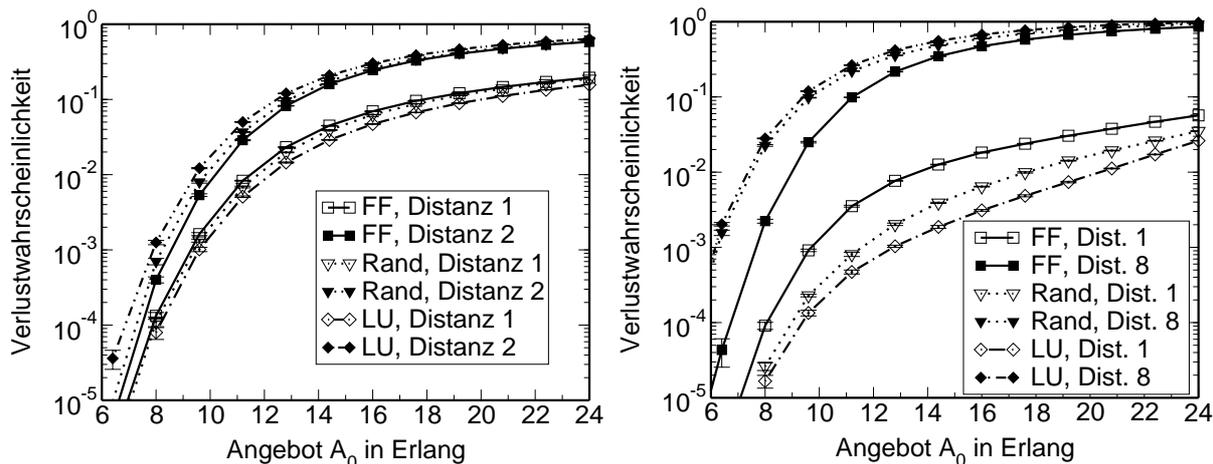
In den bisherigen Untersuchungen wurde stets eine Faser pro Abschnitt angenommen. Im Folgenden sollen die Auswirkungen untersucht werden, falls die gleiche Gesamtanzahl von Kanälen durch mehrere Fasern mit jeweils entsprechend reduzierter Kanalzahl realisiert wird. Die Gesamtzahl bleibt dabei konstant bei  $n = f \cdot w = 32$ .

Die Gesamtverluste bei verschiedenen Absuchstrategien für die 3- und 9-Knoten-Kette sind in Bild 6.13 dargestellt. Auf jedem Netzabschnitt sind dabei  $f = 4$  Fasern mit jeweils  $w = 8$  Wellenlängen vorhanden. Die Absuchstrategien verhalten sich ähnlich zum Szenario mit einer Faser. Allerdings sind die Unterschiede zwischen den Verfahren geringer geworden und auch die Abhängigkeit von der Länge der Kette ist nicht mehr so stark ausgeprägt. Wie Bild 6.14 zeigt, gilt dies auch für die Verluste zwischen den Nachbarknoten (Distanz 1) und den Endknoten (Distanz 2 bzw. 8).

Damit zeigt sich eine Entsprechung zwischen der Verwendung zusätzlicher Fasern in Netzen ohne Konversion und dem Einsatz von Wellenlängenkonvertern. Die zusätzlichen Fasern wirken sich ähnlich wie partielle Konversion aus, da nun für jede Wellenlänge („Farbe“) mehrere Kanäle auf einem Link zur Verfügung stehen.



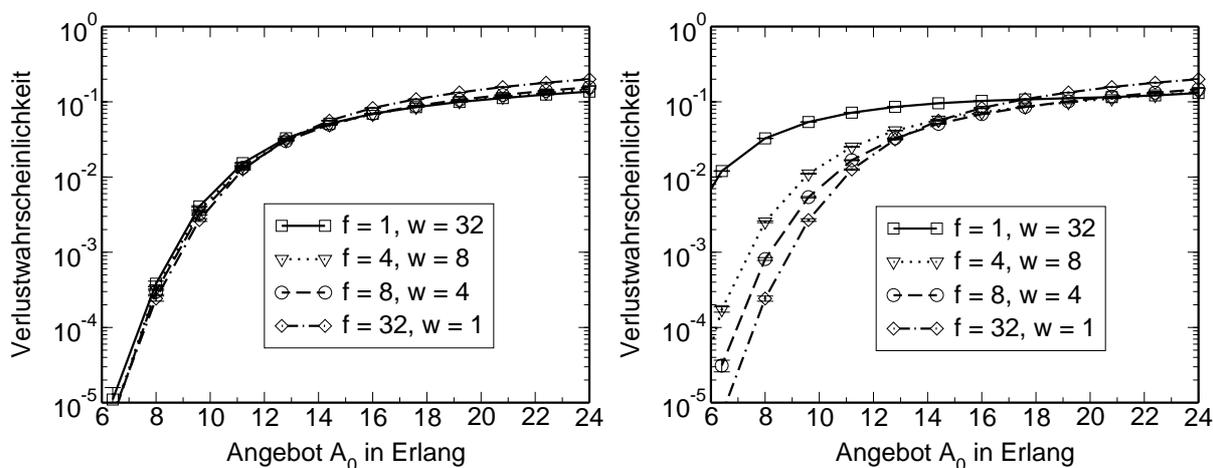
**Bild 6.13:** Gesamtverluste verschiedener Absuchstrategien für  $\kappa = 0$  und 4 Fasern mit jeweils 8 Wellenlängenkanälen für die 3-Knoten-Kette (links) und die 9-Knoten-Kette (rechts)



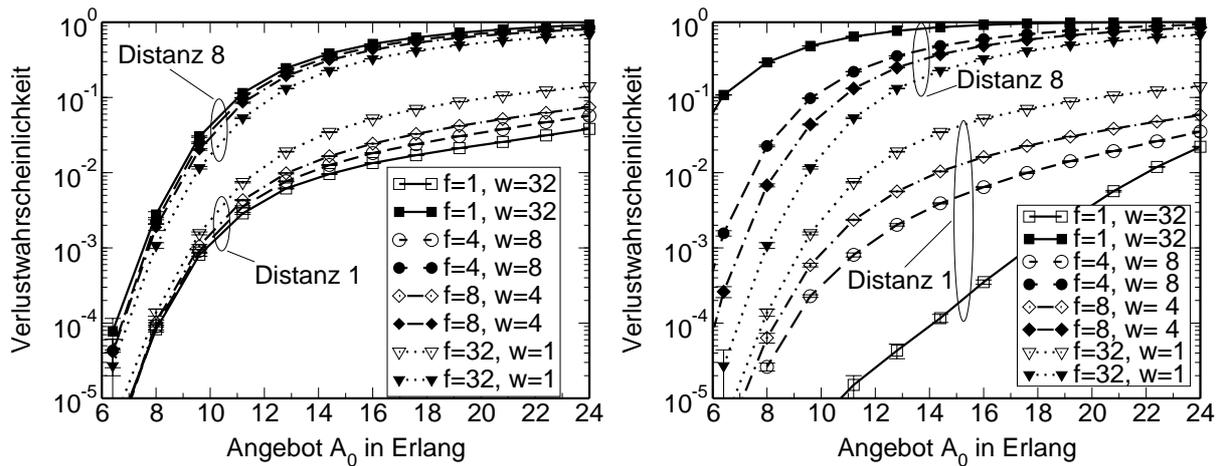
**Bild 6.14:** Distanzabhängige Verluste verschiedener Absuchstrategien für  $\kappa = 0$  und 4 Fasern mit jeweils 8 Kanälen für die 3-Knoten-Kette (links) und die 9-Knoten-Kette (rechts)

Wie die nachfolgenden Bilder zeigen, sind die Auswirkungen zunehmender Faserzahl stark von der Absuchstrategie abhängig.

- Für FF ergeben sich kaum Änderungen bei den Gesamtverlusten (Bild 6.15, linkes Diagramm) und nur relativ geringe Verbesserungen bei der Fairness (Bild 6.16, linkes Diagramm). Dies gilt auch für die MU-Strategie.
- Im Gegensatz dazu sind die Auswirkungen bei Rand (in den Bildern 6.15 und 6.16 jeweils im rechten Diagramm gezeigt) und der nicht gezeigten LU-Strategie deutlich größer.



**Bild 6.15:** Gesamtverluste bei der 9-Knoten-Kette ohne Konverter und mit unterschiedlicher Faserzahl pro Link bei Absuchstrategie FF (links) und Rand (rechts)



**Bild 6.16:** Distanzabhängige Verluste bei der 9-Knoten-Kette ohne Konverter und mit unterschiedlicher Faserzahl pro Link bei Absuchstrategie FF (links) und Rand (rechts)

### 6.1.4 Anzahl der Kanäle

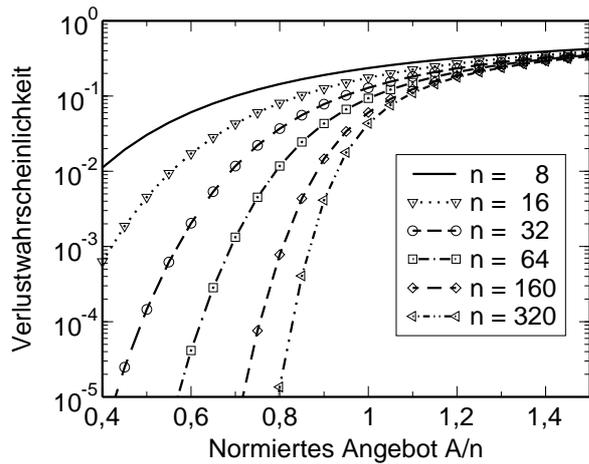
Bisher wurden für alle Szenarien  $n = 32$  Kanäle pro Link angenommen. Dieser Abschnitt beleuchtet, welchen Einfluss die Gesamtanzahl der auf einem Link verfügbaren Kanäle auf die Verlustwahrscheinlichkeit unter verschiedenen Randbedingungen hat. Die Untersuchungen werden an der linearen Kette mit 9 Knoten und einer Faser pro Link durchgeführt.

Zum Vergleich werden in Bild 6.17 zuerst die Verluste gemäß der Erlang-Formel für M/M/ $n$ -Verlustsysteme gezeigt [159]:

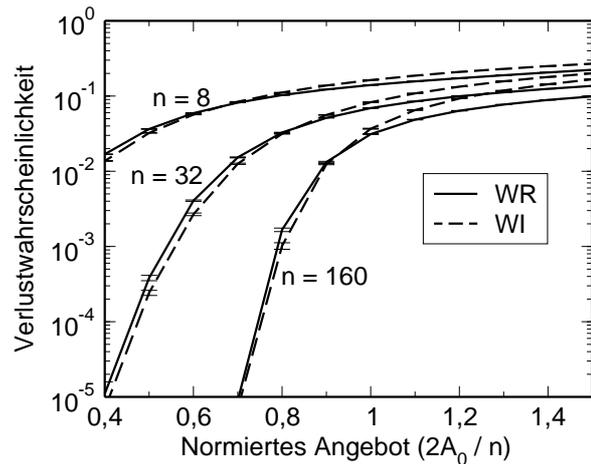
$$B = \frac{A^n/n!}{\sum_{i=0}^n \frac{A^i}{i!}} \quad (6.1)$$

In obiger Formel beschreibt  $B$  die Verlustwahrscheinlichkeit,  $n$  die gesamte Anzahl der Kanäle und  $A$  das Gesamtangebot. Im Bild sind die Verluste über dem sogenannten „normierten Angebot“  $A/n$ , d. h. dem Angebot pro Kanal aufgetragen. Es tritt der unter dem Begriff „Bündelungsgewinn“ bekannte Effekt auf, dass für ein gegebenes normiertes Angebot die Verlustwahrscheinlichkeit des Systems mit zunehmender Kanalzahl abnimmt. Dabei gilt, dass die relative Veränderung für große Kanalzahlen geringer wird.

Das M/M/ $n$ -System entspricht einer 2-Knoten-Kette mit den in diesem Kapitel gemachten Annahmen. Bild 6.18 zeigt, dass das prinzipielle Verhalten der 9-Knoten-Kette sehr ähnlich zum Verhalten des M/M/ $n$ -Systems ist. Gezeigt ist die Gesamtverlustwahrscheinlichkeit über dem normierten Angebot  $2A_0/n$ . Gemäß der Definitionen am Beginn des Unterkapitels 6.1 entspricht dies dem Angebot pro Kanal auf jedem Link, falls keine Verluste auftreten (Bild 6.1). Gezeigt sind die Verläufe sowohl für den WI-Fall als auch den WR-Fall. Für alle



**Bild 6.17:** Verluste gemäß der Erlang-Formel für ein  $M/M/n$ -Verlustsystem

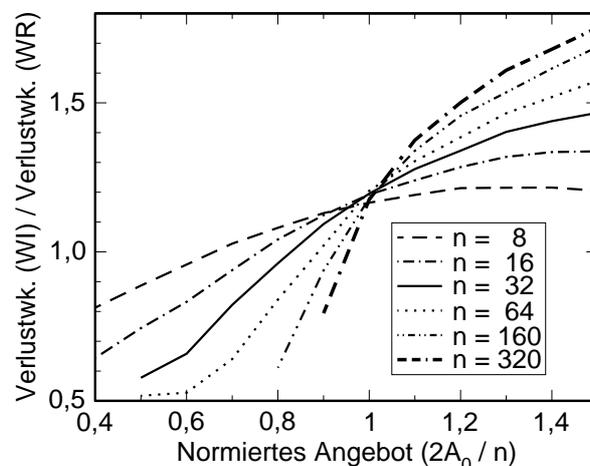


**Bild 6.18:** Verluste bei der 9-Knoten-Kette (mit FF-Absuchstrategie im WR-Fall)

WR-Szenarien in diesem Unterkapitel wird die FF-Absuchstrategie gezeigt, wobei auch hier die MU-Absuchstrategie zu fast identischen Ergebnissen führte. Die Kurven zeigen, dass der Unterschied zwischen WI und WR relativ gering ist. Für kleine Angebotswerte liefert WI etwas kleinere, für größere Angebotswerte größere Verlustwahrscheinlichkeiten.

Bild 6.19 zeigt das Verhältnis der Verlustwahrscheinlichkeiten der Szenarien WI und WR ( $B^{WI}$  bzw.  $B^{WR}$ ) mit FF-Absuchstrategie über dem normierten Angebot. Das Verhältnis wird aus den jeweiligen Mittelwerten der Gesamtverlustwahrscheinlichkeiten gebildet. Für große Kanalzahlen ergeben sich sehr kleine Wahrscheinlichkeitswerte, so dass die entsprechenden Kurven auf Grund der geringen statistischen Aussagesicherheit nicht bis zu sehr kleinen Angebotswerten fortgeführt werden.

Auffällig ist, dass Konverter nur für kleine Werte des Angebots eine Reduzierung der Verlustwahrscheinlichkeit bewirken können ( $B^{WI}/B^{WR} < 1$ ), während für ein größeres Verkehrsange-



**Bild 6.19:** Verhältnis der Verlustwahrscheinlichkeiten (Gesamtverluste) für die Konversionsszenarien WI und WR bei der 9-Knoten-Kette mit unterschiedlichen Kanalzahlen

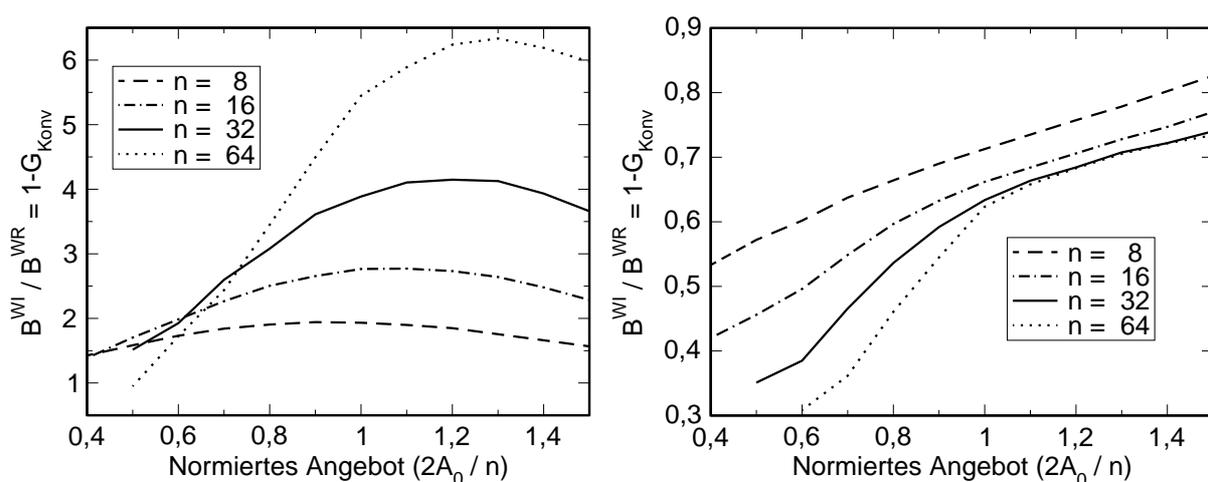
bot  $B^{WI} > B^{WR}$  gilt. Es zeigt sich außerdem, dass dieses Verhalten auch von der verfügbaren Kanalzahl  $n$ , d. h. der Bündelgröße jedes Links abhängig ist: Mit zunehmender Kanalzahl werden die Verbesserungen im WI-Fall für kleine Angebote größer, gleichzeitig vergrößern sich aber auch die Verluste für größere Angebote.

Die Erklärung für dieses Verhalten lässt sich aus Bild 6.20 ableiten. Dort wird das Verhältnis  $B^{WI}/B^{WR}$  über dem normierten Angebot ( $2A_0/n$ ) für verschiedene Knotendistanzen dargestellt. Das linke Bild zeigt die Verlustwahrscheinlichkeiten für Knoten der Distanz 1 (Nachbarknoten), das rechte Bild für die Endknoten der betrachteten 9-Knoten-Kette (Distanz 8). Wie oben werden auch in diesem Bild die Kurven aus dem Verhältnis der Mittelwerte gewonnen und für zu geringe statistische Aussagesicherheit abgebrochen.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Verhältnis  $B^{WI}/B^{WR}$  und damit der sogenannte Konversionsgewinn

$$G_{Konv} = 1 - B^{WI}/B^{WR} \quad (6.2)$$

stark von der jeweiligen Distanz der Knoten abhängt. Für Nachbarknoten vergrößern sich die Verlustwahrscheinlichkeiten unabhängig vom Angebot und von der Bündelgröße praktisch immer („negativer Konversionsgewinn“ mit  $G_{Konv} < 0$ ), während sich für Knoten der Distanz 8 im gesamten betrachteten Parameterbereich eine Verbesserung ergibt ( $B^{WI} < B^{WR}$ , entspricht  $G_{Konv} > 0$ ). Bei kleinem Angebot führt eine zunehmende Bündelgröße bei Nachbarknoten nur zu einer geringen Zunahme des Verlustverhältnisses, während sich das Verhältnis für Knoten der Distanz 8 deutlich verringert. Bei hohem Angebot verursacht eine zunehmende Bündelgröße dagegen einen starken Anstieg des Verlustverhältnisses für Nachbarknoten, während sich bei Knoten der Distanz 8 kaum mehr eine Reduktion ergibt. Dieses Verhalten erklärt den



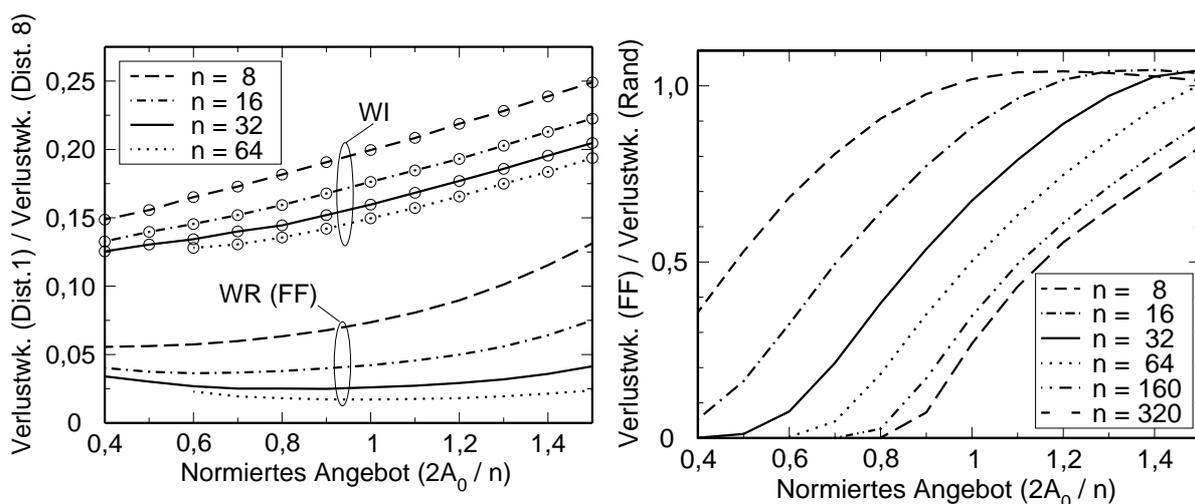
**Bild 6.20:** Verhältnis der Verlustwahrscheinlichkeiten der Konversionsszenarien WI und WR für Knoten der Distanz 1 (links) und der Distanz 8 (rechts) bei der 9-Knoten-Kette (mit FF-Absuchstrategie im WR-Fall)

in Bild 6.19 beobachteten Effekt, dass mit Konversion bei hohem Angebot mit steigender Bündelgröße eine zunehmende Verschlechterung gegenüber dem WR-Fall auftritt.

In Bild 6.21 ist das Verhältnis der Verlustwahrscheinlichkeiten für die Distanzen 1 und 8 über dem normierten Angebot aufgetragen. Parameter der Kurvenschar sind sowohl die Bündelgröße als auch das Konversionsszenario (WR bzw. WI). Für den WR-Fall wurde die FF-Wellenlängenabsuche verwendet, auch hier lieferte MU praktisch identische Ergebnisse.

Knotenpaare mit kurzer Distanz besitzen deutlich geringere Verlustwahrscheinlichkeiten als Knotenpaare mit großer Distanz: Die Verluste für Distanz 1 sind für die gezeigten Angebotswerte um mindestens den Faktor 4 geringer als für Distanz 8. Weiter zeigen die Kurven, dass die Verwendung von Konvertern die Fairness zwischen unterschiedlichen Knotendistanzen deutlich verbessert, im dargestellten Wertebereich um ca. den Faktor 2 bis 6. Bild 6.21 zeigt auch, dass die Bündelgröße ebenfalls Auswirkungen hat. Die Fairness nimmt mit zunehmender Bündelgröße ab, d. h. insbesondere die Nachbarknoten profitieren vom Bündelungsgewinn durch steigende Kanalzahlen.

Die Bündelgröße wirkt sich auch auf die Leistungsfähigkeit der Wellenlängen-Absuchstrategie aus. Wie Bild 6.22 zeigt, sind die Verluste bei der FF-Strategie fast im gesamten dargestellten Bereich des Verkehrsangebots geringer als bei der Rand-Strategie. Dieser Effekt nimmt mit steigender Bündelgröße deutlich zu. Nur bei sehr großer Last führt die Rand-Strategie zu etwas besseren Ergebnissen. Daraus folgt, dass insbesondere für große Bündel (entsprechend WDM-Systemen mit einer großen Anzahl von Wellenlängen) der Wellenlängen-Absuchstrategie eine große Bedeutung zukommt.



**Bild 6.21:** Verhältnis der Verlustwahrscheinlichkeiten für verschiedene Distanzen bei der 9-Knoten-Kette

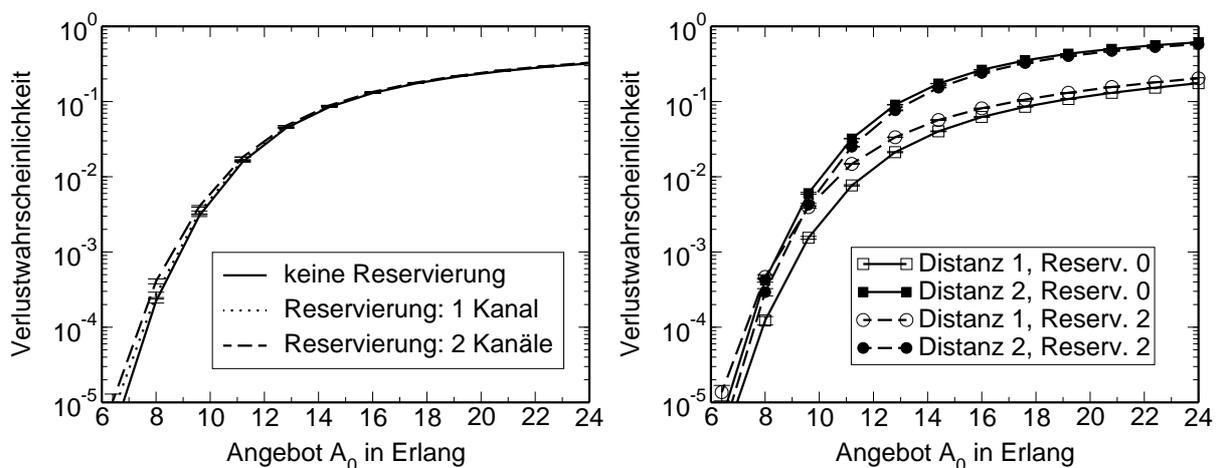
**Bild 6.22:** Verhältnis der Verlustwahrscheinlichkeiten für verschiedene Wellenlängen-Absuchstrategien bei der 9-Knoten-Kette

## 6.1.5 Verfahren zur Verbesserung der Fairness

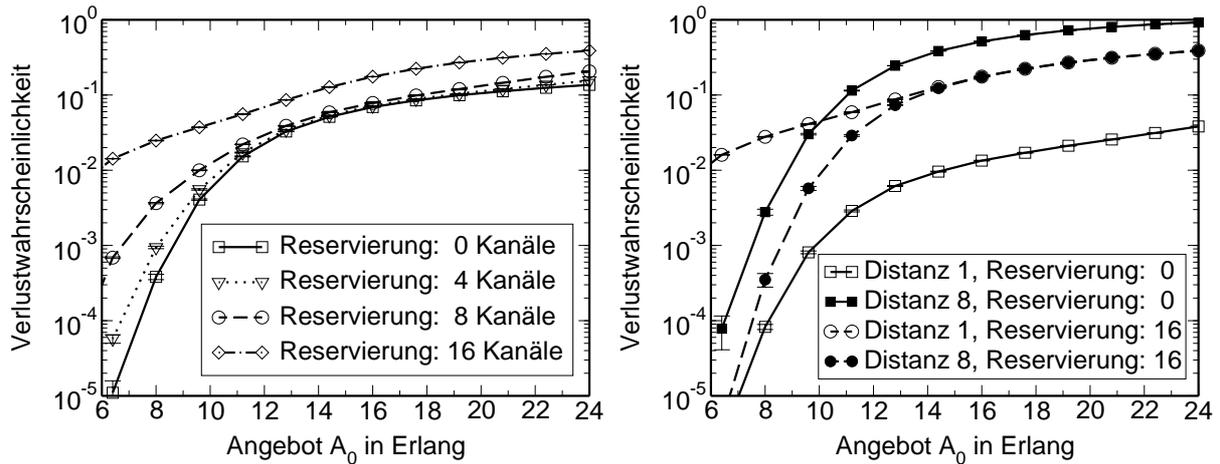
Aus den bisherigen Studien folgt, dass Verbindungen über mehrere Abschnitte hinweg („lange Verbindungen“) gegenüber Verbindungen zwischen Nachbarknoten benachteiligt sind. Dies gilt in zunehmendem Maße mit geringer werdender Konversionsmöglichkeit im Netz. Um die Fairness (d. h. Gleichbehandlung von Knotenpaaren unterschiedlicher Distanz) zu verbessern, sind mehrere Verfahren denkbar. Im Folgenden werden zwei Beispiele untersucht: ein Reservierungsverfahren und ein Schwellwertverfahren. Ziel ist es, die Verluste der langen Verbindungen auf Kosten einer höheren Verlustwahrscheinlichkeit bei kurzen Verbindungen zu reduzieren. Angestrebt wird dabei eine möglichst geringe Veränderung der Gesamtverluste. Eine gewisse Erhöhung der Gesamtverlustwahrscheinlichkeit lässt sich aber auf Grund des höheren Ressourcenverbrauchs langer Verbindungen meist nicht vermeiden.

### Reservierungsverfahren

Eine mögliche Maßnahme zur Verbesserung der Fairness besteht darin, eine bestimmte Anzahl von Kanälen auf jedem Link für lange Verbindungen zu reservieren, so dass sie von Verbindungen zwischen Nachbarknoten grundsätzlich nicht benutzt werden können (*Reservierungsverfahren*). Der Parameter dieses Verfahrens ist die Zahl der auf jedem Link reservierten Kanäle. Bild 6.23 zeigt die Auswirkungen des Reservierungsverfahrens an der 3-Knoten-Kette mit vier Konvertern im Zwischenknoten sowie einer Faser mit 32 Kanälen auf jedem Abschnitt. Es wird die FF-Absuchstrategie verwendet. Das linke Diagramm zeigt, dass insbesondere bei geringer Last eine geringe Erhöhung der Gesamtverluste auftritt. Wie das rechte Diagramm zeigt, können dagegen die Unterschiede zwischen kurzen und langen Verbindungen gerade in diesem Lastbereich deutlich reduziert werden.



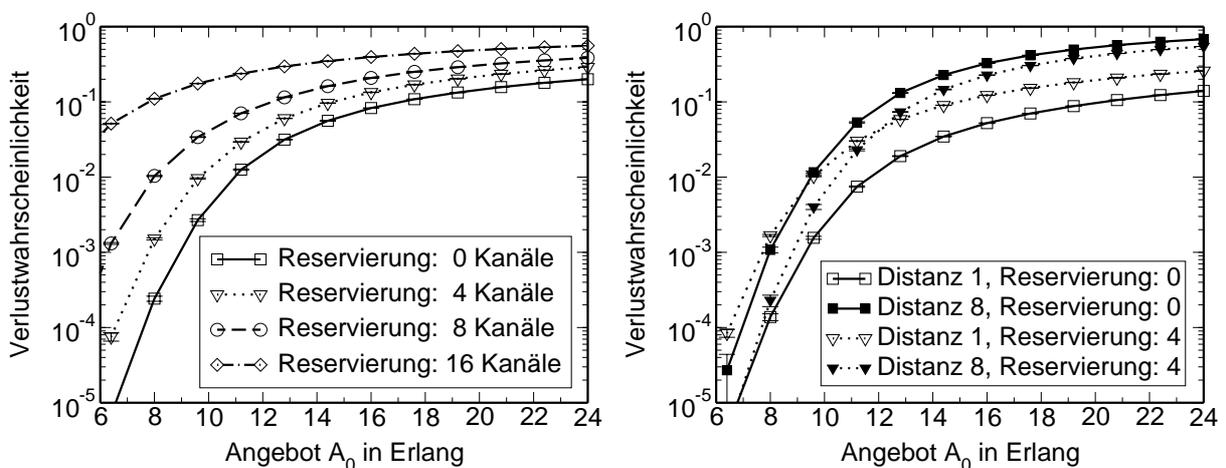
**Bild 6.23:** Gesamtverluste (links) und distanzabhängige Verluste (rechts) der 3-Knoten-Kette mit einer Faser pro Link (32 Wellenlängen) und vier Konvertern im Zwischenknoten bei FF-Wellenlängenabsuche



**Bild 6.24:** Gesamtverluste (links) und distanzabhängige Verluste (rechts) der 9-Knoten-Kette bei variabler Anzahl der reservierten Kanäle (WR-Fall, FF-Wellenlängenabsuche, eine Faser mit 32 Kanälen pro Link)

Der Wahl der Anzahl reservierter Kanäle kommt dabei eine zentrale Rolle zu. Schon in Bild 6.23 ist zu sehen, dass bei geringem Verkehrsangebot die Verluste der kurzen Verbindungen höher werden als die der langen Verbindungen und auch die Gesamtverluste zunehmen. Bild 6.24 zeigt für die 9-Knoten-Kette ohne Konverter (WR-Fall), dass eine größere Anzahl reservierter Kanäle zu einer starken Erhöhung der Gesamtverluste führt und die angestrebte Fairness in eine deutlich bessere Behandlung längerer Verbindungen im Bereich eines kleinen bis mittleren Angebots umschlägt.

Dieses Verhalten tritt bei anderen Szenarien noch stärker auf. Bild 6.25 zeigt dies am Beispiel der 9-Knoten-Kette mit voller Konversion (WI-Fall). Der hier nicht dargestellte Vergleich mit Ketten anderer Länge zeigt zudem, dass sich diese Effekte mit zunehmender Kettenlänge ebenfalls verstärken.



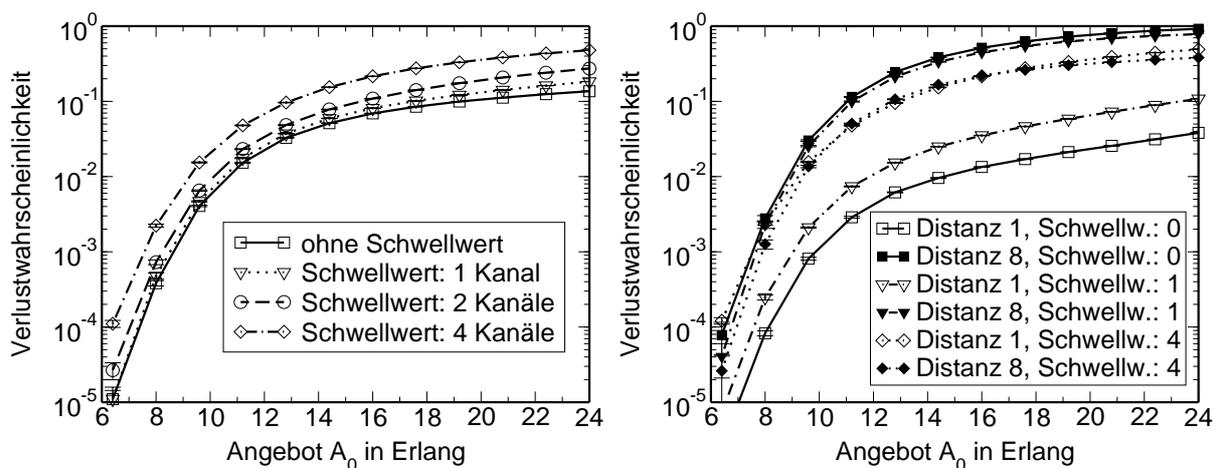
**Bild 6.25:** Gesamtverluste (links) und distanzabhängige Verluste (rechts) der 9-Knoten-Kette mit voller Konversion (WI-Fall) bei variabler Anzahl der reservierten Kanäle

## Schwellwertverfahren

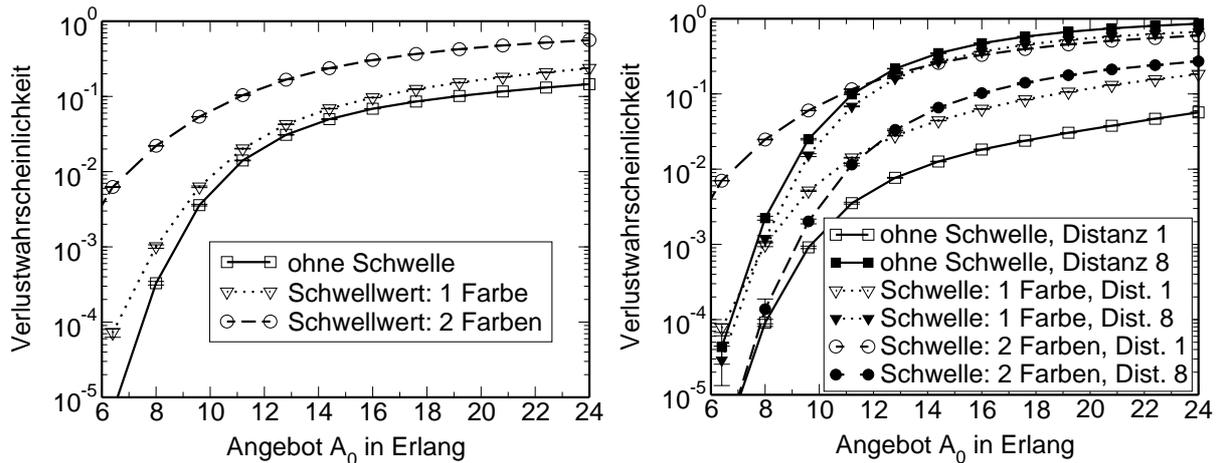
Neben der bisher betrachteten Reservierung einer bestimmten Anzahl von Kanälen wird als zweiter Mechanismus zur Verbesserung der Fairness das folgende Schwellwertverfahren betrachtet: Verbindungen zwischen Nachbarknoten dürfen nur realisiert werden, falls nach erfolgreichem Verbindungsaufbau die Anzahl freier Kanäle auf diesem Link nicht unter einer bestimmten Schwelle liegt.

Das rechte Diagramm in Bild 6.26 zeigt, dass bereits mit einer Schwelle von wenigen Kanälen gute Verbesserungen der Fairness erreicht werden können: Bei einem Schwellwert von 4 sind die Verluste über einen weiten Bereich des Angebots für beide Distanzen praktisch identisch. Allerdings ist auch hier wie beim Reservierungsverfahren zu beobachten, dass mit größeren Schwellwerten die Gesamtverluste stark ansteigen (linkes Diagramm) und zudem die Verluste der kürzeren Verbindungen höher als die der langen Verbindungen ausfallen können. Dieses Verhalten gilt auch für die hier nicht gezeigten Szenarien mit Konversion.

Sind im Netz mehrere Fasern pro Link vorhanden, so können die vorgestellten Verfahren sich auch auf Wellenlängen („Farben“) anstatt auf die Anzahl von Kanälen beziehen. In Bild 6.27 ist das Schwellwertverfahren mit auf Wellenlängen bezogener Schwelle gezeigt. Eine kurze Verbindung kann nur angenommen werden, falls nach deren Aufbau eine bestimmte Anzahl von Farben nicht vollständig belegt ist. Es ist zu erkennen, dass prinzipiell ein ähnlicher Effekt wie beim bisherigen Verfahren erreicht werden kann. Nachteilig ist allerdings die schlechtere Abstufungsmöglichkeit des Verfahrens. Wird in diesem Szenario die Schwelle von einer auf zwei nicht vollständig belegte Farben erhöht, so ergeben sich bereits sehr hohe Gesamtverluste.



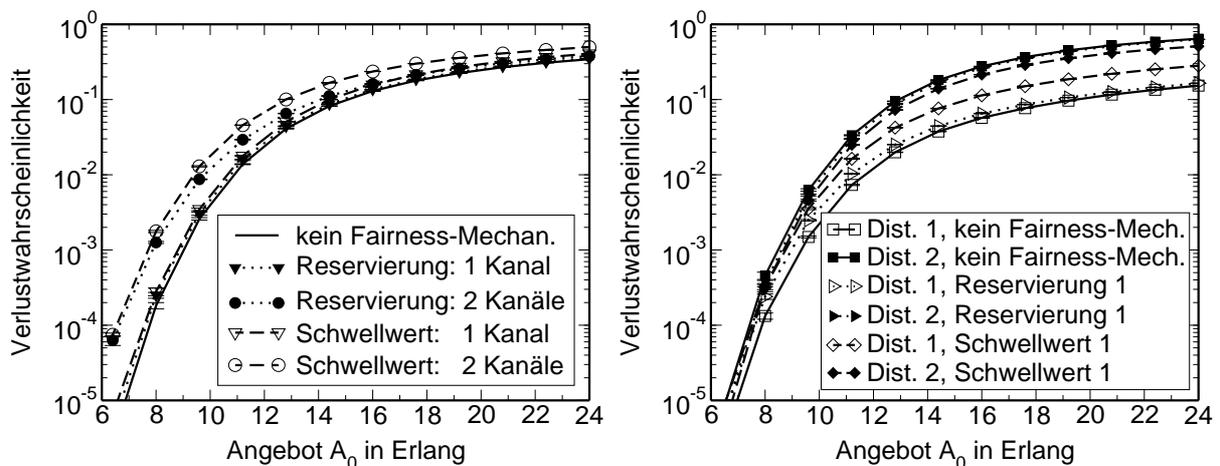
**Bild 6.26:** Gesamtverluste (links) und distanzabhängige Verluste (rechts) des Schwellwertverfahrens bei der 9-Knoten-Kette ohne Konverter und jeweils einer Faser mit 32 Wellenlängen pro Link (FF-Wellenlängenabsuche)



**Bild 6.27:** Gesamtverluste (links) und distanzabhängige Verluste (rechts) des Schwellwertverfahrens für die 9-Knoten-Kette bei Verwendung der „Farben“ als Schwellwert (vier Fasern mit jeweils acht Wellenlängen pro Link, WR-Fall, FF-Absuche)

### Vergleich von Reservierungs- und Schwellwertverfahren

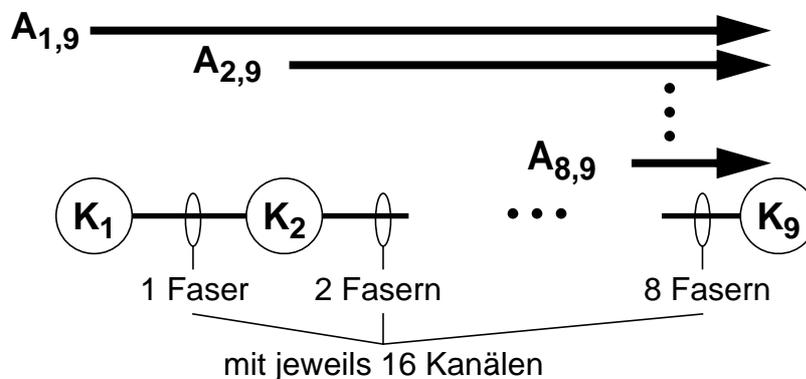
Bild 6.28 stellt an Hand der Ergebnisse für die 3-Knoten-Kette das Reservierungsverfahren und das Schwellwertverfahren gegenüber, wobei sich Reservierung und Schwellwert jeweils auf die Anzahl von Kanälen (nicht auf Farben) beziehen. Mit beiden Verfahren können vergleichbare Ergebnisse erzielt werden: Die Fairness hinsichtlich der Verluste zwischen kurzen und langen Verbindungen kann bei gleichzeitiger Erhöhung der Gesamtverlustwahrscheinlichkeit verbessert werden. Das Schwellwertverfahren führt bereits bei sehr geringen Schwellwerten zu großer Fairness-Verbesserung, dafür aber auch zu einer deutlicheren Erhöhung der Gesamtverluste. Dieser Effekt ist bei den hier nicht gezeigten längeren Ketten noch stärker ausgeprägt.



**Bild 6.28:** Vergleich von Reservierungs- und Schwellwert-Verfahren für die 3-Knoten-Kette (jeweils eine Faser mit 32 Wellenlängen pro Link, WR-Fall, FF-Absuchstrategie)

### 6.1.6 Konzentration des Verkehrs auf einen Knoten

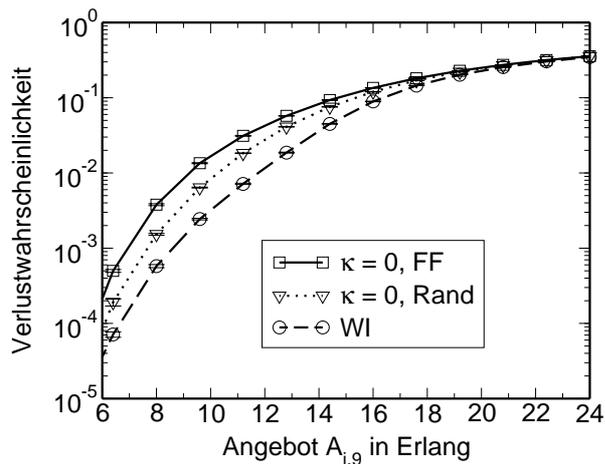
In allen bisher gezeigten Untersuchungen der unidirektionalen Ketten war Verkehr zwischen Nachbarknoten sowie zwischen den beiden Endknoten angenommen worden. In diesem Abschnitt wird das in Bild 6.29 gezeigte Szenario für die 9-Knoten-Kette betrachtet, bei dem von jedem Knoten zum Endknoten  $K_9$  Verkehr fließt. Alle Verkehrsströme  $A_{i,9}$  sind gleich groß. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, muss im Vergleich zu den vorigen Abschnitten die Dimensionierung der Kette angepasst werden, da mit steigender Abschnittsnummer ein zunehmender Verkehr transportiert werden muss. Gewählt wurde eine linear ansteigende Faserzahl, wobei jede Faser  $w = 16$  Wellenlängenkanäle transportiert.



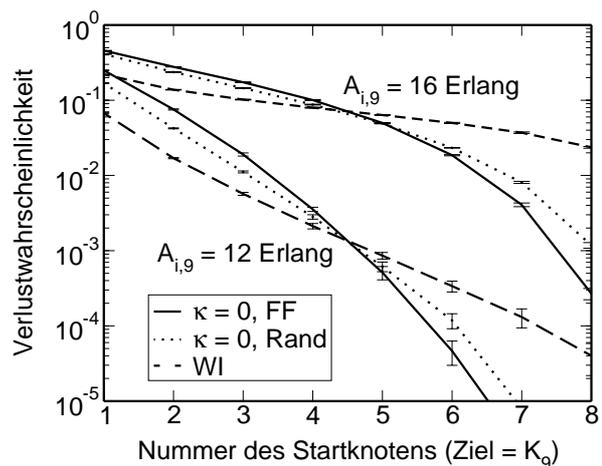
**Bild 6.29:** Lineare, unidirektionale Kette mit auf Knoten  $K_9$  konzentriertem Verkehr

Bild 6.30 zeigt die auftretenden Gesamtverluste für den WI-Fall sowie die beiden Absuchstrategien FF und zufällige Auswahl (Rand) für den WR-Fall. Es zeigt sich, dass in diesem Szenario Konverter über einen weiten Lastbereich große Vorteile bringen. Im Unterschied zu den bisher untersuchten Szenarien ist nun die Rand-Strategie über einen weiten Bereich der Strategie FF überlegen.

Dies kann an Hand von Bild 6.31 erklärt werden, in welchem die Verlustwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit des jeweiligen Abstands vom Endknoten für zwei Angebotswerte aufgetragen sind. Die diskreten Messergebnisse sind zur Verdeutlichung durch Linien miteinander verbunden. Grundsätzlich nehmen die Verluste wie erwartet mit geringer werdender Distanz vom Zielknoten stark ab. Konverter verbessern die Fairness auch in diesem Fall: Für beide Angebotswerte hat die WI-Kurve das geringste Gefälle, die Verluste werden also am besten zwischen Verbindungen unterschiedlicher Länge ausgeglichen. Die FF-Strategie hingegen neigt dazu, kurze Verbindungen stark zu bevorzugen: Ab Knoten  $K_5$ , also bis zur Distanz 4, liefert



**Bild 6.30:** Gesamtverluste bei einer 9-Knoten-Kette mit Konzentration des Verkehrs auf  $K_9$



**Bild 6.31:** Verluste in Abhängigkeit vom Abstand zum Zielknoten für die 9-Knoten-Kette mit Konzentration des Verkehrs auf  $K_9$

FF das Minimum. Längere Verbindungen werden dagegen stark benachteiligt. Dies führt zu dem im Bild 6.30 beobachteten besseren Abschneiden der Rand-Strategie bezüglich der Gesamtverluste.

### 6.1.7 Diskussion der Ergebnisse für lineare Ketten

Die in diesem Unterkapitel 6.1 durchgeführten Untersuchungen linearer Ketten haben gezeigt, wie sich die folgenden Parameter auf die Verlustwahrscheinlichkeit auswirken:

- Absuchreihenfolge für Wellenlängen (vor allem für Netze ohne Konverter, aber auch bei partieller Konversion)
- Anzahl der Konverter
- Belegungsstrategie für Konverter
- Größenverhältnis zwischen „Anzahl Fasern“, „Anzahl Wellenlängenkanäle pro Faser“ und „Anzahl Konverter“
- Distanz (d. h. Abstand zwischen Start- und Zielknoten einer Verbindung)
- Mechanismen zur Verbesserung der Fairness zwischen Knotenpaaren unterschiedlicher Distanz
- Profil der Verkehrsanforderungen hinsichtlich der Verteilung zwischen den Netzknoten

Die Auswertung der Studien erlaubt eine Reihe von Schlussfolgerungen:

- Für alle weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit wird die FF-Wellenlängenabsuche verwendet, da sie im Vergleich zu anderen Absuchstrategien sehr gute Ergebnisse bei geringem Realisierungsaufwand liefert. Hinsichtlich des Speicherbedarfs und des Rechenzeitaufwandes gelten Realisierungsvorteile sowohl für reale Netze als auch für simulative Untersuchungen.
- In vielen Fällen ist es nicht ausreichend, nur die Gesamtverluste zu betrachten. Zusätzlich liefern auch die distanzabhängigen Verluste wichtige Erkenntnisse über das betrachtete System.
- Die Bewertung des Nutzens von Wellenlängenkonvertern in WDM-Netzen bedarf einer sorgfältigen Betrachtung der jeweiligen Randbedingungen, da durch Konverter nicht grundsätzlich eine Reduktion der Verluste eintritt, sondern in einigen Fällen (z. B. bei hoher Last) größere Verluste auftreten können.
- Die Verwendung mehrerer Fasern auf den einzelnen Links wirkt sich bei der angenommenen Vermittlungsfunktionalität der Knoten ähnlich aus wie der Einsatz von Konvertern. Daher sind in solchen sogenannten „Multi-Faser-Netzen“ die durch Konversion verursachten Effekte reduziert. Dies ist bei realen Netzen zu beachten, da sie häufig als Multi-Faser-Netze realisiert sind.
- Die insgesamt vorhandene Anzahl der Kanäle auf einem Link (die sogenannte Bündelgröße) hat großen Einfluss auf die Stärke der beobachteten Effekte. Das grundsätzliche Verhalten bleibt aber bei Veränderungen der Bündelgröße erhalten. Dies ist wichtig für die mögliche Verallgemeinerung von Aussagen basierend auf Fallstudien mit einer bestimmten Kanalzahl.
- Die Studien für die lineare Kette mit Konzentration des Verkehrs auf einen Knoten zeigen die Schwierigkeit, allgemeingültige Aussagen aus einzelnen Studien abzuleiten. Im Unterschied zu allen vorherigen Untersuchungen liefert nun beispielsweise die Rand-Absuchstrategie kleinere Verlustwahrscheinlichkeiten als die FF-Strategie. Es muss also berücksichtigt werden, dass sich in speziellen Szenarien unerwartete Effekte ergeben können.

Die folgenden Unterkapitel erweitern die bisherigen Untersuchungen, indem unterschiedliche Verkehrslenkungsverfahren betrachtet werden. Für die entsprechenden Studien sind andere Netztopologien erforderlich, bei welchen für Verbindungsanforderungen jeweils mehrere Alternativwege verfügbar sind.

## 6.2 Untersuchung von Verkehrslenkungsverfahren

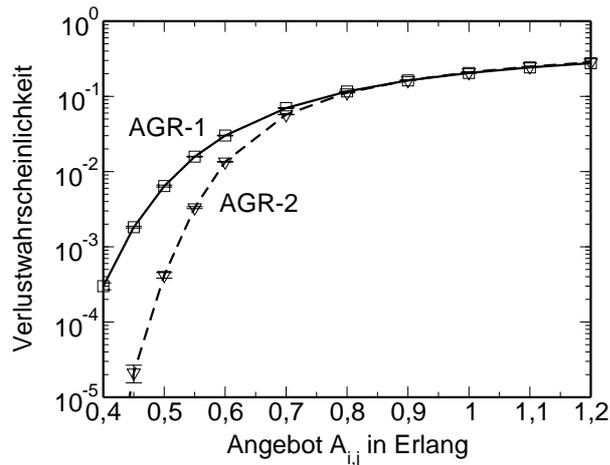
Alle Ergebnisse in diesem Unterkapitel beruhen auf simulativen Untersuchungen. Das Verkehrsangebot wird entweder in „Erlang pro Knotenpaar“ ( $A_{i,j}$ ) oder prozentual, bezogen auf den sogenannten „Planungswert“, angegeben. Der Planungswert entspricht dabei der für die statische Dimensionierung jeweils angenommenen Anzahl geforderter Verbindungen für ein Knotenpaar (siehe Abschnitt 5.3). Die Aussage „ $A_{i,j} = 50\%$  des Planungswertes“ bedeutet beispielsweise, dass der *Mittelwert* des Verkehrsangebots für jedes Knotenpaar jeweils 50% des Wertes beträgt, der für dieses Knotenpaar bei der statischen Dimensionierung angenommen wurde. In diesem Unterkapitel werden für alle Knotenpaare jeweils ein Poisson-Ankunftsprozess sowie negativ-exponentiell verteilte Verbindungsdauern angenommen. Wie im vorigen Unterkapitel begründet, wird die FF-Absuchstrategie (*First-Fit*, sequentielle Absuche von festem Startpunkt aus) für die Absuche der Wellenlängenkanäle verwendet.

### 6.2.1 Einfluss der Netztopologie

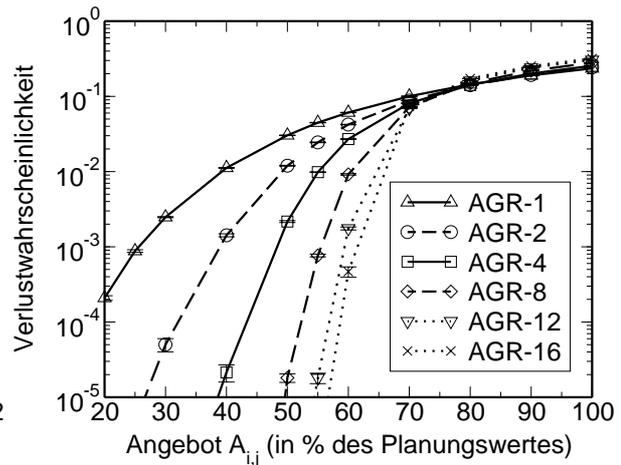
Es ist zu erwarten, dass die Netztopologie einen großen Einfluss auf die Güte von Verkehrslenkungsverfahren hat. Bereits aus den Untersuchungen zu linearen Ketten lässt sich ableiten, dass mit zunehmender Größe des Netzes die Fairness auf Grund zunehmender Unterschiede zwischen den Distanzen der verschiedenen Knotenpaare abnimmt, d. h. die Differenz der Verlustwahrscheinlichkeiten zunimmt. Zudem hängt die Anzahl möglicher Alternativwege stark von der Netztopologie ab. Die folgenden Bilder geben einen ersten Eindruck der Auswirkungen dieses Parameters auf die Verlustwahrscheinlichkeiten, eine detailliertere Auswertung hierzu enthält das folgende Unterkapitel.

Bild 6.32 zeigt die Gesamtverluste bei einem bidirektionalen Ring mit 16 Knoten, der für jede Verbindungsanforderung grundsätzlich genau zwei Wege ermöglicht. Während das Verfahren AGR-1 davon nur den jeweils kürzesten Weg verwendet, nutzt AGR-2 beide Alternativwege aus. Deutlich sichtbar ist die durch AGR-2 erzielte Reduktion der Verlustwahrscheinlichkeiten über einen weiten Bereich des Angebotes.

Die Ergebnisse für das vollvermaschte Netz mit 16 Knoten zeigt Bild 6.33. Bei diesem Netz ergeben sich für jedes Knotenpaar entsprechend der Berechnungen in Anhang A.1.1  $r_{ges} = 2,370 \cdot 10^{11}$  mögliche Alternativwege. Die Kurven zeigen, dass mit zunehmender Anzahl erlaubter Alternativen die Verlustwahrscheinlichkeit stark absinkt. Für kleinere Verkehrsangebote kann diese Reduktion mehrere Größenordnungen umfassen: Für  $A_{i,j} = 50\%$  des Planungswertes sinkt die Verlustwahrscheinlichkeit von  $B \approx 3 \cdot 10^{-2}$  bei einer Wegmöglichkeit (AGR-1) auf  $B \approx 2 \cdot 10^{-5}$  bei acht Alternativen (AGR-8). Die Kurven zeigen auch, dass die erzielbaren Verbesserungen mit zunehmender Anzahl von Alternativen kleiner werden.



**Bild 6.32:** Gesamtverluste des bidirektionalen Rings ohne Konverter, jeweils eine Faser mit 32 Kanälen pro Link und Richtung



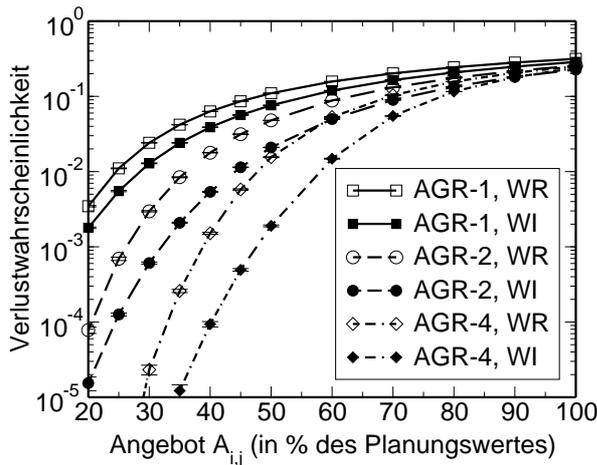
**Bild 6.33:** Gesamtverluste bei Vollvermaschung ohne Konverter (16 Knoten, jeweils 1 Faser mit 8 Kanälen pro Link und Richtung)

Die weiteren Untersuchungen werden für mehrere Topologien durchgeführt, um den Einfluss der Netztopologie auf die betrachteten Verkehrslenkungsstrategien bewerten zu können bzw. um zeigen zu können, dass gewisse Effekte weitgehend unabhängig von der Topologie sind. Dabei werden die Netztopologien bidirektionaler Ring, Vollvermaschung, Gitternetz, Mesh-Torus (jeweils mit 16 Knoten) sowie das neun Knoten umfassende sogenannte „Deutschlandnetz“ als Vertreter der unregelmäßigen Netze untersucht. Wenn nicht anders erwähnt, wird jeweils die in Kapitel 5 beschriebene Netzdimensionierung („Standard-Dimensionierung“) verwendet.

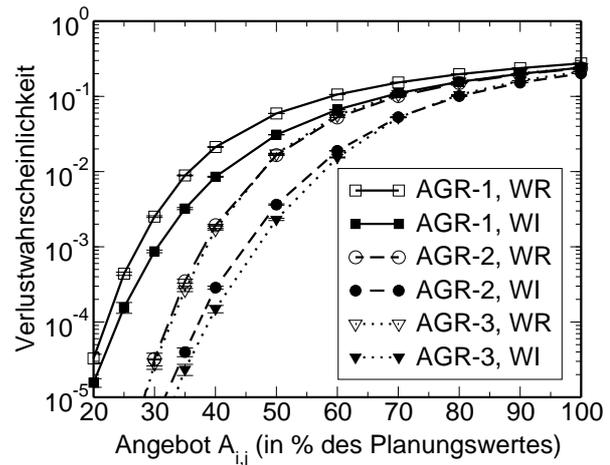
## 6.2.2 Einfluss des Verkehrslenkungsschemas

Der Schwerpunkt dieses Abschnitts liegt auf der durch eine Vergrößerung der Wegemenge, d. h. durch die Bereitstellung zusätzlicher Alternativwege erzielbaren Verbesserung. Zusätzlich soll untersucht werden, wie sich die Festlegung der Menge der Alternativwege sowie die Strategie zur Auswahl eines Weges aus dieser Menge auf die Verlustwahrscheinlichkeiten auswirkt. Hierzu werden die in Abschnitt 4.4 beschriebenen alternativen Verkehrslenkungsverfahren AGR-x und AGR-LD betrachtet. Bezüglich der Wellenlängenkonversion werden nur die beiden Fälle WI (volle Konversion) und WR (keine Konversion) betrachtet. Untersuchungen zur partiellen Konversion finden sich in Abschnitt 6.2.6.

Die bereits im vorigen Abschnitt gezeigte Reduktion der Verluste durch zusätzliche Alternativwege bestätigt sich auch bei anderen Topologien, wie die Bilder 6.34 für das Mesh-Torus-Netz und 6.35 für das Gitternetz zeigen. Dabei wird die relative Verbesserung mit steigender Anzahl



**Bild 6.34:** Gesamtverluste beim Mesh-Torus, je eine Faser mit 8 Wellenlängen pro Link



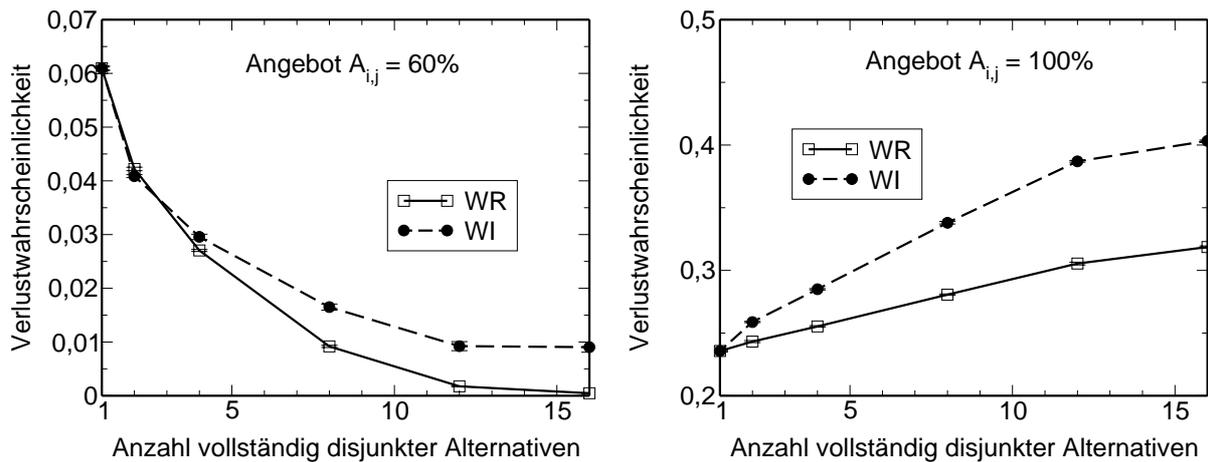
**Bild 6.35:** Gesamtverluste beim Gitternetz, je eine Faser mit 16 Wellenlängen pro Link

von Alternativen immer geringer, und ab einer bestimmten von der Topologie abhängigen Anzahl lassen sich keine Verbesserungen durch zusätzliche Alternativen mehr erreichen.<sup>1</sup> Außerdem zeigt sich, dass v. a. für kleine Verkehrsangebote die Verluste durch Konversion gesenkt werden können. Außerdem lässt sich aus beiden Bildern ablesen, dass die Auswirkungen der Konversion geringer sind als die Auswirkungen der Vergrößerung der Wegemenge.

Bei den bisher gezeigten Studien war bereits erkennbar, dass sich die Verluste für unterschiedlich große Wegemengen bei steigendem Verkehrsangebot annähern. Bild 6.36 verdeutlicht an Hand der Vollvermaschung das unterschiedliche Verhalten bei geringem Verkehrsangebot (im Folgenden auch mit „Niederlast“ bezeichnet) und bei großem Verkehrsangebot (im Folgenden auch mit „Hochlast“ bezeichnet). Gezeigt sind jeweils die Verluste über der Anzahl zur Verfügung stehender vollständig disjunkter Alternativen bei der Strategie AGR-x. Die diskreten Ergebniswerte sind zur Verdeutlichung mit Linien verbunden.

Im linken Diagramm ist – wie erwartet – für ein geringes Angebot eine Reduktion der Verluste bei zunehmender Größe der Wegemenge zu sehen. Für den im rechten Diagramm gezeigten Hochlast-Fall nehmen die Verluste dagegen mit wachsender Wegemenge zu. Ähnliche Effekte werden noch bei anderen Untersuchungen auftreten und sind auf den Ressourcen-Bedarf der einzelnen Verbindungen zurückzuführen. Beispielsweise nimmt durch lange Alternativwege für einzelne Verbindungen die Wahrscheinlichkeit zu, dass mehrere andere Anforderungen abgelehnt werden müssen. Bereits aus der Untersuchung von Verkehrslenkungsverfahren in Telefonnetzen ist bekannt, dass eine Beschränkung der Ressourcen für eine Verbindung not-

1. Bei den betrachteten Verfahren werden nur vollständig disjunkte Alternativwege betrachtet. Damit entspricht die Obergrenze für die Anzahl von Alternativwegen der Anzahl von Nachbarknoten des Knotens mit der höchsten Anzahl von Nachbarknoten.

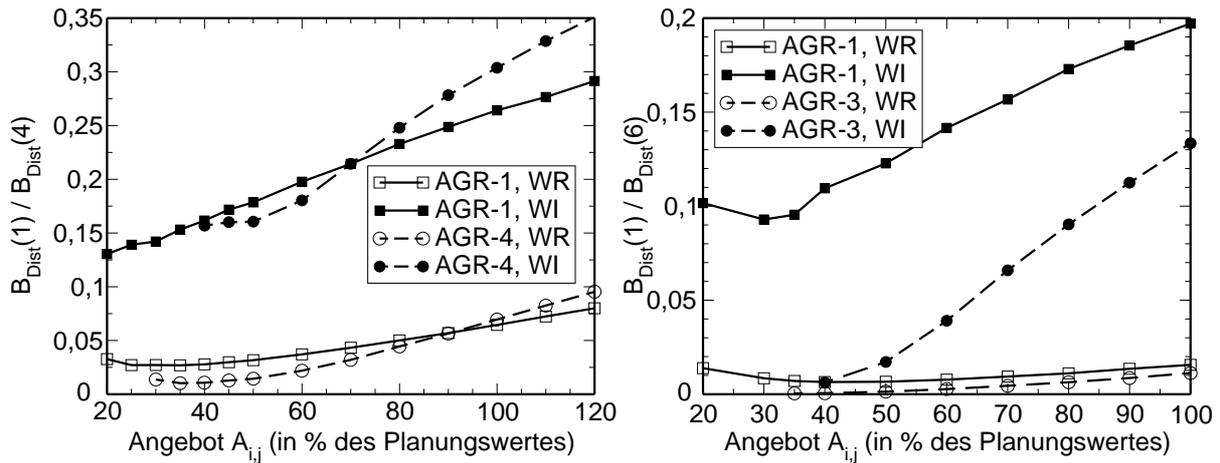


**Bild 6.36:** Gesamtverluste bei Vollvermaschung in Abhängigkeit der Anzahl disjunkter Alternativwege beim Verfahren AGR- $x$  für  $A_{i,j} = 60\%$  (links) und  $A_{i,j} = 100\%$  (rechts), jeweils eine Faser mit acht Wellenlängen pro Link

wendig ist, um Instabilität und eine drastische Verschlechterung des Netzverhaltens bei hoher Last zu vermeiden [16, 95]. Im Abschnitt 6.2.5 werden deshalb entsprechende Begrenzungsverfahren betrachtet.

Interessant an den Ergebnissen in Bild 6.36 ist auch das Verhalten der Verluste in Abhängigkeit von der vorhandenen Konversion: Bei der Vollvermaschung ergeben sich für die gezeigten Angebotswerte ohne Konverter (WR-Fall) meist geringere Verluste als mit voller Konversion (WI-Fall). Bei geringerem Verkehrsangebot ändert sich dies zu Gunsten des WI-Falls. Der Grund für dieses Verhalten liegt ebenfalls im Ressourcen-Bedarf der Verbindungen. Dieser nimmt bei vorhandener Konversion zu, da längere Anforderungen mit höherer Wahrscheinlichkeit realisiert werden können (siehe auch Untersuchungen zum Einfluss der Wellenlängenkonversion in Abschnitt 6.2.6).

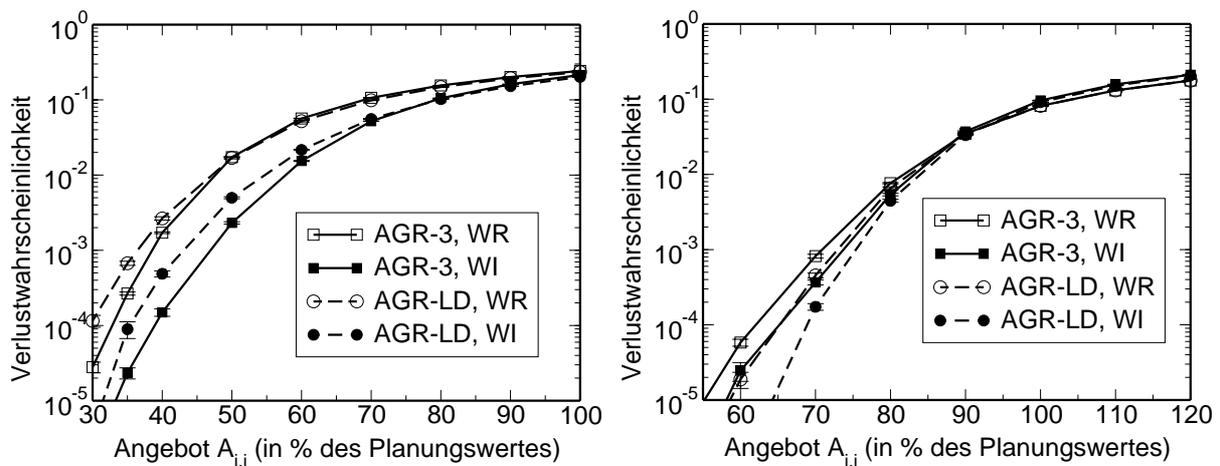
Die distanzabhängigen Verluste verhalten sich sowohl für Mesh-Torus (Bild 6.37, linkes Diagramm) als auch für das Gitternetz (Bild 6.37, rechtes Diagramm) ähnlich. Gezeigt ist jeweils das Verhältnis der Verlustwahrscheinlichkeiten für Verbindungen zwischen Nachbarknoten und Verbindungen zwischen den Knotenpaaren mit der größten Distanz. Für Nachbarknoten ergeben sich deutlich geringere Verluste. Die Fairness kann durch Einsatz von Konvertern verbessert werden (ausgefüllte Symbole). Eine größere Wegemenge für das Verkehrslenkungs-schema (Kurven mit Kreis-Symbolen) verbessert die Fairness hingegen nicht. Beim Gitternetz verschlechtert sie sich sogar. Dies zeigt, dass von den zusätzlichen Alternativen die Verbindungen zwischen Knoten geringer Distanz mindestens ebenso stark profitieren, wie die Verbindungen über größere Distanzen.



**Bild 6.37:** Verhältnis distanzabhängiger Verlustwahrscheinlichkeiten bei AGR-x für Mesh-Torus (links) und Gitter (rechts)

Zum Vergleich mit AGR-x wird nun das Verfahren AGR-LD betrachtet, bei dem sowohl die Bestimmung der Wegemenge als auch die Auswahl der Alternativen von AGR-x abweichen (siehe Abschnitt 4.4). Bild 6.38 zeigt die Gesamtverluste für das Gitternetz (links) und das Deutschlandnetz (rechts). Es zeigt sich, dass sowohl AGR-x mit einer ausreichenden Anzahl von Alternativen als auch AGR-LD für den WR-Fall und den WI-Fall jeweils vergleichbare Ergebnisse liefern, wobei AGR-3 beim Gitternetz und AGR-LD beim Deutschlandnetz etwas besser abschneidet.

Bei der Strategie AGR-LD nimmt für zunehmende Distanz eines Knotenpaares auch die Anzahl der möglichen Alternativen zu. Dadurch kann sich die Fairness zwischen Knotenpaaren unterschiedlicher Distanz verbessern. Bild 6.39 bestätigt dies für das Deutschlandnetz.

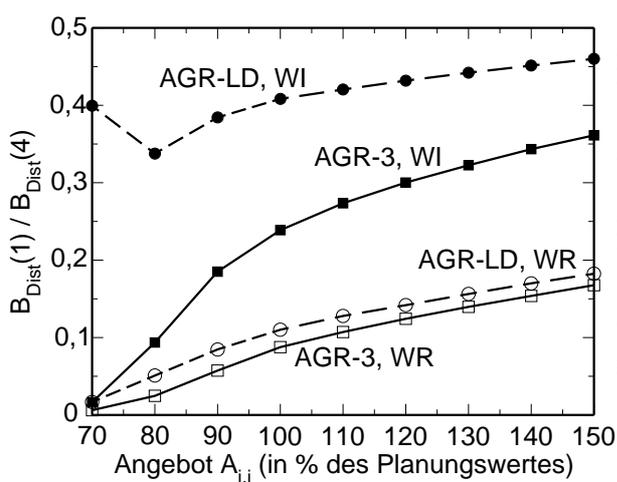


**Bild 6.38:** Vergleich der Gesamtverluste von AGR-x und AGR-LD für Gitternetz (links) und Deutschlandnetz (rechts)

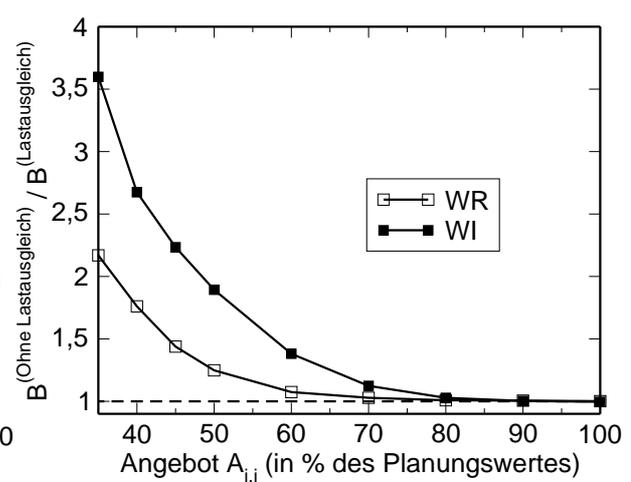
Gezeigt ist das Verhältnis der Mittelwerte der distanzabhängigen Verluste. Während die Verbesserung für den WR-Fall nicht sehr groß ist, ergibt sich für den Fall voller Konversion eine deutliche Verbesserung der Fairness gegenüber AGR-3 – und dies bei der im vorigen Bild gezeigten gleichzeitigen Reduktion der Gesamtverluste.

Die Untersuchungen zum Verkehrslenkungsschema werden mit einer Studie zur sogenannten „symmetrischen Lastaufteilung“ abgeschlossen. Diese versucht, die Last zwischen Alternativen identischer Länge, d. h. gleicher Anzahl von Abschnitten, gleichmäßig aufzuteilen („Lastausgleich“). Bild 6.40 zeigt die Auswirkungen an Hand des Verfahrens AGR-4 beim Mesh-Torus-Netz. Die Kurven zeigen, dass mit Lastausgleich die Verluste bei kleinen bis mittleren Verkehrswerten deutlich reduziert werden können. Bei voller Konversion sind die erzielbaren Verbesserungen am größten (z. B. bei  $A_{i,j} = 40\%$  des Planungswertes um mehr als den Faktor 2,5). Mit steigender Last nehmen alle Unterschiede ab und unabhängig vom Konversionszenario kann der Lastausgleich keine Verbesserung mehr bewirken.

Bei unregelmäßigen Netzen wie dem Deutschlandnetz wirkt sich der Lastausgleich kaum aus, da für jedes Knotenpaar nur wenige Alternativen gleicher Länge existieren. Dagegen reduziert der Lastausgleich bei regelmäßigen Topologien die Verluste auch für die im folgenden Kapitel untersuchten Verfahren mit dynamischer Neuberechnung, wenn auch in etwas geringerem Maße als bei den alternativen Verfahren. Deshalb wird bei allen weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit für regelmäßige Topologien (Ring, Vollvermaschung, Gitter und Mesh-Torus) der Lastausgleich verwendet.



**Bild 6.39:** Fairness der Verfahren AGR-3 und AGR-LD beim Deutschlandnetz



**Bild 6.40:** Einfluss der symmetrischen Lastaufteilung (Lastausgleich) beim Mesh-Torus-Netz mit der Strategie AGR-4

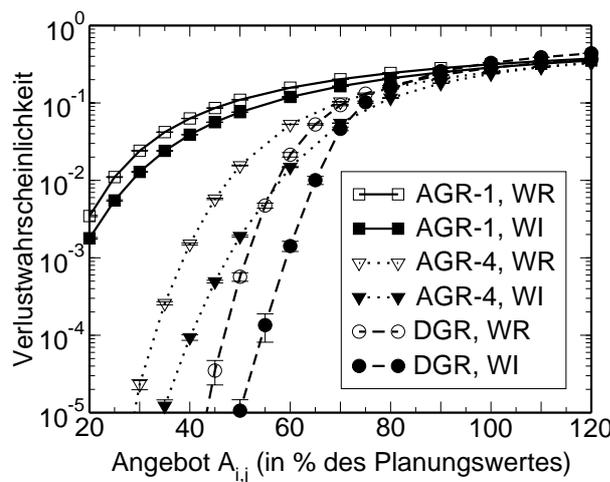
### 6.2.3 Einfluss der dynamischen, adaptiven Pfadberechnung

Unter dynamischer Pfadberechnung wird in dieser Arbeit eine Pfadberechnung zum Zeitpunkt des Auftretens einer Verbindungsanforderung verstanden (im Unterschied zu vorberechneten Wegen). Wird hierbei der momentane Netzzustand berücksichtigt, handelt es sich um ein adaptives Verfahren. In Abschnitt 4.4 wurden zwei entsprechende Verfahren vorgestellt: Bei DGR findet ausschließlich eine dynamische Pfadberechnung statt, bei DGR- $x$  findet diese nur statt, falls auf den  $x$  vorberechneten Wegen kein Pfad gefunden werden konnte. Zuerst wird die DGR-Strategie mit dem alternativen Verfahren AGR- $x$  verglichen. Anschließend wird die Strategie DGR- $x$  untersucht, welche hinsichtlich Rechenaufwand und Leistungsfähigkeit zwischen AGR- $x$  und DGR einzuordnen ist.

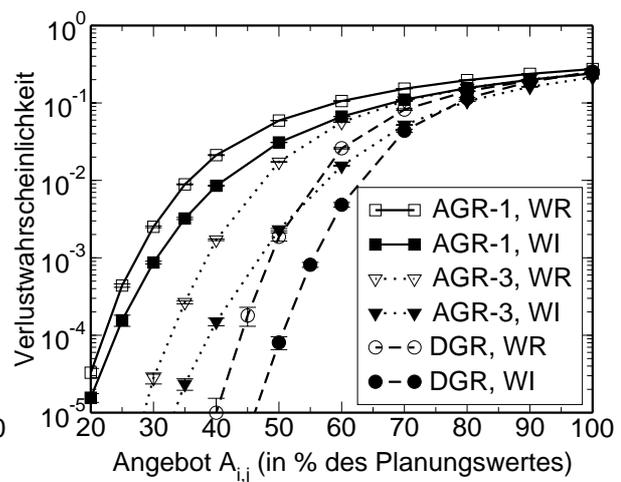
Die Verbesserungen durch dynamische Pfadsuche werden am Mesh-Torus-Netz (Bild 6.41) und am Gitternetz (Bild 6.42) gezeigt. In beiden Fällen gelten ähnliche Aussagen. Für geringe Verkehrsangebote gilt:

- Die deutliche Verbesserung der Gesamtverluste mit zunehmender Anzahl von Alternativen bei AGR- $x$  kann durch die dynamische Pfadberechnung weiter gesteigert werden.
- Auch bei der DGR-Strategie sind die Verluste für den WI-Fall jeweils geringer als bei den Netzen ohne Konverter.

Bei sehr großem Verkehrsangebot gelten diese Aussagen nicht mehr. Dann werden die Verluste im WR-Fall geringer als im WI-Fall, und die DGR-Strategie liefert teilweise höhere Verluste als die Strategie AGR- $x$ . Der Grund hierfür wird bei Betrachtung der distanzabhängigen Verluste deutlich.



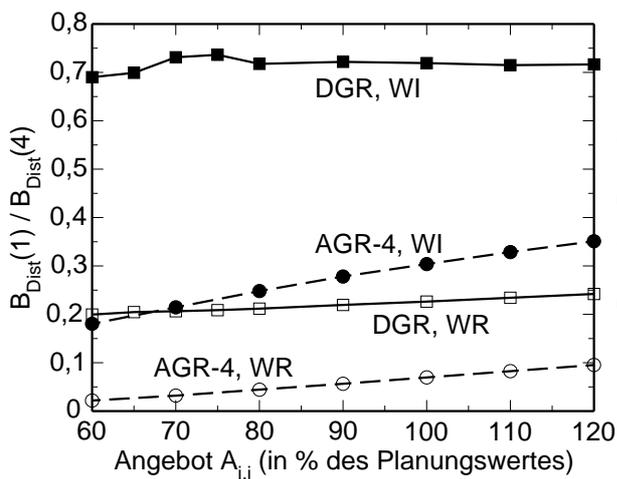
**Bild 6.41:** Gesamtverluste beim Mesh-Torus-Netz für die Strategien AGR- $x$  und DGR



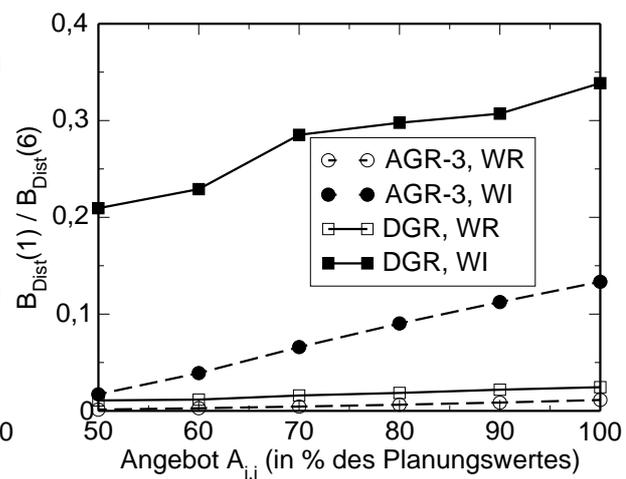
**Bild 6.42:** Gesamtverluste am Gitternetz für die Strategien AGR- $x$  und DGR

Die Bilder 6.43 und 6.44 zeigen diese für dieselben Beispielnetze (Mesh-Torus bzw. Gitter). Dargestellt ist das Verhältnis der Mittelwerte der Verluste für Knotenpaare minimaler (Distanz 1) und maximaler Distanz (4 beim Mesh-Torus und 6 beim Gitternetz). Mit Fairness wird hier wieder eine möglichst gleichwertige Behandlung von Verbindungsanforderungen zwischen Knotenpaaren unterschiedlicher Distanz bezeichnet.

Die Studien zeigen, dass sowohl das DGR-Verfahren als auch das Verfahren AGR-x für volle Konversion im Netz (WI-Fall) deutlich größere Fairness besitzen als im WR-Fall (keine Konverter), wobei die Unterschiede bei DGR größer sind. Außerdem ist hinsichtlich der Fairness für beide betrachteten Konversionsszenarien die DGR-Strategie der AGR-Strategie jeweils deutlich überlegen. Diese Aussagen gelten für den gesamten betrachteten Lastbereich. Für sehr kleine, hier nicht gezeigte Verkehrsangebote sind entsprechende Aussagen zu ungenau, da auf Grund sehr kleiner Gesamtverluste die Vertrauensintervalle im Vergleich zu den Mittelwerten sehr groß werden.



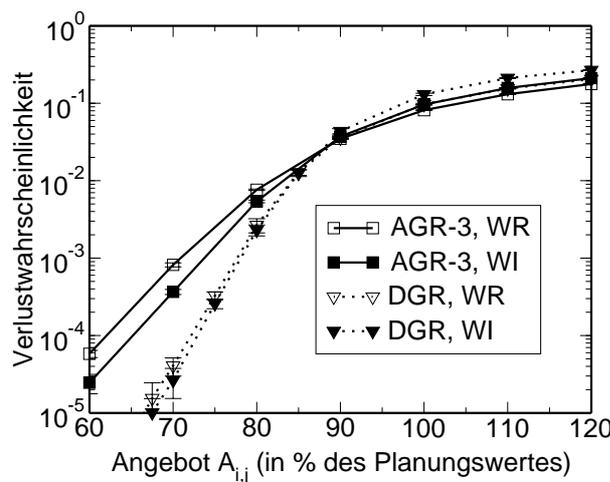
**Bild 6.43:** Verhältnis der distanzabhängigen Verluste beim Mesh-Torus-Netz



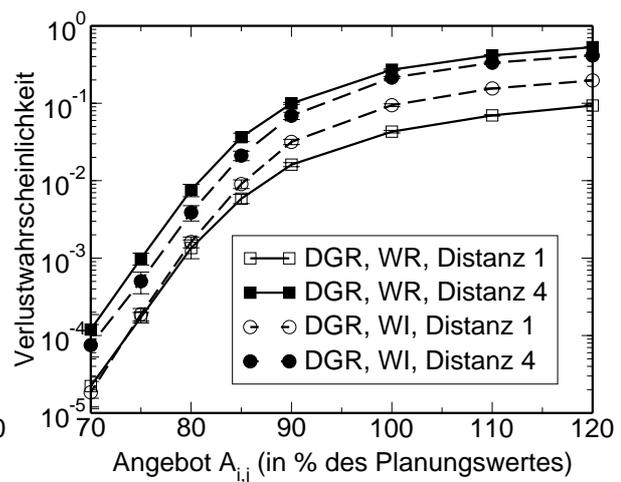
**Bild 6.44:** Verhältnis der distanzabhängigen Verluste beim Gitternetz

Nachdem im vorliegenden Abschnitt bisher nur regelmäßige Netze betrachtet wurden, zeigen die Bilder 6.45 und 6.46 zum Vergleich noch die Ergebnisse für das Deutschlandnetz. Bild 6.45 bestätigt die bisherigen Aussagen für die Gesamtverluste: Die DGR-Strategie liefert für kleine Verkehrswerte geringere Verluste als die AGR-Strategie, während sich für den Hochlastbereich größere Verluste ergeben. Außerdem ist die geringe Auswirkung des Konversionsszenarios auffällig: Insbesondere bei der DGR-Strategie ergeben sich nur noch sehr geringe Unterschiede zwischen dem WI- und dem WR-Fall. Dies liegt hauptsächlich an der Verwendung mehrerer Fasern auf allen Links des Deutschlandnetzes. Dadurch wird – wie bereits für lineare Ketten gezeigt – der Einfluss der Konversion auf die Gesamtverluste stark reduziert.

Bild 6.46 bestätigt den zweiten, in der Literatur bisher nur wenig beachteten Effekt der Konversion. Gezeigt sind die Verlustwahrscheinlichkeiten für unterschiedliche Knotendistanzen (Nachbarknoten mit Distanz 1 sowie Knotenpaare mit Distanz 4) bei der DGR-Strategie sowohl für den WR- als auch den WI-Fall. Unabhängig vom Konversionsszenario treten zwischen Nachbarknoten geringere Verluste auf, die Kurven für den WI-Fall liegen aber über den gesamten Lastbereich enger zusammen. Trotz geringer Auswirkungen auf die Gesamtverluste können Konverter also die Fairness zwischen Knotenpaaren unterschiedlicher Distanz deutlich verbessern.



**Bild 6.45:** Gesamtverluste beim Deutschlandnetz für die Verfahren AGR-3 und DGR

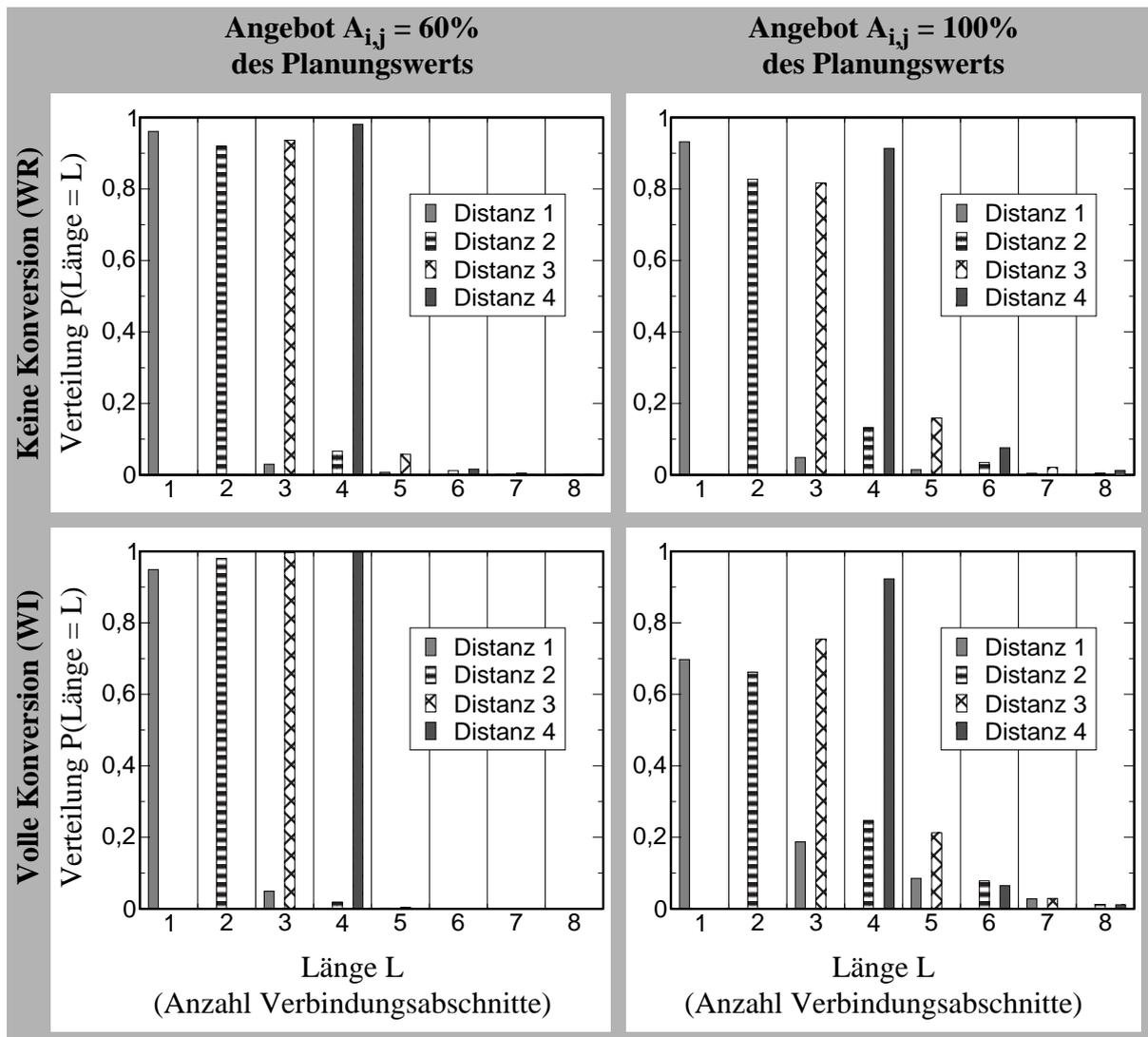


**Bild 6.46:** Distanzabhängige Verluste beim Deutschlandnetz für die DGR-Strategie

Da bei der DGR-Strategie Pfade im gesamten Netz ohne Einschränkungen durch eine vorgegebene Wegemenge gewählt werden können, ist es von Interesse, die tatsächlich im Netz auftretenden Pfadlängen zu untersuchen. Diese Information wird beispielsweise für die Parametrisierung der im später folgenden Abschnitt 6.2.5 betrachteten Begrenzungsstrategien verwendet.

Bild 6.47 zeigt für das Mesh-Torus-Netz über der durch die Anzahl der Verbindungsabschnitte ausgedrückten Länge die jeweilige Verteilung, d. h. die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten genau dieser Pfadlänge. Parameter ist die Distanz der Endknoten, die Werte zwischen 1 und 4 annehmen kann. Die oberen beiden Diagramme geben die Ergebnisse für den WR-Fall, die unteren Diagramme die für den WI-Fall wieder. Als Lastwerte werden jeweils ein Niederlastwert (linke Diagramme) und ein Hochlastwert (rechte Diagramme) dargestellt. Die wichtigsten aus dem Bild ableitbaren Aussagen betreffen die Abhängigkeit der Pfadlängenverteilung von der Last und vom Konversionsszenario:

- Bei höherer Last steigt die Wahrscheinlichkeit für die Wahl längerer Alternativwege. Der Anteil längerer Alternativen ist grundsätzlich relativ gering. Dabei ist zu beachten, dass



**Bild 6.47:** Längenverteilung der benutzten Alternativwege beim Mesh-Torus-Netz für die DGR-Strategie

beim betrachteten Mesh-Torus-Netz mit 16 Knoten meist mehrere Wege gleicher Länge zwischen zwei Knoten existieren: Für Knoten der Distanz zwei gibt es beispielsweise zwei Alternativen der Länge zwei, keine Alternativen mit der Länge drei und weitere 12 schleifenfreie Alternativen mit Länge vier.

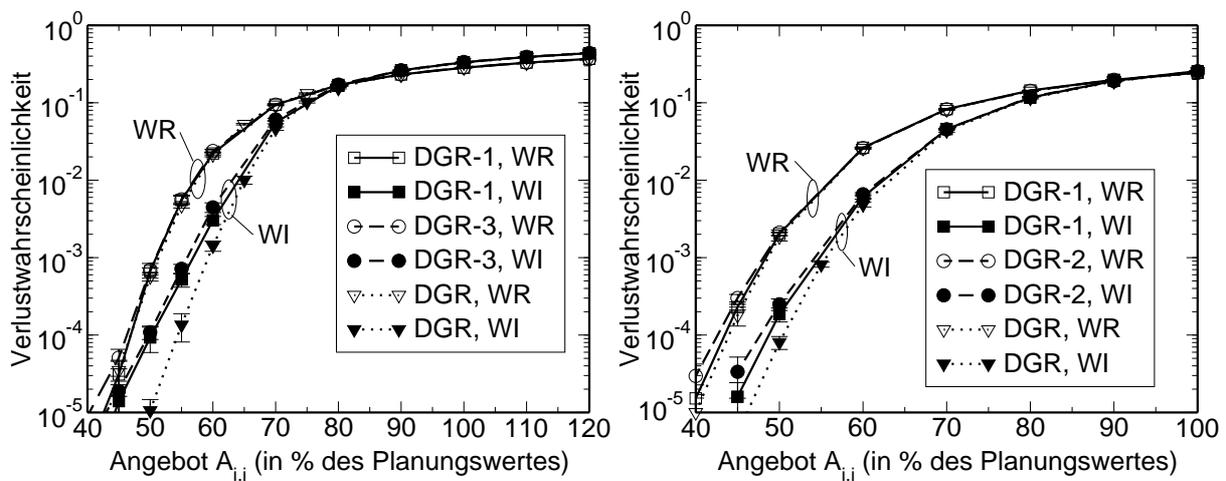
- Die Konversion wirkt sich ebenfalls auf die Verteilungen aus. Bei geringer Last ist im WI-Fall eine deutlich kleinere Anzahl längerer Alternativen erforderlich als beim WR-Fall. Bei hoher Last werden bei voller Konversion deutlich mehr längere Alternativen ermöglicht. Dies gilt insbesondere für Knotenpaare mit geringer Distanz, da mit zunehmender Distanz beim betrachteten Mesh-Torus eine zunehmende Anzahl von Alternativen gleicher Länge vorhanden ist.

Ein entsprechendes Verhalten wurde auch für andere, hier nicht gezeigte Netztopologien beobachtet.

Bisher wurde in diesem Abschnitt nur die Neuberechnung eines Pfades bei jeder auftretenden Verbindungsanforderung betrachtet (DGR-Strategie). In realen Implementierungen – und auch in simulativen Untersuchungen – kann dies sehr aufwändig hinsichtlich der erforderlichen Rechenzeit werden. Daher wird im Folgenden mit DGR- $x$  eine Kombination der Verfahren AGR- $x$  und DGR untersucht, bei der zuerst eine Menge vorgegebener Wege abgesucht und nur dann eine dynamische Pfadberechnung durchgeführt wird, wenn in dieser Wegemenge kein Pfad gefunden werden kann. Verglichen werden die Verfahren DGR und DGR- $x$  für das Mesh-Torus-Netz (Bild 6.48) und das Gitternetz (Bild 6.49):

- Im WR-Fall spielt die Anzahl vorberechneter Wege kaum eine Rolle, DGR- $x$  und DGR liegen über dem gesamten Lastbereich bei beiden Netzen sehr nahe zusammen.
- Bei voller Konversion liefert die DGR-Strategie in beiden Netzen geringere Verlustwahrscheinlichkeiten als die Strategie DGR- $x$ . Dies ist vor allem für kleinere Verkehrsangebote deutlich sichtbar.
- Auffällig ist, dass insbesondere beim Gitternetz die Wahl einer höheren Anzahl vorberechneter Wege schlechtere Ergebnisse liefert als die Beschränkung auf einen vorberechneten Weg ( $x = 1$ ). Die starke Verkehrskonzentration auf wenige vorberechnete Wege liefert offensichtlich ungünstigere Lastverteilungen im Netz, als die dynamische Padsuche im gesamten Netz ohne Priorisierung bestimmter Wege.

Dieses Verhalten bestätigt sich auch für das hier nicht gezeigte Deutschlandnetz. Dort liegen für größere Werte von  $x$  die Verfahren DGR- $x$  und DGR noch enger zusammen. Dies entspricht den Erwartungen, da – wie in Bild 6.45 gezeigt – bereits die Verfahren AGR-3 und DGR für einen weiten Lastbereich ähnliche Ergebnisse liefern.



**Bild 6.48:** Vergleich der Verfahren DGR und DGR- $x$  für das Mesh-Torus-Netz **Bild 6.49:** Vergleich der Verfahren DGR und DGR- $x$  für das Gitternetz

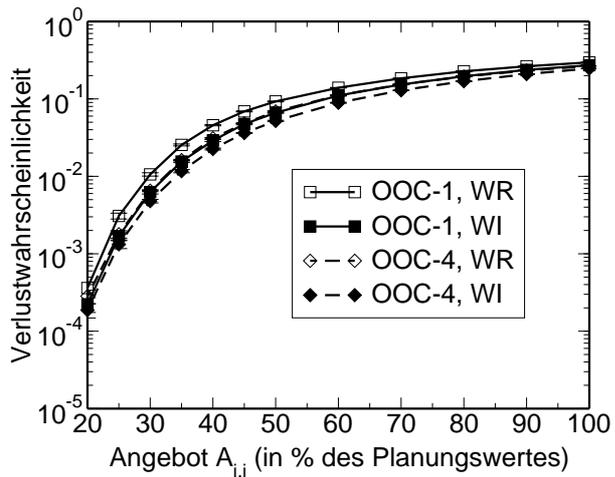
Die Ergebnisse legen die Schlussfolgerung nahe, dass DGR-x für WR-Netze als einfachere Alternative zu DGR gelten kann, während bei WI-Netzen insbesondere bei geringer Netzlast die DGR-Strategie zu kleineren Verlustwahrscheinlichkeiten führt. Anzumerken ist, dass mit zunehmender Netzlast die Wahrscheinlichkeit für DGR-x sinkt, bereits auf den vorberechneten Wegen einen freien Pfad zu finden. Damit werden häufiger dynamische Pfadsuchen erforderlich und die Zeitersparnis gegenüber DGR nimmt ab.

#### 6.2.4 Abschnittsweise Verfahren

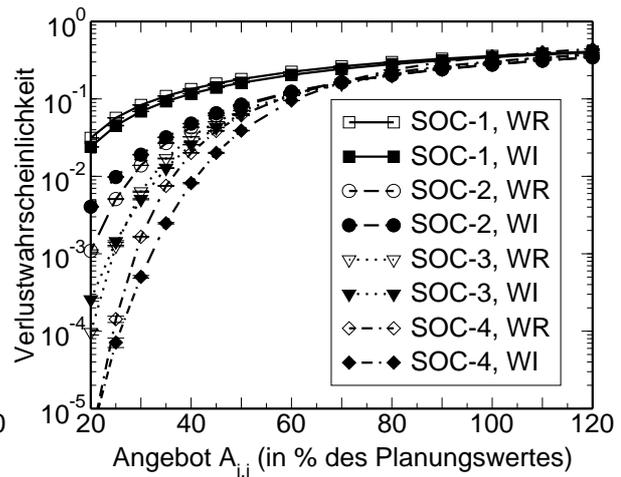
Im Folgenden werden die in Unterkapitel 4.4 beschriebenen abschnittsweise arbeitenden Verfahren OOC-x, SOC-x und SOCC-x untersucht. Die Anzahl der lokalen, in jedem Knoten vorhandenen Alternativen wird durch den Parameter  $x$  ( $x \geq 1$ ) beschrieben. Bei allen Strategien versucht jeder Knoten zuerst, auf einer gegebenen Alternative eine freie Wellenlänge zu finden, ehe zur nächsten Weg-Alternative übergegangen wird. In einer früheren Arbeit wurde gezeigt, dass diese Vorgehensweise zu besseren Ergebnissen führt als die umgekehrte Strategie, bei der zu einer gegebenen Wellenlänge erst alle Weg-Alternativen abgesucht werden, ehe zur nächsten Wellenlänge gewechselt wird [246].

Zuerst wird die Auswirkung unterschiedlicher Werte von  $x$  für jedes Verfahren separat betrachtet, ehe dann die Verfahren miteinander verglichen werden. Aus Platzgründen werden die Verfahren jeweils nur für einige wenige Netztopologien gezeigt. Für die nicht gezeigten Topologien ergibt sich ein entsprechendes Verhalten. Außerdem ist festzuhalten, dass sich für  $x = 1$  identische Ergebnisse für alle drei Strategien ergeben, da keine lokalen Alternativen zur Verfügung stehen.

- Beim OOC-Verfahren (Bild 6.50), bei dem nur im Startknoten einer Verbindungsanforderung zwischen mehreren Alternativen ausgewählt werden kann, ergeben sich relativ geringe Veränderungen bei Erhöhung der Anzahl von Alternativen. Im Bild wird der geringe Unterschied zwischen OOC-1 und OOC-4 sichtbar. Außerdem ist ein kleiner Gewinn durch Konversion zu sehen. Dieser liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie der durch mehr Alternativen erzielbare Gewinn: Die Kurven für OOC-1 mit voller Konversion und OOC-4 ohne Konversion im Netz sind fast identisch.
- Beim SOC-Verfahren (Bild 6.51), bei dem alle Knoten entlang des Weges eines Verbindungsaufbaus die lokalen Alternativen absuchen können, ergeben sich stärkere Unterschiede als bei OOC. Die Absuche einer größeren Anzahl lokaler Alternativen ist also lohnend. Bei SOC-2 zeigt sich für geringe Last ein unerwarteter Effekt, der in einigen Szenarien für die SOC-Strategie beobachtet wurde: Die Verluste für den WI-Fall (volle Konversion) sind größer als die für den WR-Fall. Der Grund ist das Fehlen einer Crank-back-Funktionalität bei SOC. Dadurch wird bei vorhandener Konversion häufig auf den



**Bild 6.50:** Verhalten von OOC- $x$  am Beispiel des Gitternetzes

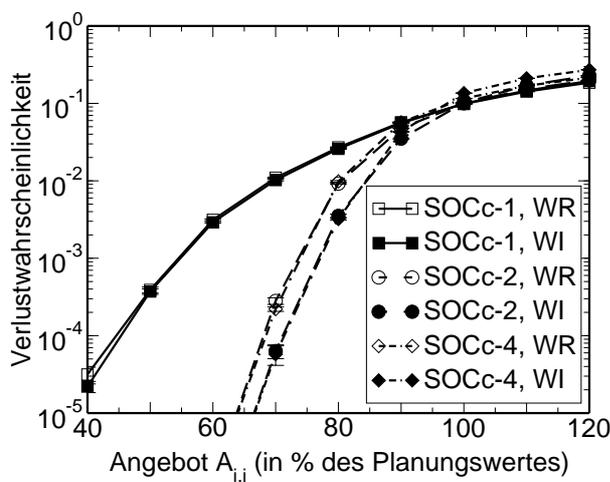


**Bild 6.51:** Verhalten von SOC- $x$  am Beispiel des Mesh-Torus-Netzes

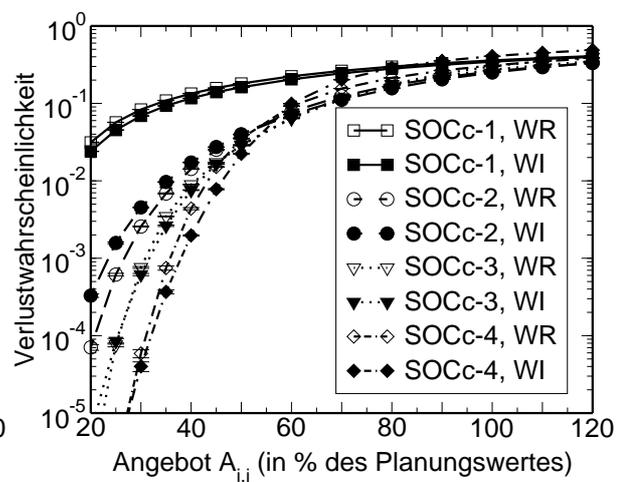
ersten Abschnitten entlang eines Weges noch ein freier Pfad gefunden, der dann aber nicht bis zum Zielknoten zur Verfügung steht, während ein Ausweichen auf (längere) Alternativen erfolgversprechender gewesen wäre.

Die Schlussfolgerung ist, dass beim SOC-Verfahren insgesamt mehr Alternativen genutzt werden können als bei OOC, dass aber das rein progressive Vorgehen einige Nachteile besitzt.

- Beim SOCc-Verfahren kann die Kontrolle zur Untersuchung zusätzlicher Alternativen auch an einen Vorgängerknoten zurückgegeben werden (*crankback*), falls ein Knoten auf allen lokalen Alternativen keinen freien Pfad für den nächsten Abschnitt finden kann. Beim Deutschlandnetz (Bild 6.52) zeigt sich, dass bereits bei zwei Alternativen pro Knoten deutlich geringere Verluste als bei nur einer Alternative auftreten. Für eine höhere



**Bild 6.52:** Verhalten von SOCc- $x$  am Beispiel des Deutschlandnetzes



**Bild 6.53:** Verhalten von SOCc- $x$  am Beispiel des Mesh-Torus-Netzes

Anzahl lokaler Alternativen ergeben sich kaum mehr Verbesserungen: SOCc-2 und SOCc-4 sind fast identisch. Beim Mesh-Torus-Netz (Bild 6.53) ergeben sich bis zur maximal möglichen Wegemenge bei  $x = 4$  mit steigender Alternativzahl geringere Verluste. In beiden Fällen ergeben sich bei Konversion in den Netzknoten (WI-Fall) geringere Verlustwahrscheinlichkeiten.

Diese Aussagen gelten für den Niederlast-Bereich. Für sehr hohe Verkehrsangebote gilt das Gegenteil: Dort liefern die Verfahren mit geringer Anzahl von Alternativen die besten Ergebnisse. Der Grund liegt wieder – wie schon bei den globalen Verfahren – in der bei Hochlast vorteilhaften Beschränkung auf die Direktwege bzw. auf Wege mit möglichst geringem Mehrverbrauch von Ressourcen.

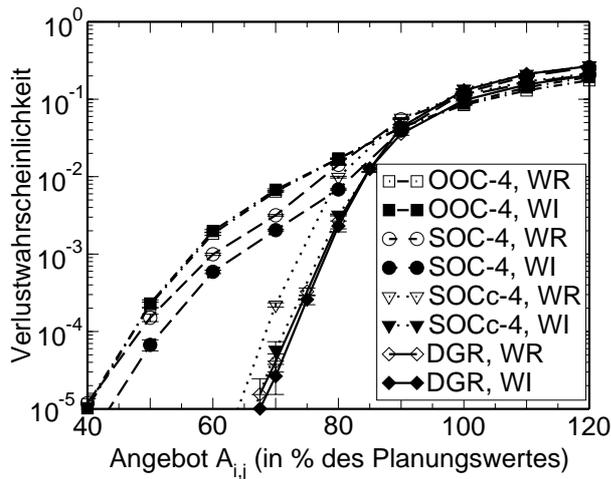
Die Bilder 6.54 (Deutschlandnetz) und 6.55 (Mesh-Torus) vergleichen die drei abschnittswisen Strategien untereinander sowie mit der globalen Strategie DGR. Die abschnittswisen Strategien verwenden dabei jeweils die maximale Anzahl möglicher lokaler Alternativen.<sup>2</sup>

- Bei den abschnittswisen Verfahren liefert für kleinere Verkehrsangebote das OOC-Verfahren die schlechtesten Ergebnisse, gefolgt vom SOC-Verfahren, während das SOCc-Verfahren die besten Ergebnisse liefert. Im Hochlast-Bereich gilt die umgekehrte Reihenfolge.
- Es zeigt sich, dass alle abschnittswisen Verfahren dem globalen Verfahren unterlegen sind (mit Ausnahme des Hochlast-Bereiches). Insbesondere bei den regelmäßigen Netztopologien wirkt sich dieser Unterschied stark aus (gezeigt für das Mesh-Torus-Netz, gilt aber auch für das Gitternetz). Beim Deutschlandnetz erreicht nur das SOCc-Verfahren im WI-Fall zum DGR-Verfahren vergleichbare Ergebnisse. Auch bei dem hier nicht gezeigten Vergleich von AGR-1 mit den abschnittswisen Strategien mit einer Alternative (OOC-1, SOC-1, SOCc-1) schneidet das globale Verfahren besser ab, da es durch die explizite Vorgabe der Wege vom Start- bis zum Zielknoten einen besseren Lastausgleich erreichen kann.<sup>3</sup>
- Auch bei diesen Studien bestätigt sich, dass beim Deutschlandnetz mit mehreren Fasern pro Link die Auswirkungen des Konversionsszenarios geringer sind als beim Mesh-Torus-Netz mit nur einer Faser pro Link. Die Differenz zwischen den Konversionsszenarios WR und WI hängt außerdem stark vom Verkehrslenkungsverfahren ab. Dabei ergeben sich mit voller Konversion um so größere Verbesserungen, je leistungsfähiger das Verfahren ist.

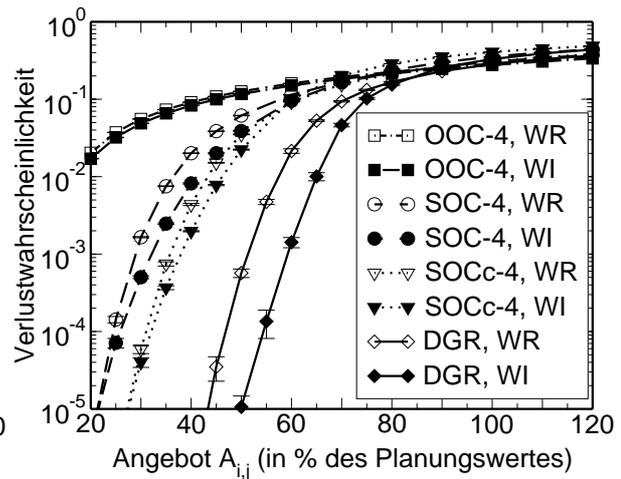
---

2. Beim Deutschlandnetz sind in einem der neun Knoten bis zu 5 Alternativen möglich, wobei sich in allen Studien das Zulassen dieser 5. Alternative im Rahmen der statistischen Aussagegenauigkeit nicht auf die dargestellten Verlustwahrscheinlichkeiten ausgewirkt hat.

3. Dieser Effekt tritt allgemein für abschnittsweise bzw. globale Verkehrslenkung auf. Er ist einer der wichtigsten Gründe für die aktuelle Einführung von MPLS in IP-Netzen: MPLS bietet im Unterschied zu den heute verwendeten IP-Routingprotokollen die Möglichkeit, explizite Wege von der Quelle zum Ziel vorzugeben und damit eine gleichmäßige Lastverteilung im Netz zu erreichen.



*Bild 6.54: Vergleich abschnittsweiser und globaler Verfahren für das Deutschlandnetz*



*Bild 6.55: Vergleich abschnittsweiser und globaler Verfahren für das Mesh-Torus-Netz*

Den in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen abschnittsweiser Verfahren liegen Verkehrslenkungstabellen zu Grunde, bei denen die Alternativen und deren Reihenfolge an Hand der kürzesten Wege im Netz sowie einer nachträglichen Optimierung zur gleichmäßigeren Lastverteilung bestimmt wurden. Dabei hat sich gezeigt, dass die Festlegung der Verkehrslenkungstabellen Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit der betrachteten Verfahren hat. Es ist daher möglich, dass weitere Verbesserungen der gezeigten Strategien durch Optimierung dieser Tabellen erzielt werden können. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit nicht auf abschnittsweisen Strategien liegt, wird für entsprechende Verfahren zur Optimierung der Verkehrslenkungstabellen – die im Übrigen oft auf manueller Optimierung beruhen – auf die Literatur verwiesen [16].

## 6.2.5 Einfluss von Strategien zur Pfadlängenbegrenzung

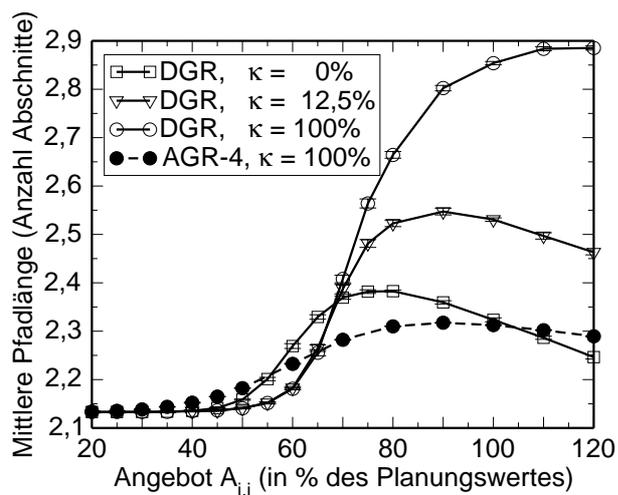
Stehen einem Verkehrslenkungsverfahren mehrere Alternativen zur Realisierung einer Verbindung zur Verfügung, so steigt mit zunehmender Netzlast die Wahrscheinlichkeit, auf längere Alternativwege ausweichen zu müssen. Diese haben einen größeren Ressourcen-Bedarf als der Direktweg. Das vermehrte Auftreten längerer Verbindungen zeigte sich bereits in Bild 6.47 bei der Längenverteilung der Alternativwege beim Mesh-Torus-Netz für die DGR-Strategie.

Bild 6.56 bestätigt dies an Hand der Betrachtung der mittleren Pfadlängen der tatsächlich realisierten Verbindungen. Ausgehend vom Niederlastbereich, in dem kaum Verluste auftreten und die meisten Verbindungen entlang des kürzesten verfügbaren Weges realisiert werden können, nimmt die mittlere Pfadlänge mit steigender Last zuerst zu. Im Hochlastbereich nimmt die

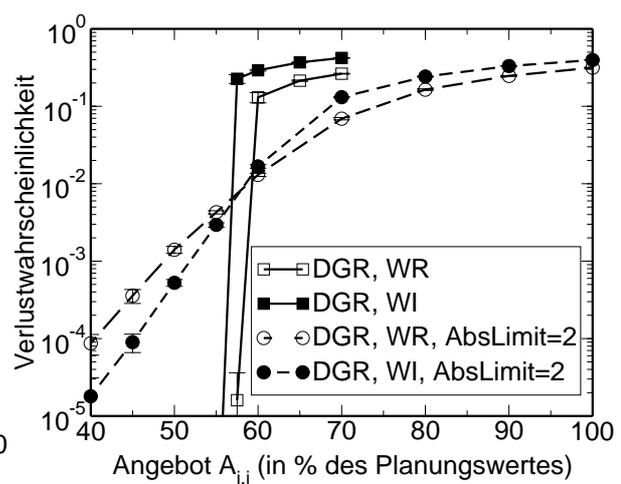
Pfadlänge tendenziell wieder ab, da nun Verbindungen für Knoten größerer Distanz mit hoher Wahrscheinlichkeit abgelehnt werden. Der genaue Verlauf der Pfadlängen ist dabei sowohl von der verwendeten Strategie als auch vom Konversionsgrad abhängig:

- Während das DGR-Verfahren prinzipiell beliebige Wege im Netz erlaubt, stellt AGR-4 für jedes Knotenpaar nur eine begrenzte Anzahl von Alternativen zur Verfügung. Dadurch ist die Zunahme der Pfadlänge bei hoher Last für die AGR-Strategie deutlich geringer.
- Beim DGR-Verfahren wirken sich unterschiedliche Konversionsgrade stark aus. Für  $A_{i,j} < 70\%$  des Planungswertes können mit Konvertieren Pfade entlang kürzerer Wege gefunden werden, ab dieser Last ergeben sich mit steigender Konversion zunehmend längere Pfade.

Bereits aus Telefonnetzen ist der Effekt bekannt, dass bei stark vermaschten Netzen ohne Beschränkung der Weglängen ab einer gewissen Last ein schneller Anstieg zu sehr hohen Verlustwahrscheinlichkeiten erfolgen kann. Bild 6.57 zeigt an Hand eines vollvermaschten Netzes, dass dies auch bei WDM-Netzen unabhängig vom Konversionsszenario auftreten kann. Die durchgezogenen Linien geben die Ergebnisse für die bisher betrachtete DGR-Strategie wieder. Bei steigendem Verkehrsangebot gibt es bis zu einer bestimmten, vom Konversionsgrad abhängigen Schwelle kaum messbare Verluste. An dieser Schwelle geht das Netz nahezu sprunghaft in einen Zustand sehr hoher Verluste über, die im WI-Fall noch größer ausfallen als im WR-Fall. Das Netz kann sich gewissermaßen entweder im verlustfreien Zustand oder in einem Zustand sehr hoher Gesamtverluste befinden.



**Bild 6.56:** Mittlere Anzahl der Abschnitte (Pfadlänge) für globale Strategien im Mesh-Torus-Netz



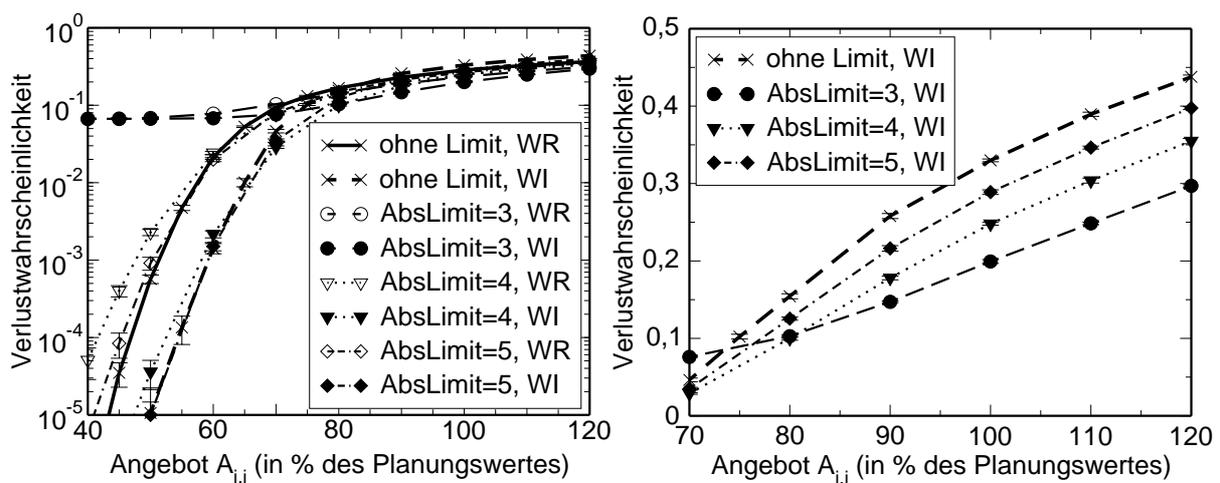
**Bild 6.57:** Verluste bei der DGR-Strategie im vollvermaschten Netz ohne (durchgezogene Linien) und mit absoluter Längengrenze

## Absolute Pfadlängenbegrenzung

Eine naheliegende Abhilfe ist die Einführung einer absoluten Längenbegrenzung, um zu lange Alternativwege zu vermeiden. Die entsprechende Strategie-Ergänzung wird mit „AbsLimit“ bezeichnet (siehe Abschnitt 4.4). Die Kurven für eine Begrenzung der Pfadlängen auf maximal zwei Abschnitte sind in Bild 6.57 ebenfalls gezeigt. Nun ergibt sich ein deutlich sanfter ansteigender Verlauf der Verluste über dem Angebot. Zusätzlich zeigen sich bei geringer Last auch die Vorteile der Verwendung von Konvertern. Allerdings ist auch zu erkennen, dass im Unterschied zum Verfahren ohne Begrenzung für geringe Angebote nun deutliche Verluste auftreten. Diese sind auf die in diesem Lastbereich prinzipiell nicht erforderliche Beschränkung der Pfadlängen zurückzuführen.

Die Auswirkungen einer absoluten Längenbegrenzung mit unterschiedlichen Maximallängen für die DGR-Strategie im Mesh-Torus-Netz zeigt Bild 6.58. Das linke Diagramm zeigt die Verlustwahrscheinlichkeiten über einen großen Bereich des Verkehrsangebots in logarithmischer Darstellung. Das rechte Diagramm enthält den Bereich hoher Last in linearer Darstellung für den WI-Fall, im WR-Fall ergibt sich ein entsprechendes Verhalten mit etwas geringeren Unterschieden zwischen den Kurven. Es lassen sich folgende Aussagen zu einer absoluten Längenbegrenzung ableiten:

- Falls die Grenze zu klein gewählt wird (im Beispiel AbsLimit = 3) können Knotenpaare mit größerer Distanz keine Verbindungen mehr realisieren. Obwohl dies im Hochlastfall wie im rechten Diagramm gezeigt zu den geringsten Verlusten führt, treten bei Niederlast sehr hohe Verluste auf.



**Bild 6.58:** Mesh-Torus mit DGR-Strategie ohne Pfadlängenbegrenzung und mit verschiedenen Werten für eine absolute Längengrenze; links: Gesamtverlauf, rechts: Hochlastbereich in vergrößerter, linearer Darstellung für den WI-Fall

- Für sehr große Werte der Pfadlängenbegrenzung ergibt sich ein besseres Verhalten bei Niederlast, dafür sind im Hochlastfall auch nur noch geringe Verbesserungen verglichen mit einer Strategie ohne Längengrenzen möglich.

Eine absolute Längengrenze hat in Abhängigkeit von der Topologie des Netzes weitere Nachteile:

- Bei Netzen wie dem Mesh-Torus-Netz mit einer großen Anzahl Alternativen gleicher Länge kann die Parametrisierung der Längengrenze nur noch in grober Granularität vorgenommen werden: Wird die Grenze leicht erhöht, ergeben sich u. U. sehr viele neue Alternativen, umgekehrt kann eine leichte Reduzierung der Grenzwerte bereits eine zu starke Einschränkung der Menge potentieller Wege zur Folge haben.
- Mit zunehmender Netzgröße werden die Unterschiede zwischen den Distanzen der einzelnen Knotenpaare größer. Dadurch wird die Wahl einer für alle Knotenpaare einheitlich geltenden Grenze problematischer. Wird die Grenze an die Knotenpaare großer Distanz angepasst, wirkt sie sich für Paare geringer Distanz praktisch nicht mehr aus; bei Anpassung an die Knotenpaare geringer Distanz können Verbindungen für Knotenpaare großer Distanz möglicherweise nicht mehr realisiert werden.

Diese Problematik motiviert die Einführung einer distanzabhängigen Begrenzung.

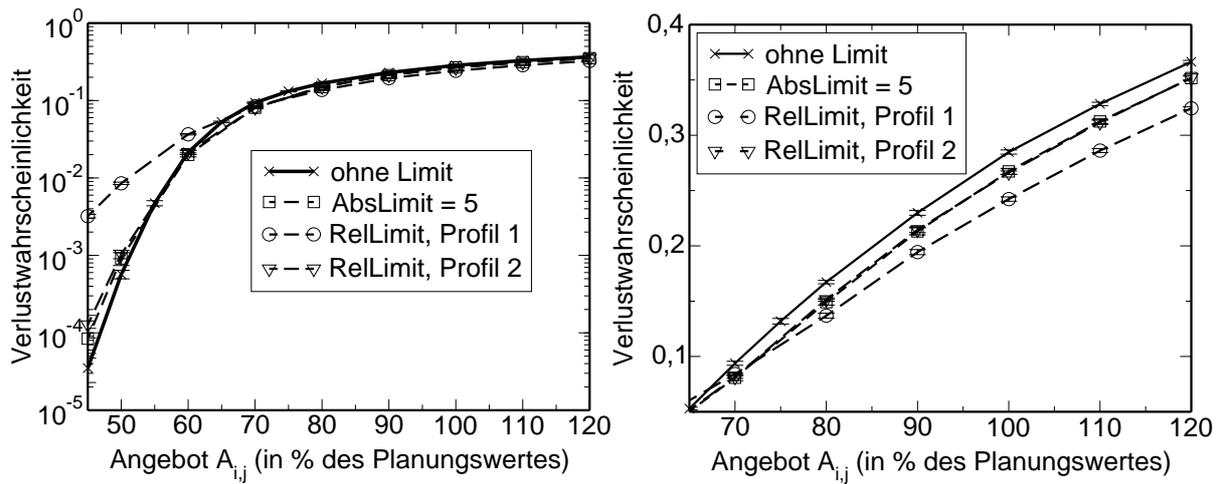
### Distanzabhängige Pfadlängenbegrenzung

Bei der sogenannten „relativen Begrenzung“ („RelLimit“) wird die maximale Pfadlänge in Abhängigkeit der Distanz zwischen Quelle und Ziel festgelegt. Dadurch ergibt sich in der Wahl der Relation zwischen Distanz und zugehöriger Maximallänge ein neuer Freiheitsgrad für die Parametrisierung der Verkehrslenkungsstrategien.

Die verschiedenen Begrenzungsverfahren werden an Hand des Mesh-Torus-Netzes ohne Wellenlängenkonverter miteinander verglichen. Für die distanzabhängige Längenbegrenzung werden zwei unterschiedliche Varianten für die Begrenzungsparameter, sogenannte „Profile“, betrachtet (siehe Tabelle 6.1). Das erste Profil ist sehr restriktiv und erlaubt keine Verlängerungen, wobei beim betrachteten Mesh-Torus-Netz außer für Nachbarknoten trotzdem Alternativwege gleicher Länge zur Verfügung stehen. Das zweite Profil erlaubt darüber hinaus weitere Alternativen.

**Tabelle 6.1:** Begrenzungsprofile der distanzabhängigen Pfadlängenbegrenzung („RelLimit“)

	Profil 1				Profil 2			
Distanz des Knotenpaares	1	2	3	4	1	2	3	4
Limitierungsfaktor	1	1	1	1	3	2	1,7	1,5
max. Pfadlänge (Anzahl Abschnitte)	1	2	3	4	3	4	5	6

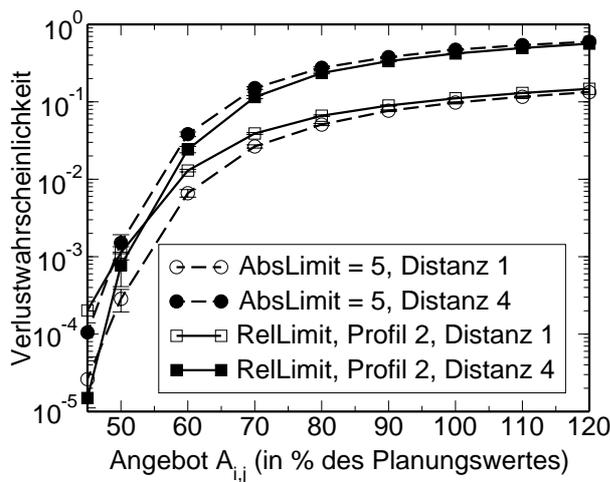


**Bild 6.59:** Mesh-Torus-Netz ohne Wellenlängenkonverter bei der DGR-Strategie mit verschiedenen Begrenzungsverfahren (links: Gesamtverlauf in logarithmischer Darstellung, rechts: Hochlastbereich in linearer Darstellung)

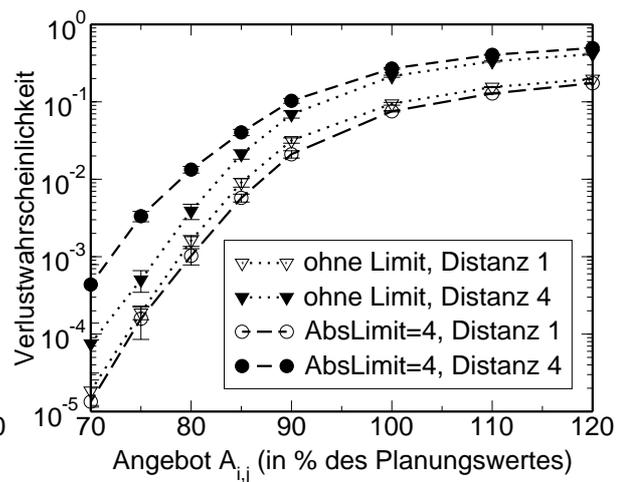
Das linke Diagramm in Bild 6.59 zeigt die Verluste in logarithmischer Darstellung, das rechte den Hochlastbereich in linearer Darstellung. Mit der distanzabhängigen Begrenzung kann ein ähnliches Verhalten wie bei der absoluten Längengrenze erreicht werden. Je größer die Verbesserung im Hochlastbereich ist, desto größer ist auch die Verschlechterung für kleinere Verkehrsangebote. Der Vorteil der distanzabhängigen Grenze liegt in der flexiblen Einstellmöglichkeit für die verschiedenen Knotenpaare. Damit lässt sich prinzipiell eine größere Fairness erreichen, was nachfolgend genauer betrachtet wird.

Bild 6.60 vergleicht die bezüglich der Gesamtverluste sehr ähnlichen Verfahren „DGR mit absoluter Begrenzung“ und „DGR mit distanzabhängiger Begrenzung“ (Profil 2) für das Mesh-Torus-Netz. Dabei zeigt sich, dass – außer für sehr große Lastwerte – für das letztgenannte Verfahren eine zu deutlich größerer Fairness führende Parametrisierung möglich ist. Dies konnte auch für alle anderen betrachteten Netze erreicht werden.

Durch eine distanzabhängige Begrenzung kann damit ein Problem vermieden werden, das bei absoluter Begrenzung auftreten kann. Die erzielbare Verbesserung wird dort in vielen Fällen durch eine Benachteiligung der Knotenpaare größerer Distanz erkauft, während Verbindungen über kurze Distanzen, die meist auch ohne Begrenzungsstrategie bereits eine sehr geringe Verlustwahrscheinlichkeit haben, oft noch weitere Verbesserungen erfahren. Bild 6.61 belegt dieses Verhalten für die DGR-Strategie beim Deutschlandnetz mit voller Konversion: Über den gesamten Lastbereich steigen durch eine absolute Längengrenze die Verluste für Verbindungen über eine große Distanz zu Gunsten von Verbindungen zwischen Nachbarknoten.



**Bild 6.60:** Fairness unterschiedlicher Begrenzungsstrategien beim Mesh-Torus-Netz ohne Konverter (DGR-Strategie)



**Bild 6.61:** Fairness unterschiedlicher DGR-Varianten beim Deutschlandnetz (WI-Fall)

### Adaptive Pfadlängenbegrenzung

Im Folgenden wird untersucht, ob mit belegungszustandsabhängigen (adaptiven) Längenbegrenzungen weitere Verbesserungen erzielt werden können. Dazu wird eine Kombination der distanzabhängigen Begrenzung mit der Betrachtung der Netzbelegung in zwei Variationen betrachtet: Die Längengrenzen werden nur dann in Betracht gezogen, wenn auf dem betrachteten Alternativweg die mittlere bzw. maximale aktuelle Belegung über einer bestimmten Schwelle  $S$  liegt.

In den Bildern 6.62 und 6.63 werden die Ergebnisse für das Deutschlandnetz bei voller Konversion gezeigt, wobei für den Vergleich der Belegung mit der Schwelle  $S$  die mittlere Belegung betrachtet wird. Für die distanzabhängigen Grenzen wurde das Profil gemäß Tabelle 6.2 gewählt. Dieses Profil liefert ohne adaptive Komponente ein gutes Verhalten bei Hochlast, aber auch große Verschlechterungen bei Niederlast.

**Tabelle 6.2:** Begrenzungsprofil für die adaptive, distanzabhängige Pfadlängenbegrenzung

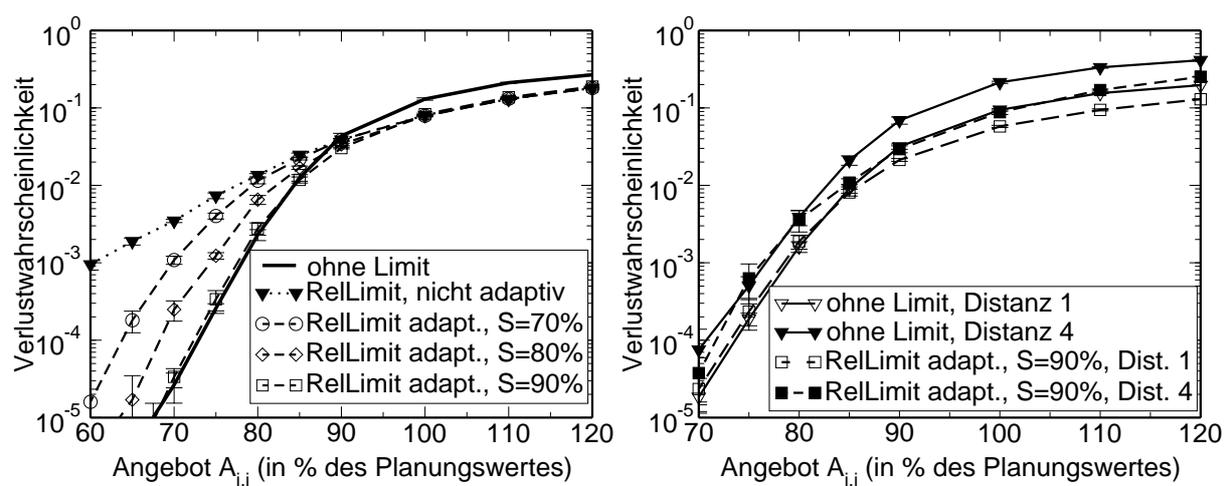
	Profil 1			
Distanz des Knotenpaares	1	2	3	4
Limitierungsfaktor	2	1	1	1
max. Pfadlänge (Anzahl Abschnitte)	2	2	3	4

Bild 6.62 zeigt, dass mit der adaptiven Begrenzungsvariante mit steigendem Wert für  $S$  die Gesamtverluste für geringe Angebote gegenüber der nicht-adaptiven Variante verringert werden können. Für  $S = 90\%$  ergibt sich das gewünschte, optimale Verhalten: Für den gesamten Bereich der Verkehrswerte werden die minimal möglichen Verlustwahrscheinlichkeiten erreicht. Für geringen Verkehr entsprechen die Verluste dem Verfahren ohne Begrenzung, für hohe Verkehrswerte entsprechen sie dem restriktiven distanzabhängigen Begrenzungsverfahren.

Wird der Wert für  $S$  weiter erhöht, ergeben sich wieder Abweichungen vom Optimum. Für den im Bild 6.62 nicht mehr gezeigten Wert von  $S = 95\%$  nimmt die Verbesserung im Hochlastbereich ab, für  $S > 99\%$  ergeben sich keine signifikanten Veränderungen mehr gegenüber dem Verfahren ohne Begrenzung. Dies zeigt, dass der Parameterwahl bei diesem Verfahren eine große Bedeutung zukommt.

Auch hinsichtlich der Fairness besitzt die adaptive Begrenzungsstrategie Vorteile (Bild 6.63). Bei geringer Last ergeben sich nur sehr geringe Unterschiede zum Verfahren ohne Begrenzung. Bei hoher Last wird neben den Gesamtverlusten zusätzlich auch die Fairness verbessert.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist die Variante mit absoluter Begrenzung nicht in den Bildern dargestellt. Die Ergebnisse zeigten, dass die adaptive, absolute Längenbegrenzung gegenüber der adaptiven, distanzabhängigen Variante deutlich unterlegen ist. Sollen bei Niederlast ähnlich geringe Beeinträchtigungen erreicht werden, muss die absolute Grenze auf fünf Abschnitte gesetzt werden. Dies führt dann aber zu deutlich geringeren Verbesserungen bei hoher Netzlast und zu einer weiteren Verschlechterung der Fairness.

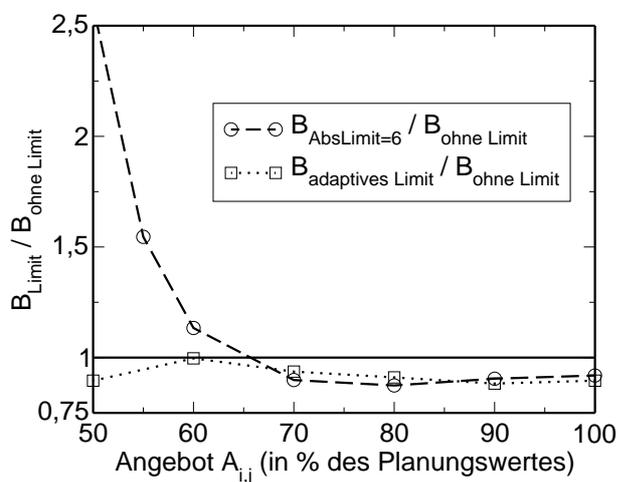


**Bild 6.62:** Verbesserungen durch adaptive, distanzabhängige Längenbegrenzung für DGR beim Deutschlandnetz (WI-Fall)

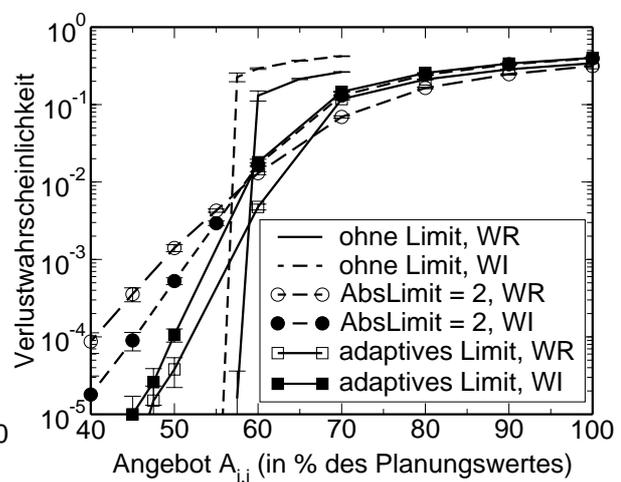
**Bild 6.63:** Distanzabhängige Verluste ohne Begrenzung und bei adaptiver Begrenzung für DGR beim Deutschlandnetz (WI-Fall)

Das beschriebene Verhalten der Begrenzungsstrategien kann jeweils für alle betrachteten Beispielnetze nachgewiesen werden, wobei sich einige zusätzliche Aussagen treffen lassen. Bild 6.64 zeigt für das Gitternetz in linearer Darstellung das Verhältnis der Verluste bei der DGR-Strategie für Varianten mit Begrenzung und die Standardvariante ohne Begrenzung. Gezeigt ist jeweils das Verhältnis der Mittelwerte ohne Berücksichtigung der Vertrauensintervalle. Die Ergebnisse für sehr kleine Verkehrswerte sind mit entsprechend großer Unsicherheit behaftet. Deutlich erkennbar ist das gewünschte Verhalten der adaptiven Variante, die über den gesamten Lastbereich besser als die Variante ohne Begrenzung abschneidet. Bei Hochlast beträgt die Verbesserung ungefähr 10%. Bei absoluter Begrenzung ergeben sich dagegen für geringe Verkehrswerte deutliche Verschlechterungen gegenüber dem Verfahren ohne Begrenzung.

Bild 6.65 zeigt die Ergebnisse für die Vollvermaschung. Ohne Pfadlängenbegrenzung tritt das bereits beschriebene „sprunghafte“ Verhalten auf. Eine absolute Begrenzung führt zwar zu einem langsameren Anstieg der Verluste, aber auch zu hohen Verlusten bei geringem Verkehrsangebot. Deshalb ist zusätzlich eine adaptive Variante mit absoluter Begrenzung gezeigt, bei welcher eine Begrenzung auf zwei Abschnitte ab einer mittleren Belegung der Alternativwege oberhalb von 75% erfolgt. Bei dieser Variante können für beide Konversionsszenarien bei geringer Last die Verluste deutlich abgesenkt werden, während bei hoher Last weiterhin gute Ergebnisse erreicht werden. Somit eignet sich dieses Verfahren für einen weiten Lastbereich.



**Bild 6.64:** Verhältnis der Verlustwahrscheinlichkeiten unterschiedlicher Begrenzungsstrategien (Gitternetz, WI-Fall, DGR-Strategie)



**Bild 6.65:** Verluste bei Vollvermaschung mit DGR-Strategie (adaptives absolutes Limit mit  $S = 0,75$  und Grenzlänge = 2 Abschnitte)

## 6.2.6 Einfluss des Konversionsgrades im Netz

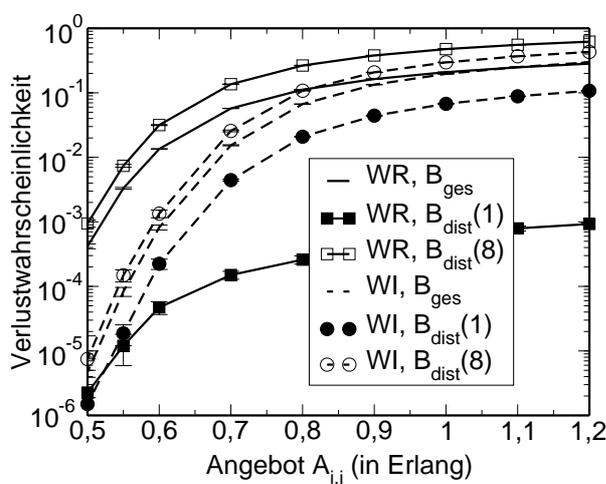
Bei den bisherigen Studien haben sich bezüglich der Konversion einige Effekte gezeigt, die im Folgenden genauer untersucht werden sollen:

- Durch Konversion werden die Verluste bei geringer Last gesenkt.
- Bei hoher Last im Netz werden die Verluste durch Konversion dagegen erhöht.
- Durch Konversion wird die Fairness verbessert, d. h. der Unterschied der Verluste für Knotenpaare unterschiedlicher Distanz reduziert.

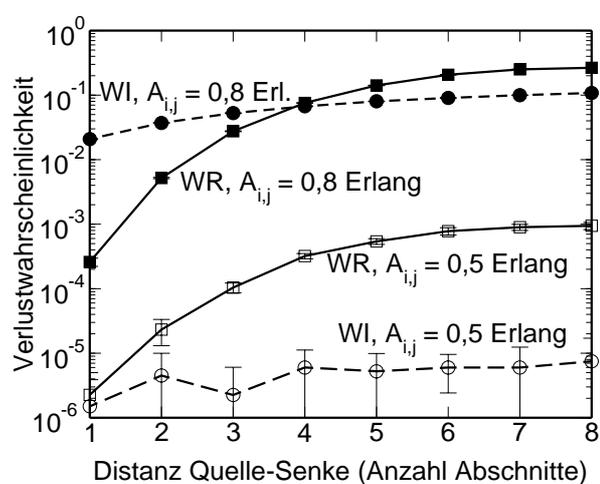
Diese Aussagen werden nachfolgend für den bidirektionalen Ring bestätigt. Für jede Verbindungsanforderung existieren genau zwei Wegalternativen, so dass das gewählte Verfahren AGR-2 alle Alternativen absucht. Bild 6.66 zeigt die Reduktion der Gesamtverluste ( $B_{ges}$ ) bei voller Konversion gegenüber dem Netz ohne Konversion (gestrichelte bzw. durchgezogene Linien ohne Symbole). Auch die Reduktion der Unterschiede der Verluste für Knotenpaare der Distanz 1 und der Distanz 8 ist deutlich zu sehen (Linien mit Symbolen): Die Kurven für den WI-Fall sind über den gesamten Lastbereich sehr viel näher zusammen.

Bild 6.67 zeigt die distanzabhängigen Verluste für alle im Ring möglichen Distanzen bei zwei verschiedenen Werten für das Verkehrsangebot. Zur Verdeutlichung sind die diskreten Werte durch Linien verbunden. Für beide Verkehrswerte verlaufen die Kurven im WI-Fall deutlich flacher als im WR-Fall. Dies bedeutet, dass bei vorhandener Konversion Knotenpaare mit großer Distanz auf Kosten der Knotenpaare mit kleiner Distanz geringere Verluste erfahren als im WR-Fall.

Im WI-Fall ist für jeden Kanal am Ausgang der optischen Cross-Connects ein Konverter vorhanden. Die Belegung dieser Konverter erlaubt Aussagen über den tatsächlichen Bedarf. Die



**Bild 6.66:** Verluste über dem Verkehrsangebot beim bidirektionalen Ring mit AGR-2



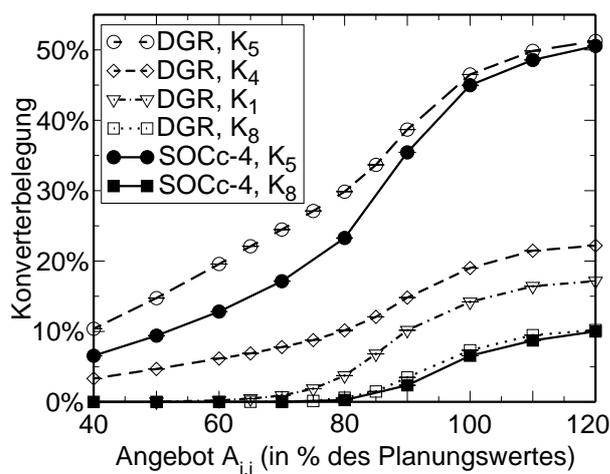
**Bild 6.67:** Verluste über der Distanz beim bidirektionalen Ring mit AGR-2

Konverterbelegung wird im Folgenden aus dem Mittelwert aller zeitlichen Belegungen gewonnen und in Prozent ausgedrückt. Eine Konverterbelegung von 50% bedeutet also, dass über die gesamte Simulationszeit gemittelt die Hälfte der Konverter belegt war.

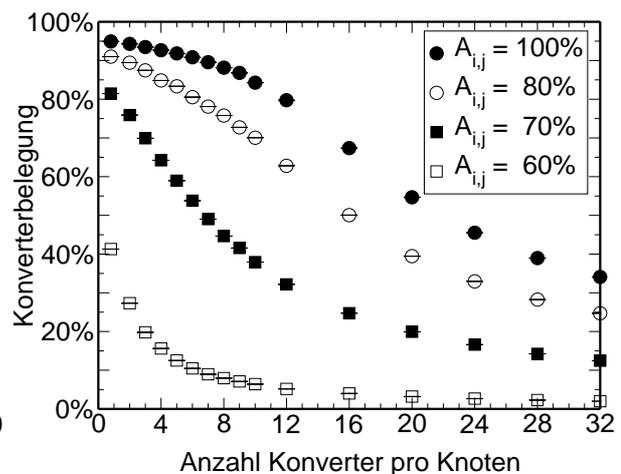
Bild 6.68 zeigt die Konverterbelegung für das Deutschlandnetz mit voller Konversion (WI-Fall) für verschiedene Knoten und zwei Verkehrslenkungsstrategien. Bei dieser unregelmäßigen Netztopologie unterscheiden sich die Belegungswerte der einzelnen Knoten stark. Wie zu erwarten, ergeben sich für die zentralen Knoten im Netz höhere Werte als für die Randknoten. In vielen Knoten ergeben sich für geringe Last sehr geringe Konverterbelegungen. Dies gilt sowohl bei dem globalen als auch dem abschnittswisen Verfahren und legt die Vermutung nahe, dass Konverter ohne signifikante Auswirkungen auf das Netzverhalten eingespart werden könnten.

Bei den im Bild 6.69 gezeigten Studien ist die Konverterbelegung über der Anzahl Konverter pro Knoten für das Mesh-Torus-Netz bei der DGR-Strategie aufgetragen. Wie bei der Knotenmodellierung in Abschnitt 5.1.2 beschrieben, stehen diese Konverter in einem Pool allen Verbindungen eines Knotens zur Verfügung. Da es sich beim Mesh-Torus um ein regelmäßiges Netz mit gleichmäßiger Dimensionierung handelt, ergeben sich für alle Knoten entsprechende Ergebnisse. Deshalb werden nur die für alle Knoten repräsentativen Ergebnisse eines Beispielknotens gezeigt. Außerdem ist anzumerken, dass die gezeigte maximale Anzahl von Converters pro Knoten ( $\kappa = 32$ ) dem WI-Fall entspricht, da jeweils 4 Ausgangsfasern pro Knoten mit jeweils 8 Wellenlängenkanälen vorhanden sind.

Der Parameter der Kurvenschar ist das jeweilige Verkehrsangebot in Prozent des Planungswertes. Für alle Beispielwerte zeigt sich ausgehend vom WR-Fall eine schnelle Abnahme der Belegungswahrscheinlichkeiten mit zunehmender Konverterzahl, für große Konverterzahlen



**Bild 6.68:** Mittelwerte der zeitlichen Konverterbelegung beim Deutschlandnetz mit voller Konversion für verschiedene Knoten



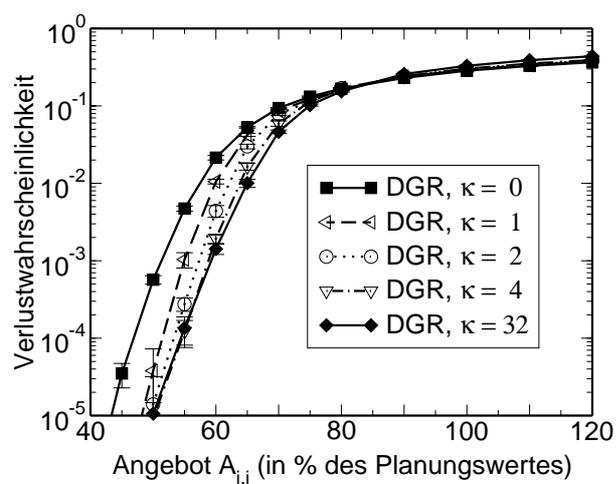
**Bild 6.69:** Mittelwert der zeitlichen Konverterbelegung eines beliebigen Knotens beim Mesh-Torus-Netz mit DGR-Strategie

ergeben sich praktisch keine Veränderungen mehr. Ein Grund hierfür liegt in der Modellannahme, dass in einem Knoten entstehende und terminierende Verbindungen keine Konverter in diesem Knoten benötigen. Deshalb ist eine vollständige Belegung im WI-Fall nur für reinen Transitverkehr in einem Knoten möglich. Bei der angenommenen gleichmäßigen Verkehrsverteilung ist dies zwar theoretisch möglich, tritt aber nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit auf. Zudem benötigen mit großer Wahrscheinlichkeit nicht alle Transitverbindungen eines Knotens einen Konverter, da einige ihre Wellenlänge beibehalten können.

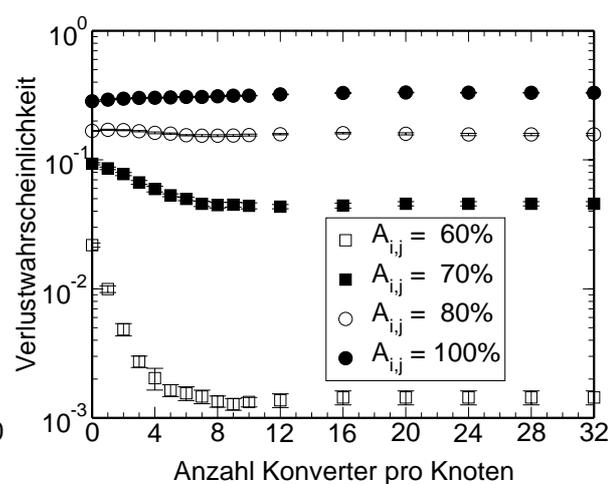
Die gezeigte rasche Abnahme der durchschnittlichen Belegung mit steigender Konverterzahl tritt auch für die anderen Netztopologien und Verkehrslenkungsverfahren auf. Deshalb soll im Folgenden geklärt werden, wie sich eine reduzierte Anzahl von Converttern auf die Verlustwahrscheinlichkeiten auswirkt.

Die Ergebnisse werden zuerst für das Mesh-Torus-Netz mit der DGR-Strategie als leistungsfähigem Beispielfahren gewonnen. Bild 6.70 zeigt die Gesamtverluste über dem Angebot für verschiedene Konverterbestückungen als Kurvenparameter. Über einen weiten Lastbereich (mit Ausnahme des Hochlastbereichs) ergeben sich bereits deutliche Verbesserungen für eine geringe Anzahl von Converttern im Knoten. Bei einer Steigerung von vier auf 32 Konverter pro Knoten ergeben sich dagegen kaum mehr Verbesserungen.

Die in Bild 6.71 dargestellten Gesamtverluste über der Anzahl von Converttern pro Knoten zeigen ein stark vom Verkehrsangebot abhängiges Verhalten. Für alle Lastbereiche gilt, dass sich für große Konverterzahlen keine signifikanten Veränderungen mehr ergeben. Bei geringem Angebot nehmen die Verluste mit steigender Konverterzahl zuerst sehr schnell ab und bleiben dann mit weiter steigender Konverterzahl praktisch konstant. Bei einem Angebot von  $A_{i,j} = 80\%$  des Planungswertes ergibt sich eine von der Konversion nahezu unabhängige Ver-



**Bild 6.70:** Gesamtverluste über der Last beim Mesh-Torus-Netz;  $\kappa$  = Anzahl der Konverter pro Knoten

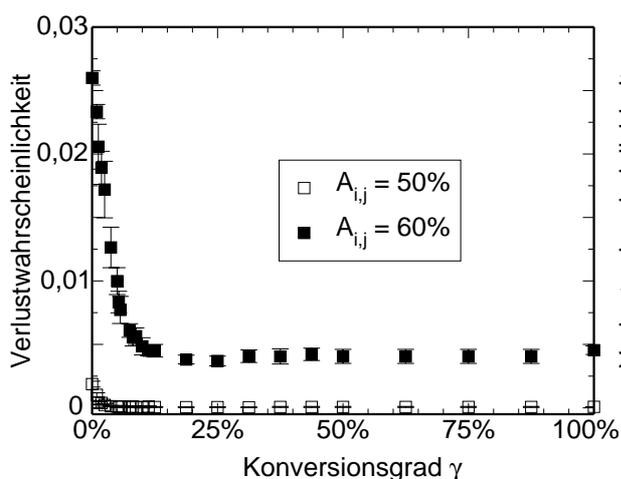


**Bild 6.71:** Gesamtverluste über der Anzahl von Converttern beim Mesh-Torus-Netz mit DGR-Strategie

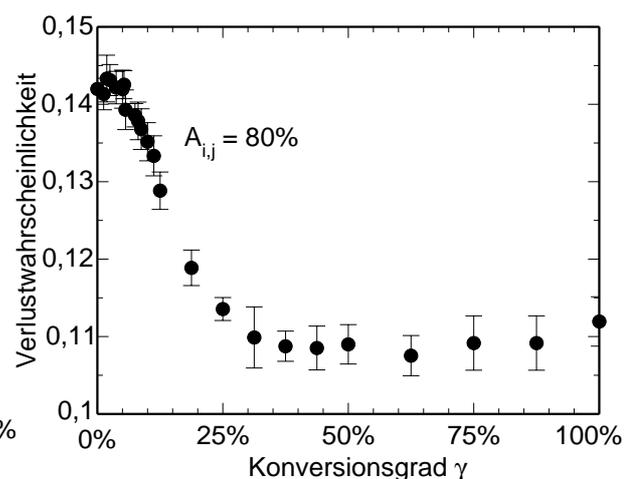
lustwahrscheinlichkeit. Bei sehr hoher Last zeigt sich ein Anstieg der Verluste, ohne dass eine Reduktion folgt. Dies stimmt mit den bereits bei einigen Studien der vorigen Abschnitte gemachten Beobachtungen überein. Dieses Verhalten ist darauf zurückzuführen, dass Konverter in einigen Fällen die Realisierung von Verbindungsanforderungen entlang längerer Alternativwege ermöglichen, während ohne Konverter diese Verbindungen abgelehnt worden wären.

Die oben beschriebenen Effekte werden in den Bildern 6.72 und 6.73 auch für das Gitternetz mit DGR-Strategie bestätigt. Die Verlustwahrscheinlichkeiten werden in linearer Darstellung für verschiedene Angebotswerte getrennt gezeigt. Da beim Gitternetz an den Knoten eine unterschiedliche Anzahl von Fasern angeschlossen ist, wird nicht die von Knoten zu Knoten variierende Anzahl der Konverter, sondern der sogenannte „Konversionsgrad“  $\gamma_i = \kappa_i / (f_i \cdot w)$  angegeben. Dieser beschreibt, wieviele Konverter jeder Knoten  $K_i$  bezogen auf die volle Konversion beim WI-Fall besitzt (0% entspricht dem WR-Fall, 100% dem WI-Fall). Für alle Knoten wird derselbe Konversionsgrad  $\gamma$  angenommen. Für geringere Verkehrswerte (Bild 6.72) zeigt sich nach einer raschen Abnahme der Verluste ein im Rahmen der statistischen Aussagesicherheit konstanter Verlauf über dem Konversionsgrad. Für die im Bild 6.73 gezeigte höhere Last ist in einem engen Bereich kleiner Werte von  $\gamma$  sogar eine Zunahme der Verluste mit steigendem Konversionsgrad zu sehen.

Die wesentliche Schlussfolgerung aus diesen Studien ist, dass die oft in der Literatur zu findende Aussage „zusätzliche Konverter reduzieren die Verlustwahrscheinlichkeit im Netz“ nicht generell richtig ist. Es konnte hier gezeigt werden, dass sie in Abhängigkeit von der Netzlast und der vorhandenen Konversionsfähigkeit eines Netzes nicht in allen Fällen zutrifft.



**Bild 6.72:** Verluste über dem Konversionsgrad beim Gitternetz mit DGR-Strategie für  $A_{i,j} = 50\%$  bzw.  $60\%$

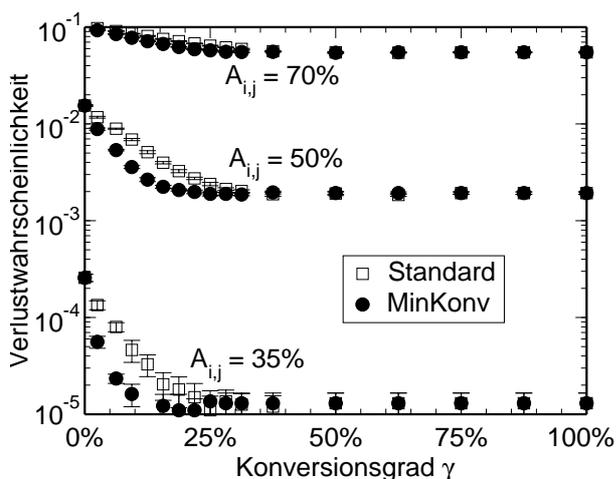


**Bild 6.73:** Verluste über dem Konversionsgrad beim Gitternetz mit DGR-Strategie für  $A_{i,j} = 80\%$

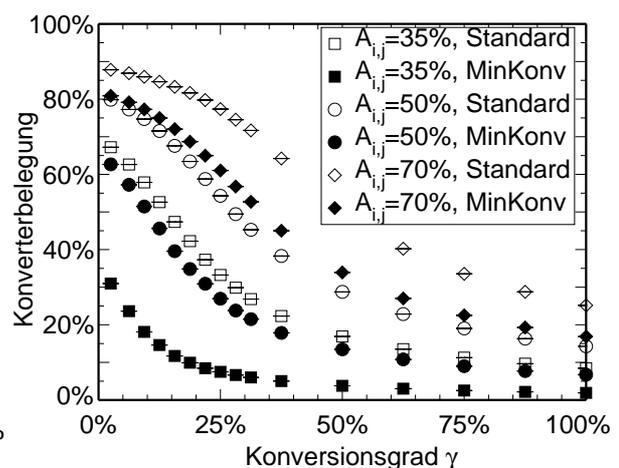
Aus dem oben beschriebenen Verhalten der Konverterbelegung und der Verlustwahrscheinlichkeiten über dem Konversionsgrad leitet sich die Idee zu der mit „MinKonv“ bezeichneten Strategie der „minimalen Konverternutzung“ ab (Abschnitt 4.4). Die Grundidee besteht darin, für Verbindungen die Anzahl der benutzten Konverter zu minimieren und dafür längere Wege zu erlauben. Damit soll eine möglichst effiziente Nutzung der aufwändigen Wellenlängenkonverter erreicht werden.

Zuerst wird diese Strategie mit der in allen bisherigen Untersuchungen verwendeten Standard-Strategie zur Konverterverwendung in Kombination mit dem Verfahren AGR-4 für das Mesh-Torus-Netz verglichen. Die „MinKonv“-Strategie wird dabei durch ausgefüllte Symbole dargestellt. Bild 6.74 zeigt die Verluste über dem Konversionsgrad mit unterschiedlichen Werten für das Verkehrsangebot als Kurvenparameter. Für den WR-Fall ( $\gamma = 0\%$ ) liefern beide Konverterverwendungs-Strategien wie erwartet identische Werte. Mit steigendem Konversionsgrad ist bei Anwendung von „MinKonv“ ein schnellerer Abfall der Verluste als bei der Standard-Strategie zu sehen. Für hohe Konversionsgrade nähern sich die Kurven wieder an. Dies zeigt, dass in bestimmten Fällen eine gegebene Verlustwahrscheinlichkeit durch Anwendung der „MinKonv“-Strategie mit geringerer Konverterzahl erreicht werden kann.

Für die im Bild 6.75 gezeigte Konverterbelegung eines beliebigen Beispielknotens des symmetrischen Mesh-Torus-Netzes ergibt sich ein ähnliches Verhalten. Bei „MinKonv“ erfolgt die Abnahme mit steigendem Konversionsgrad schneller als bei der Standard-Variante. Die Konverterbelegung bleibt bei „MinKonv“ auch für große Konversionsgrade geringer, wobei dies – wie im Bild 6.74 sichtbar – keine Auswirkungen mehr auf die Gesamtverluste hat.



**Bild 6.74:** Verlustwahrscheinlichkeiten bei unterschiedlichen Strategien zur Konverterverwendung (Mesh-Torus-Netz mit AGR-4)

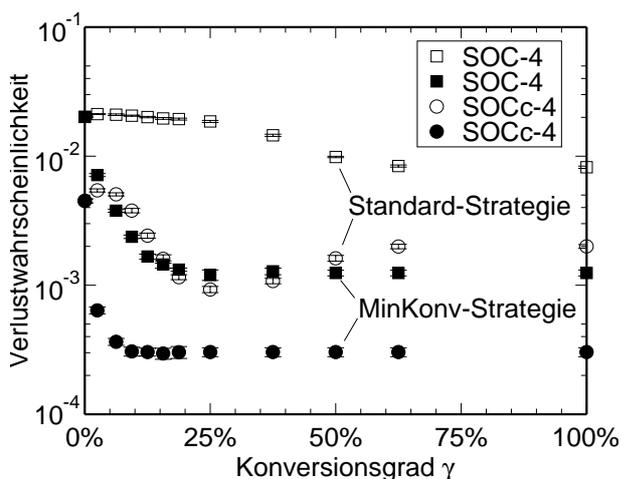


**Bild 6.75:** Konverterbelegung bei unterschiedlichen Strategien zur Konverterverwendung (Mesh-Torus-Netz mit AGR-4)

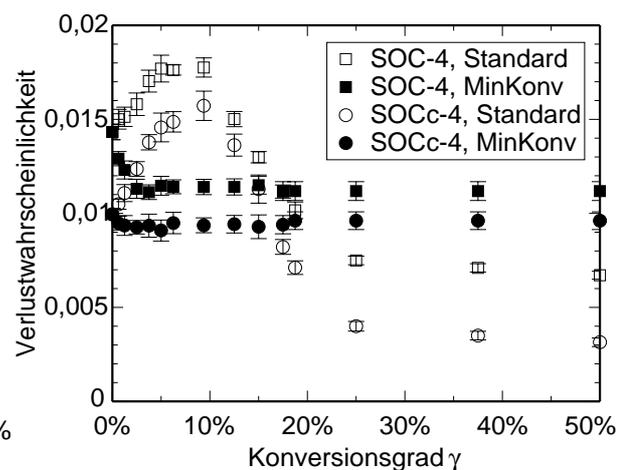
Für abschnittsweise Verfahren wurde in Abschnitt 4.4 ebenfalls eine mit „MinKonv“ bezeichnete Strategie-Ergänzung zur minimierten Konverterverwendung definiert. Wie die Bilder Bild 6.76 für das Mesh-Torus-Netz bei einem Angebot von  $A_{i,j} = 40\%$  des Planungswertes und Bild 6.77 für das Deutschlandnetz bei einem Angebot von  $A_{i,j} = 80\%$  des Planungswertes zeigen, treten auch bei abschnittweisen Strategien ähnliche Effekte für die Verlustwahrscheinlichkeiten bei veränderlichem Konversionsgrad auf. Die „MinKonv“-Strategie führt sowohl für SOC als auch für SOCc zu einer schnelleren Abnahme der Verluste. Für einen höheren Konversionsgrad ergeben sich keine Veränderungen mehr, weswegen für das Deutschlandnetz die Werte nur bis zu einem Konversionsgrad von  $\gamma = 50\%$  dargestellt sind.

Bei der Studie für das Deutschlandnetz (Bild 6.77) zeigt sich bei der Standard-Variante der abschnittweisen Verfahren SOC und SOCc der bereits bei Bild 6.73 für globale Verfahren beobachtete Effekt, dass mit steigendem Konversionsgrad die Verluste zuerst zunehmen, ehe eine Reduktion unter den Wert im WR-Fall erfolgt. Bei einer optimierten Konverterverwendung wie im Falle von „MinKonv“ tritt dieser Effekt nicht auf.

Im Unterschied zu den globalen Verfahren bleibt bei den abschnittweisen Verfahren eine Differenz zwischen der Standard- und der „MinKonv“-Variante auch bei hohem Konversionsgrad bestehen. Der Grund liegt in den rein lokal getroffenen Entscheidungen. Dadurch werden für die beiden Strategie-Varianten auch bei voller Konversion unterschiedliche Wege gewählt. Wie die Bilder zeigen, kann dabei in Abhängigkeit von den Systemparametern, insbesondere der Topologie, die „MinKonv“-Strategie kleinere Verluste (wie beim Mesh-Torus, Bild 6.76) oder größere Verluste (wie beim Deutschlandnetz, Bild 6.77) als die Standard-Strategie verursa-



**Bild 6.76:** Einfluss der Strategie zur Konverterverwendung bei abschnittweisen Verfahren (Mesh-Torus für  $A_{i,j} = 40\%$ )



**Bild 6.77:** Einfluss der Strategie zur Konverterverwendung bei abschnittweisen Verfahren (Deutschlandnetz für  $A_{i,j} = 80\%$ )

chen. Dagegen liefern die in dieser Arbeit betrachteten globalen Verfahren bei voller Konversion unabhängig von der Strategie der Konverterverwendung identische Ergebnisse<sup>4</sup>.

### 6.2.7 Schlussfolgerungen

Aus den Untersuchungen der vorigen Abschnitte ergibt sich, dass eine leistungsfähige globale Verkehrslenkungsstrategie in einem WDM-Netz mehrere Komponenten beinhalten sollte:

- Die Menge der möglichen Alternativwege muss ausreichend groß sein. Dies kann vorteilhaft dadurch erreicht werden, dass zusätzlich zu vorgegebenen Wegen noch eine dynamische, d. h. erst zum Zeitpunkt des Auftretens einer Verbindungsanforderung durchgeführte Pfadsuche realisiert wird.
- Eine Begrenzung der Pfadlängen ist vor allem beim Einsatz von Strategien mit einer großen Anzahl von Alternativen sinnvoll, um auch bei hoher Last ein stabiles Netzverhalten zu gewährleisten und die Verluste in diesem Lastbereich nicht zu sehr ansteigen zu lassen. Diese Begrenzung muss distanzabhängig erfolgen und den momentanen Netzzustand berücksichtigen, da andernfalls bei geringer Last eine unnötige Erhöhung der Verluste auftritt.
- Die meisten Strategien neigen ohne weitere Vorkehrungen dazu, Verbindungen zwischen Knotenpaaren kurzer Distanz gegenüber Verbindungen über große Distanzen zu bevorzugen. Um dies zu verbessern, sind Mechanismen zur Erhöhung der Fairness erforderlich. Sehr einfache Mechanismen können die gezeigten Anpassungen der jeweils erlaubten Anzahl von Alternativwegen oder die distanzabhängigen Pfadlängenbegrenzungen sein. Daneben sind aber zahlreiche weitere Verfahren denkbar, die beispielsweise auf den in Abschnitt 6.1.5 für lineare Ketten vorgestellten Mechanismen beruhen können.
- Die Strategie zur Verwendung von Konvertern muss an die spezifische Situation angepasst sein. Abhängig von zahlreichen Parametern – wie beispielsweise dem vorhandenen Konversionsgrad im Netz oder der momentanen Belegung – können jeweils andere Nutzungsstrategien die besten Ergebnisse liefern.

Hinsichtlich der Auswirkungen von Wellenlängenkonvertern bestätigen sich die wesentlichen Ergebnisse aus den Untersuchungen linearer Ketten. Bei geringem Angebot reduzieren Konverter die Gesamtverluste und verbessern außerdem die Fairness. Bei hohem Angebot bleibt

---

4. Prinzipiell kann eine Strategie zur Konverterverwendung auch bei voller Konversion Auswirkungen haben. Dies gilt sogar unter der zusätzlichen Annahme, dass keine längeren Alternativwege auf Grund der Konverterverwendung erlaubt werden. Es ist beispielsweise möglich, dass bei einer Strategie zur Minimierung der Konverter eine andere – möglicherweise gleichlange – Wegalternative gewählt wird als ohne die Konverterminimierung. Dadurch können nachfolgend andere Link-Belegungen und damit beispielsweise andere Verlustereignisse im Netz auftreten.

die Verbesserung der Fairness durch Konverter erhalten, allerdings steigen nun die Gesamtverluste an. Mit der angenommenen Architektur der Netzknoten können durch partielle Konversion in vielen Fällen zur vollen Konversion vergleichbare Ergebnisse mit einer deutlich geringeren Konverterzahl erreicht werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass durch eine geeignete Wahl der Parameter bei den sehr flexibel einstellbaren globalen Verfahren meist das gewünschte Verhalten erreicht werden kann. Die entsprechende Wahl der Parameter erfolgte in dieser Arbeit manuell, basierend auf der Auswertung der Ergebnisse zahlreicher Studien. Als wichtiger Ansatz für weiterführende Arbeiten ergibt sich damit die Frage, ob zur optimalen Parametrisierung einer Verkehrslenkungsstrategie ein automatisiertes Verfahren möglich ist.

Der Vergleich von globalen Verfahren mit einigen abschnittswisen Verfahren zeigt, dass letztere meist eine deutlich geringere Leistungsfähigkeit besitzen. Für die zur Zeit aktuell diskutierte verteilte Verkehrslenkung in WDM-Netzen reichen solche rein lokalen Mechanismen also nicht aus. An ihrer Stelle bietet sich der Einsatz sogenannter *verteilter* Verkehrslenkungsverfahren an, bei denen zwischen den Knoten ein Informationsaustausch stattfindet. Aktuell werden hierfür die Erweiterungen dementsprechender IP- oder ATM-basierter Protokolle für die Verwendung in WDM-Netzen diskutiert.

### **6.3 Auswirkungen des Verkehrsverhaltens**

Allen bisherigen Untersuchungen lagen jeweils ein Poisson-Ankunftsprozess und negativ-exponentiell verteilte Haltedauern zu Grunde. Das Ziel dieses Abschnittes ist es nicht, ein möglichst realistisches Verkehrsmodell für dynamische WDM-Netze zu entwerfen, da hierfür noch keine ausreichenden Informationen vorliegen. Vielmehr soll untersucht werden, inwiefern die bisher getroffenen Aussagen und das Verhalten der betrachteten Strategien von den Annahmen über das Verkehrsverhalten abhängen.

Gemäß dem in Abschnitt 5.1.4 beschriebenen Verkehrsmodell werden sowohl für den Ankunftsabstand als auch die Haltedauern unterschiedliche Werte für die Variationskoeffizienten verwendet. Motiviert werden diese Untersuchungen durch frühere Arbeiten, in denen nachgewiesen werden konnte, dass eine Abweichung von Poisson-Ankunftsprozessen Auswirkungen auf das Netzverhalten hat [245, 247]. In der neueren Literatur wurden diesbezüglich Einzelknoten ohne Berücksichtigung von spezifischen WDM-Eigenschaften näher untersucht. Im Folgenden werden darüber hinausgehend eine lineare Kette und ein Gitternetz mit unterschiedlichen Verkehrslenkungsstrategien betrachtet.

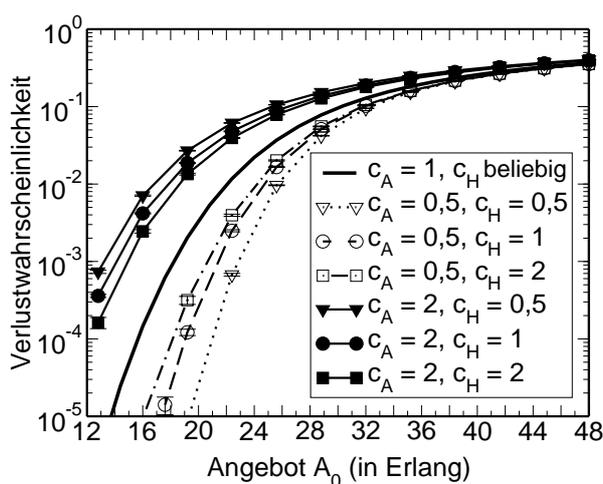
### 6.3.1 Untersuchungen am G/G/n-System

Bild 6.78 zeigt das Verhalten eines GI/G/32-Verlustsystems für einen größeren Bereich des Angebots  $A_0$ . Da in späteren Untersuchungen die bereits früher betrachtete lineare Kette mit 32 Kanälen auf jedem Abschnitt verwendet wird, wurde  $n = 32$  gewählt.

Die Kurve für  $c_A = 1$  (durchgezogene Linie ohne Symbole) entspricht dem Verhalten eines M/G/32-Systems, bei dem sich – wie aus der Literatur bekannt – unterschiedliche Variationskoeffizienten für die Haltedauern nicht auswirken. Für  $c_A < 1$  ergeben sich wie erwartet steigende Verluste bei steigenden Werten für  $c_H$ . Dagegen zeigt sich für  $c_A > 1$ , dass mit steigendem  $c_H$  die Verluste abnehmen. Beide Beobachtungen gelten jeweils für den gesamten Lastbereich, wobei sich die Kurven für hohe Lasten annähern.

Dieses Verhalten wurde von Charzinski in [51] für ein G/G/n-Verlustsystem näher untersucht. Dieses einem Einzelknoten entsprechende Modell wurde für  $n = 1$  und  $n = 10$  simulativ für zwei Angebotswerte (50% und 60%) untersucht. Für  $n = 1$  wird das beobachtete Verhalten von ihm zusätzlich durch eine anschauliche analytische Begründung erklärt.

In früheren Untersuchungen zu GI/G/n-Wartesystemen wurden für die Blockierwahrscheinlichkeit der Bedieneinheiten ebenfalls ähnliche Beobachtungen gemacht [237, 267]. Die folgenden Abschnitte sollen nun klären, ob dieses Verhalten auch bei komplexeren Systemen auftritt.



**Bild 6.78:** Verhalten des GI/G/32-Systems für unterschiedliche Variationskoeffizienten der Ankunftsabstände ( $c_A$ ) und der Haltedauern ( $c_H$ )

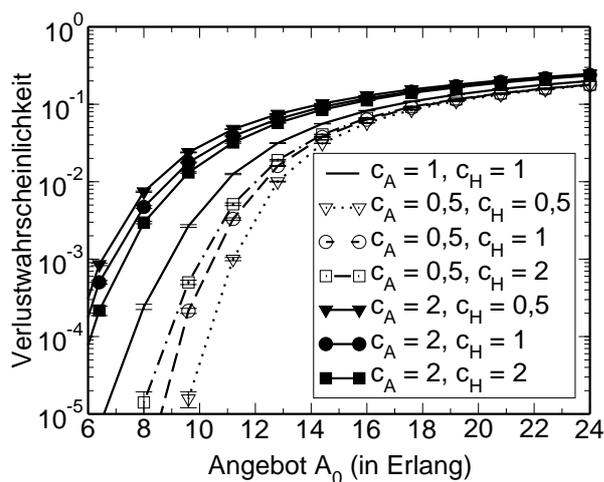
### 6.3.2 Untersuchung der linearen 9-Knoten-Kette

Den Studien dieses Abschnitts liegt die bereits in Abschnitt 6.1 behandelte unidirektionale 9-Knoten-Kette mit jeweils 32 Wellenlängenkanälen pro Link unter Verwendung der dort betrachteten Absuchstrategien zu Grunde. Wie bei Bild 6.1 beschrieben, treten Verkehrsanforderungen jeweils zwischen Nachbarknoten sowie den Endknoten der Kette auf, wobei gilt:  $A_{i,i+1} = A_{1,9} = A_0$  für  $i = 1, 2, \dots, 8$ .

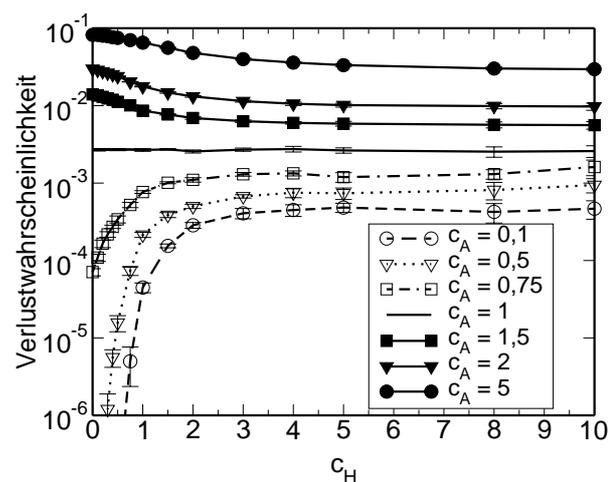
Zuerst wird die Kette mit voller Konversion betrachtet (WI-Fall). Die hierbei auftretenden Effekte können dann nicht von der Absuchstrategie für Wellenlängen oder der Verwendungsstrategie für Konverter herrühren.

Bild 6.79 zeigt die Gesamtverluste über dem Angebot für verschiedene Kombinationen von  $c_A$  und  $c_H$ . Das beim G/G/n-System beobachtete Verhalten tritt auch bei diesem System für den gesamten Lastbereich auf: Für  $c_A > 1$  nehmen die Verluste mit steigenden Werten für  $c_H$  ab. Weitere, hier nicht gezeigte Studien zeigen, dass dieses Verhalten nicht nur für die Gesamtverluste, sondern auch für die jeweiligen Verluste der Knotenpaare mit Distanz 1 bzw. Distanz 8 gelten. Im Vergleich mit Bild 6.8 (Seite 163) zeigt sich außerdem, dass der Einfluss des Verkehrshaltens auf die Gesamtverluste deutlich stärker ist als der Einfluss des Konversionsszenarios.

Für ein festes Angebot von 60% des Planungswertes (entspricht  $A_0 = 9,6$  Erlang) zeigt Bild 6.80 die Gesamtverluste über  $c_H$  mit  $c_A$  als Parameter der Kurven. Das Verhalten des G/G/n-Systems bestätigt sich auch für dieses Szenario:



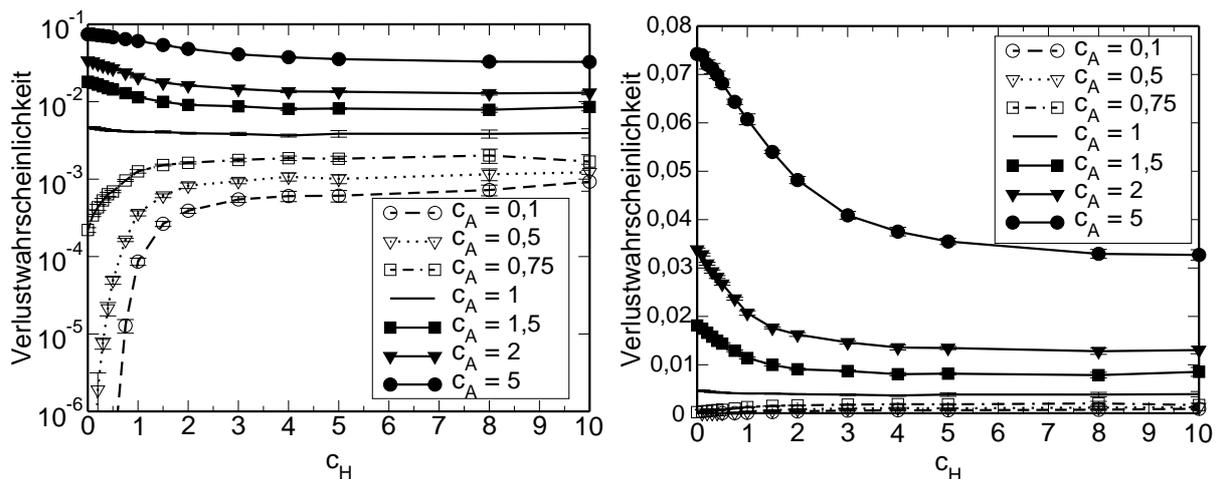
**Bild 6.79:** Gesamtverluste der 9-Knoten-Kette über dem Angebot (WI-Fall)



**Bild 6.80:** Gesamtverluste der 9-Knoten-Kette (WI-Fall) über  $c_H$  für  $A_0 = 9,6$  Erlang (60% vom Planungswert)

- Für ein gegebenes Angebot und einen festen Wert von  $c_H$  ergeben sich mit steigenden Werten von  $c_A$  zunehmende Verluste.
- Für  $c_A > 1$  nehmen die Verluste mit steigenden Werten von  $c_H$  ab.
- Für  $c_A < 1$  nehmen die Verluste mit steigenden Werten von  $c_H$  zu.
- Für große Werte von  $c_H$  verlaufen die Kurven nahezu waagrecht, die Verluste hängen nur noch von  $c_A$  ab.
- Für  $c_A = 1$  (Poisson-Ankünfte) ist kein signifikanter Einfluss von  $c_H$  zu beobachten. Wenn nicht anders erwähnt, wird daher im Folgenden die Kurve für  $c_A = 1$  und  $c_H = 1$  als Vergleichskurve gewählt, die den Verlauf aller Kurven mit  $c_A = 1$  und beliebigem  $c_H$  repräsentiert.

Die folgenden Studien zeigen, wie sich fehlende Konversionsmöglichkeiten und die damit Bedeutung erlangenden Absuchstrategien für Wellenlängenkanäle auswirken. Dazu werden im Bild 6.81 die Ergebnisse für die 9-Knoten-Kette ohne Konverter (WR-Fall) mit der *First-Fit*-Wellenlängenabsuche (FF) betrachtet. Im linken Diagramm wird im Vergleich mit Bild 6.80 deutlich, dass die beobachteten Effekte auch im WR-Fall weitgehend unverändert auftreten. Die einzige nennenswerte Veränderung betrifft den Fall  $c_A = 1$ . Hier sind im Unterschied zu den bisher betrachteten Systemen kleine Veränderungen mit zunehmendem  $c_H$  zu sehen. Das rechte Diagramm verwendet für die gleichen Ergebnisse eine lineare Darstellung, wodurch der mit wachsendem  $c_H$  fallende Verlauf der Verluste für  $c_A > 1$  deutlicher sichtbar wird.



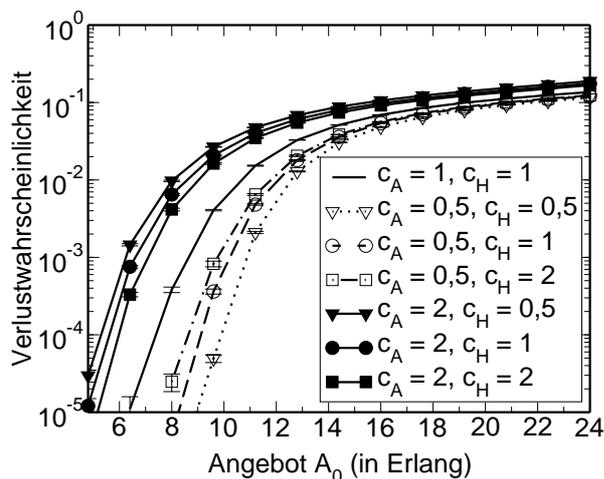
**Bild 6.81:** Verlustwahrscheinlichkeit als Funktion von  $c_H$  bei der 9-Knoten-Kette ohne Konversion mit FF-Absuche und  $A_0 = 9,6$  Erlang in logarithmischer (links) und linearer (rechts) Darstellung

Dass dieses Verhalten für den gesamten Lastbereich gilt, zeigt Bild 6.82 für die 9-Knoten-Kette ohne Konversion mit FF-Wellenlängenabsuche. Auch für große Verkehrsangebote und resultierende Gesamtverluste größer als 10% unterscheiden sich die Kurven für verschiedene Werte von  $c_A$  noch.

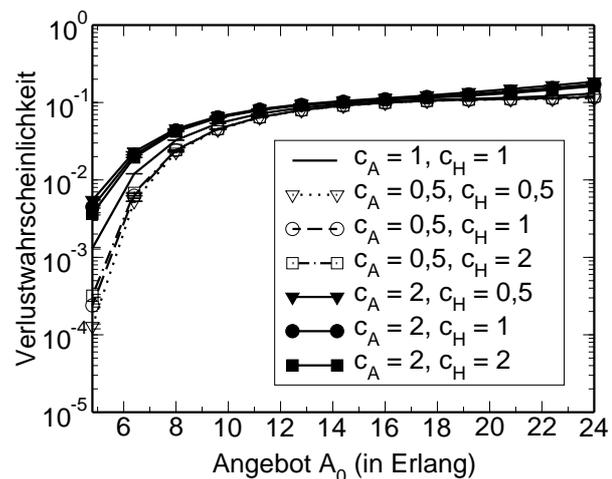
Die Wellenlängen-Absuchstrategie hat großen Einfluss darauf, wie stark sich Veränderungen der Verkehrs-Charakteristik auf das Netzverhalten auswirken. Wie Bild 6.83 zeigt, bleibt bei der zufälligen Wellenlängen-Absuche zwar das Grundverhalten unverändert, die Unterschiede zwischen den jeweiligen Verlustwahrscheinlichkeiten sind – bei insgesamt höheren Verlusten – aber deutlich geringer.

In weiteren, nicht gezeigten Studien bestätigte sich die bisher schon beobachtete große Ähnlichkeit zwischen der FF- und der MU-Absuchstrategie (*Most-Used*). Da bei LU (*Least-Used*) insgesamt sehr hohe Verluste auftreten, wirkt sich für diese Absuchstrategie die Variation der Verkehrsparameter kaum auf die Verlustwahrscheinlichkeiten aus.

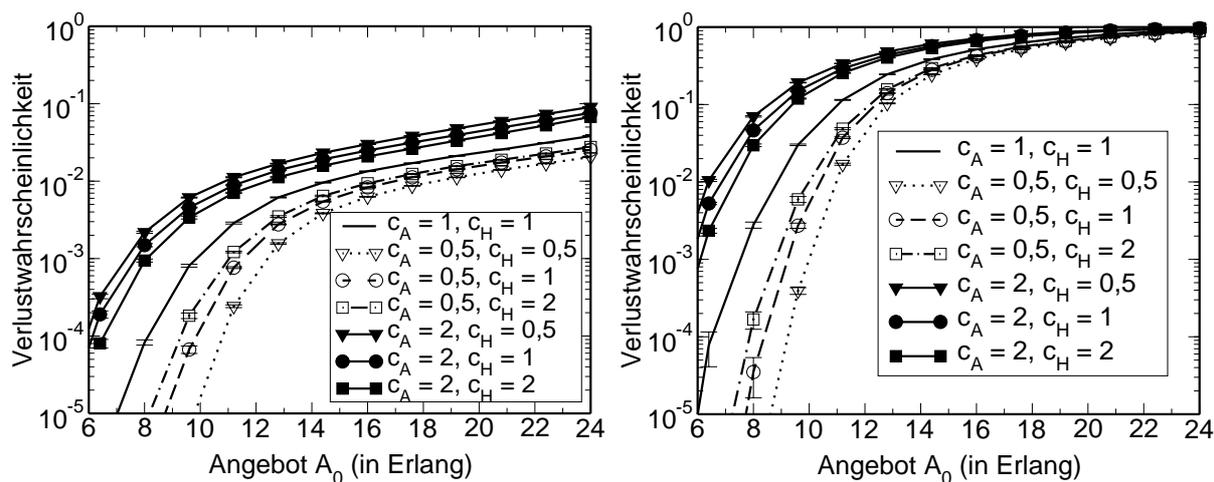
Bild 6.84 zeigt, dass nicht nur die bisher betrachteten Gesamtverluste, sondern auch die distanzabhängigen Verluste das gleiche Verhalten aufweisen. Das linke Diagramm enthält die Verluste für die Distanz 1, das rechte Diagramm für die Distanz 8 bei der 9-Knoten-Kette ohne Konverter mit FF-Wellenlängenabsuche. Auch hier werden die bisherigen Beobachtungen bestätigt.



**Bild 6.82:** 9-Knoten-Kette ohne Konversion (WR-Fall) mit FF-Absuche

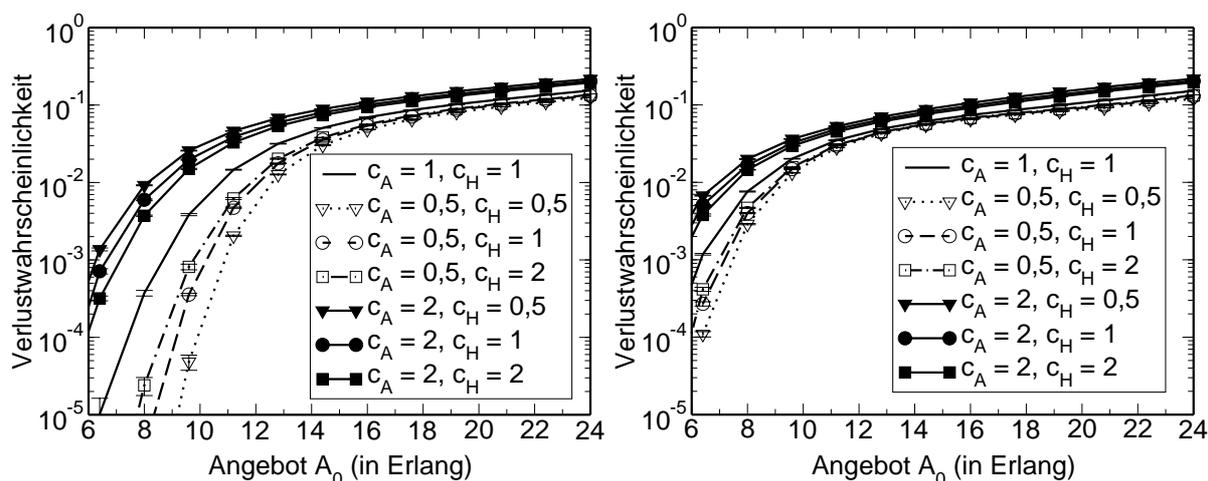


**Bild 6.83:** 9-Knoten-Kette ohne Konversion (WR-Fall) mit zufälliger Absuche (Rand)

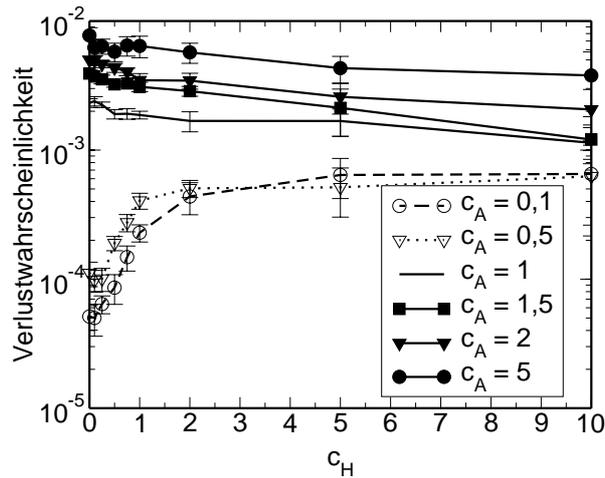


**Bild 6.84:** 9-Knoten-Kette ohne Konversion (WR-Fall) mit FF-Wellenlängenabsuche; distanzabhängige Verluste über dem Angebot für Distanz 1 (links) und Distanz 8 (rechts)

Abschließend belegt Bild 6.85 für die FF-Strategie und für die Rand-Strategie, dass sich die Verläufe der Verlustwahrscheinlichkeiten auch bei partieller Konversion nicht grundsätzlich ändern. Im Vergleich zum WR-Fall ergeben sich dabei für die Rand-Strategie etwas größere Unterschiede zwischen den Kurven. Generell gilt aber, dass der Einfluss der Verkehrsparameter stärker ist als der Einfluss des Konversionsszenarios oder der Wellenlängen-Absuchstrategie bei Poisson-Ankunftsprozessen.



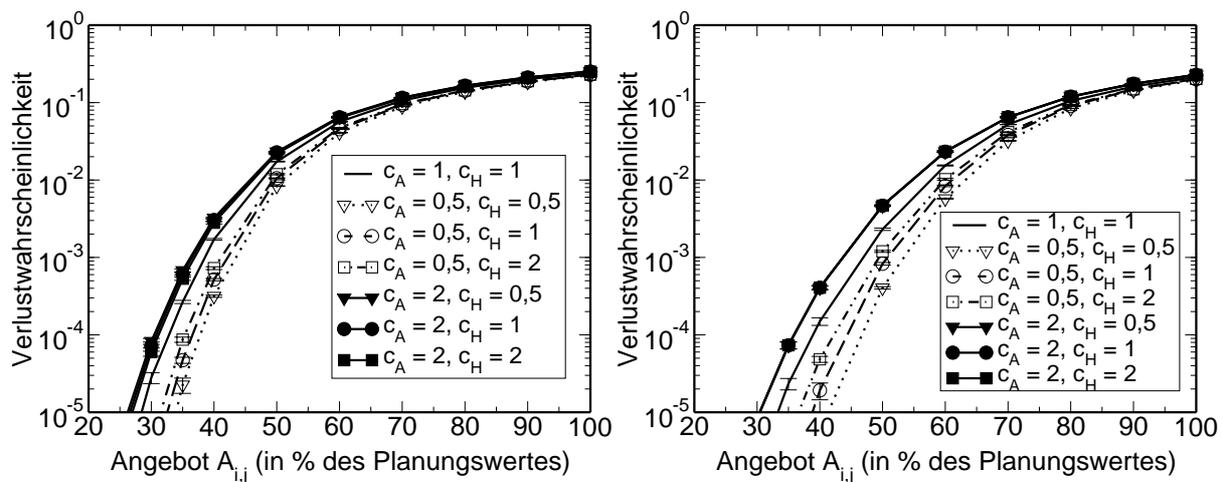
**Bild 6.85:** 9-Knoten-Kette mit 12,5% Konversion (4 Konverter pro Faser) und FF-Absuche (links) bzw. Rand-Absuche (rechts)



**Bild 6.86:** Gesamtverluste des Gitternetzes ohne Konversion (WR-Fall) bei  $A_{i,j} = 50\%$  des Planungswertes und unterschiedlichen Verkehrsparametern (DGR-Strategie)

### 6.3.3 Untersuchung des Gitternetzes

In diesem Abschnitt wird untersucht, welchen Einfluss die Verkehrs-Charakteristika auf die Leistungsfähigkeit von Verkehrslenkungsstrategien in Netzen haben. In Bild 6.86 sind die Ergebnisse für das Gitternetz ohne Konversion mit DGR-Strategie gezeigt. Insgesamt ist das Verhalten sehr ähnlich zum Verhalten der bisher untersuchten einfacheren Systeme G/G/n und lineare Kette, wenn auch die Effekte – insbesondere unter Berücksichtigung der Vertrauensintervalle – weniger deutlich ausgeprägt sind. Ein signifikanter Unterschied tritt für  $c_A = 1$  auf: Im Unterschied zu bisherigen Studien ergibt sich eine stärkere Abnahme der Verluste mit steigendem  $c_H$ .

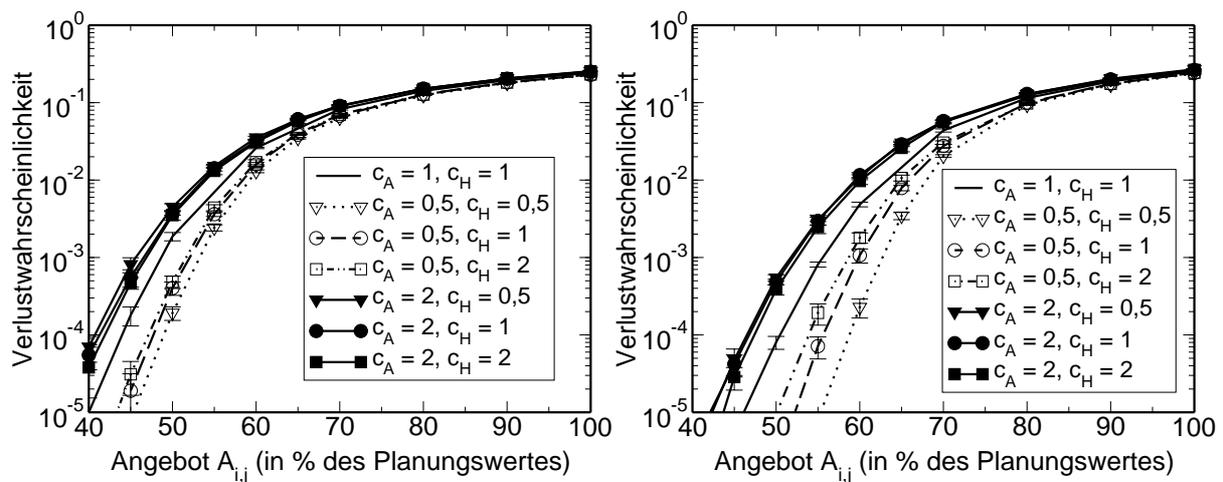


**Bild 6.87:** Gesamtverluste der Strategie AGR-3 beim Gitternetz ohne Konversion (links) und mit voller Konversion (rechts)

Die vorige Studie wurde für einen bestimmten Lastwert durchgeführt. In den Bildern 6.87 und 6.88 werden für das Gitternetz noch die Verlustwahrscheinlichkeiten über dem Angebot für einen größeren Lastbereich dargestellt. Bild 6.87 zeigt die Strategie AGR-3, Bild 6.88 die DGR-Strategie, wobei das linke Diagramm jeweils den WR-Fall und das rechte Diagramm den WI-Fall darstellt.

Es lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Die Unterschiede zwischen den einzelnen Kurven fallen geringer aus, als bei den weiter oben betrachteten einfacheren Systemen  $G/G/n$  und lineare Kette.
- Bei der Strategie AGR-3, insbesondere im WI-Fall, wirkt sich für  $c_A > 1$  eine Veränderung von  $c_H$  kaum aus. Die bisher beobachtete Abnahme der Verluste mit steigendem  $c_H$  ist nicht mehr sichtbar. Allerdings bleibt festzuhalten, dass die intuitiv zu erwartende Zunahme der Verluste ebenfalls nicht auftritt.
- Das Konversionsszenario hat nur einen geringen Einfluss auf die Größe der Unterschiede: Für  $c_A < 1$  sind die Unterschiede im WI-Fall größer, für  $c_A > 1$  im WR-Fall.



**Bild 6.88:** Gesamtverluste der DGR-Strategie beim Gitternetz ohne Konversion (links) und mit voller Konversion (rechts)

## 6.4 Auswirkungen auf die Netzdimensionierung

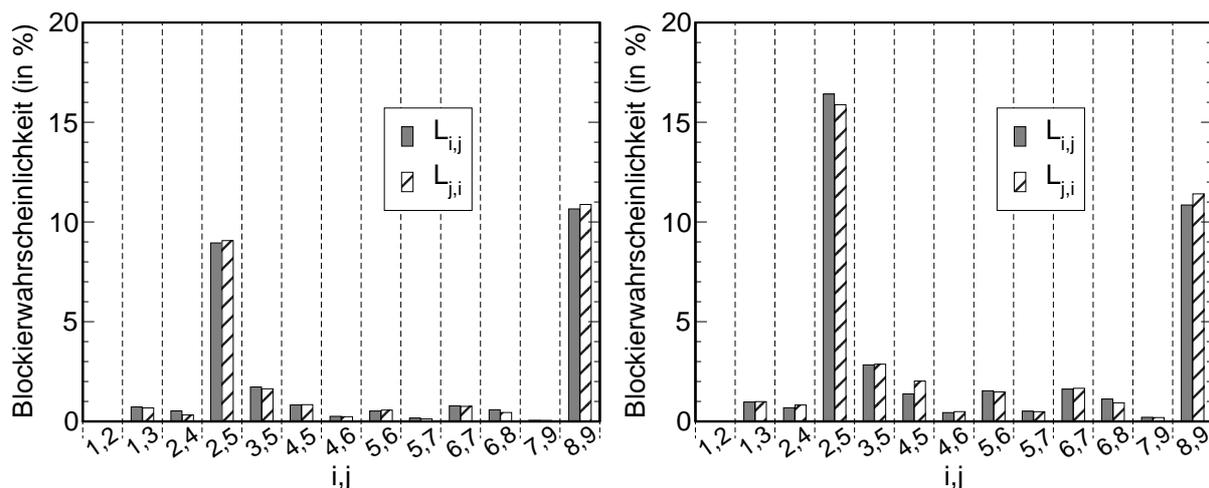
In diesem Abschnitt wird eine Möglichkeit aufgezeigt, wie Ergebnisse der Bewertung von Verkehrslenkungsstrategien für die Verbesserung der Netzdimensionierung und damit als ergänzende Komponente der Netzplanung eingesetzt werden können. Zwei Varianten können unterschieden werden:

- **Einsparung von Netzressourcen.** Die detaillierte Auswertung der Belegung der durch die Netzplanung vorgesehenen Ressourcen im Netz erlaubt es, Einsparungen an einzelnen Ressourcen ohne signifikante Auswirkungen auf das Netzverhalten vorzunehmen. Ein Beispiel ist die Einsparung von Konvertern im Netz. An Hand der in Abschnitt 6.2.6 gezeigten Konverterbelegung (z. B. Bilder 6.68 und 6.69) sowie weiterer Informationen, wie beispielsweise der *maximal* auftretenden Belegung des Konverter-Pools, können solche Knoten identifiziert werden, deren Konverter nur gering ausgelastet sind. Dort hat eine Reduktion der Konverteranzahl für das betrachtete Szenario keine oder nur geringe Auswirkungen.
- **Optimierter Einsatz zusätzlicher Netzressourcen.** Mit Hilfe der Bewertung des dynamischen Verhaltens lassen sich Engpässe in einem geplanten Netz identifizieren, die oft durch Einsatz weniger zusätzlicher Ressourcen (beispielsweise Fasern) beseitigt werden können. Daraus kann eine deutlich verbesserte Leistungsfähigkeit resultieren. Dies soll im Folgenden beispielhaft gezeigt werden.

Die Ausgangssituation im betrachteten Fall sei durch die bisher verwendete, auf der in Abschnitt 5.3 beschriebenen optimierenden Netzplanung für eine statische Verkehrsmatrix basierende Dimensionierung des Deutschlandnetzes gegeben. Bild 6.89 zeigt die *Blockierwahrscheinlichkeit* der einzelnen Links, d. h. den Zeitanteil, in dem die einzelnen Links vollständig belegt sind. Dabei werden für die Trassen jeweils beide Richtungen betrachtet. Die Verbindungsanforderungen sind ebenfalls gerichtet (unidirektional), wobei für die beiden Richtungen eines Knotenpaares derselbe Mittelwert angenommen wird.

Die Bilder zeigen, dass sowohl im WR-Fall (links) als auch im WI-Fall (rechts) jeweils zwei Trassen längere Zeit vollständig belegt sind, während alle anderen Trassen deutlich geringere Blockierwahrscheinlichkeiten aufweisen. Dabei gibt es nur geringe Unterschiede zwischen den beiden möglichen Richtungen. Weiter zeigt sich die im WI-Fall insgesamt höhere Auslastung, die durch die höhere Erfolgswahrscheinlichkeit für größere Distanzen zustande kommt.

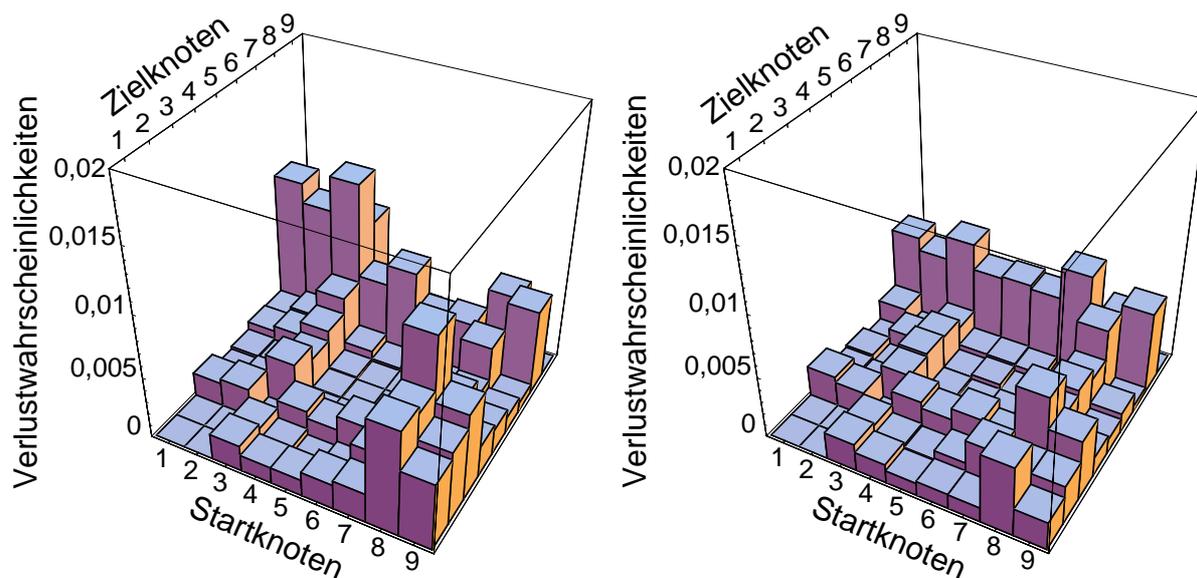
Diese Ergebnisse liefern bereits einen Hinweis dafür, wo ein Einsatz weiterer Ressourcen die größten Vorteile verspricht. Auf Grund der flexiblen und nicht vorhersagbaren Wegführung bei der DGR-Strategie kann aber aus dieser Auslastung nicht immer direkt auf die dadurch verursachten Verluste geschlossen werden. Deshalb werden in Bild 6.90 zusätzlich die Verlust-



**Bild 6.89:** Blockierwahrscheinlichkeiten für die beiden Richtungen der Trasse zwischen den Knoten  $K_i$  und  $K_j$ ; Deutschlandnetz mit DGR-Strategie und Angebot  $A_{i,j} = 80\%$  des Planungswertes (links: WR-Fall, rechts: WI-Fall)

wahrscheinlichkeiten für jedes Knotenpaar im Netz für einen bestimmten Wert des Verkehrsangebotes ( $A_{i,j} = 80\%$ ) betrachtet.

Diese Grafiken zeigen, dass es große Unterschiede bei den Verlusten der einzelnen Knotenpaare gibt. Aus den Erkenntnissen der bisherigen Studien ist bereits zu erwarten, dass mit zunehmender Distanz höhere Verluste für die Knotenpaare auftreten. Die Bilder zeigen aber auch, dass es einzelne Knoten gibt, die unabhängig vom Zielknoten höhere Verluste erfahren. Im Bild 6.90 gilt dies insbesondere für den Knoten  $K_8$ , in abgeschwächter Form aber auch für die Knoten  $K_9$  und  $K_3$ .



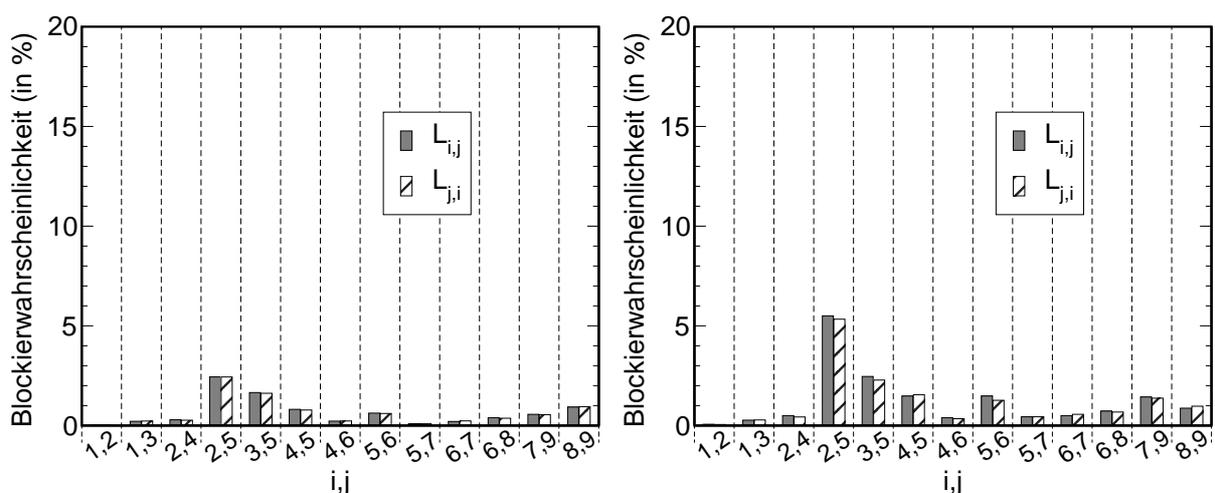
**Bild 6.90:** Verlustwahrscheinlichkeiten für alle Knotenpaare des Deutschlandnetzes bei DGR-Strategie und  $A_{i,j} = 80\%$  des Planungswertes (links: WR-Fall, rechts: WI-Fall)

In diesem Szenario bestätigen die Verluste der einzelnen Knotenpaare die aus den Link-Blockierwahrscheinlichkeiten gewonnenen Erkenntnisse. Darauf aufbauend und unter Beachtung der Topologie des Deutschlandnetzes wurde eine geringfügige Anpassung der Netzdimensionierung bei unveränderter Gesamtanzahl der Fasern wie folgt vorgenommen:

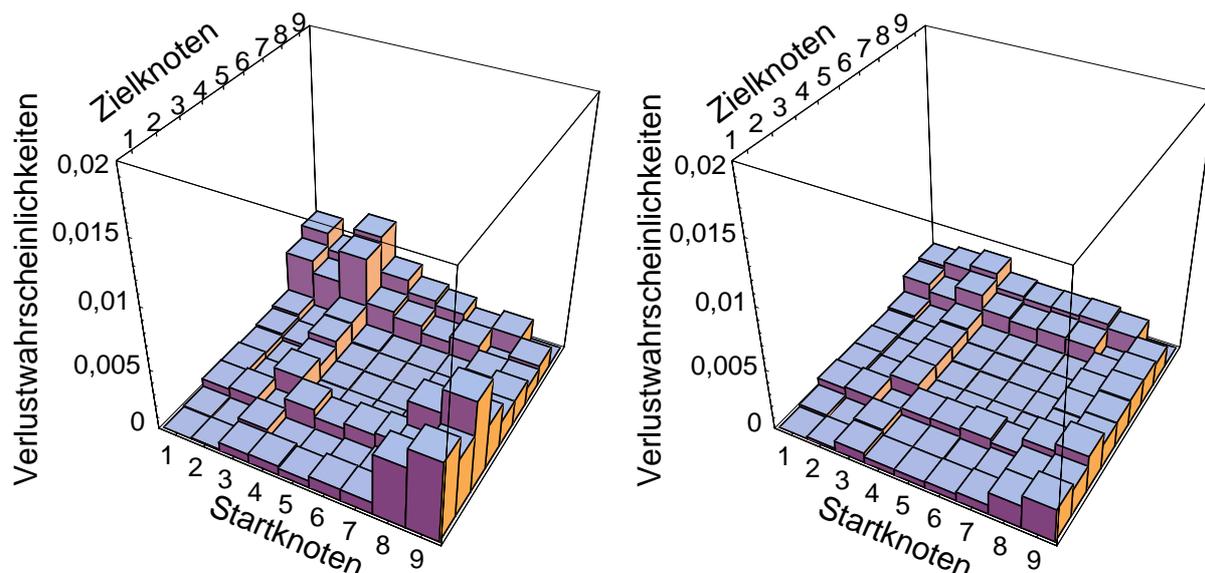
- Auf den Trassen  $K_1 \leftrightarrow K_2$  und  $K_7 \leftrightarrow K_9$  wurde jeweils eine Faser pro Richtung entfernt.
- Auf den Trassen  $K_2 \leftrightarrow K_5$  und  $K_8 \leftrightarrow K_9$  wurde jeweils eine Faser pro Richtung zusätzlich installiert.

Aus Bild 6.91 wird im Vergleich zur ursprünglichen Dimensionierung (Bild 6.89) deutlich, dass für die meisten Trassen die Blockierwahrscheinlichkeiten wesentlich geringer und außerdem gleichmäßiger zwischen den verschiedenen Knotenpaaren verteilt sind. Es gilt weiterhin, dass beide Richtungen etwa die gleichen Blockierwahrscheinlichkeiten haben und für den WI-Fall tendenziell höhere Werte auftreten.

Noch stärkere Auswirkungen zeigen sich bei der Betrachtung der Ende-zu-Ende-Verluste aller Knotenpaare (Bild 6.92). Im Vergleich zur ursprünglichen Dimensionierung (Bild 6.90) ergeben sich deutlich geringere Verluste. Insbesondere im WI-Fall liegen die Verluste aller Knotenpaare auf vergleichbarem, niedrigem Niveau. Nach wie vor treten für die Knoten  $K_3$ ,  $K_8$  und  $K_9$  etwas höhere Verluste auf, so dass in weiteren Optimierungsschritten – möglicherweise auch mit einer geringfügigen Erhöhung der Gesamtanzahl an Fasern – zusätzliche Verbesserungen möglich sind.



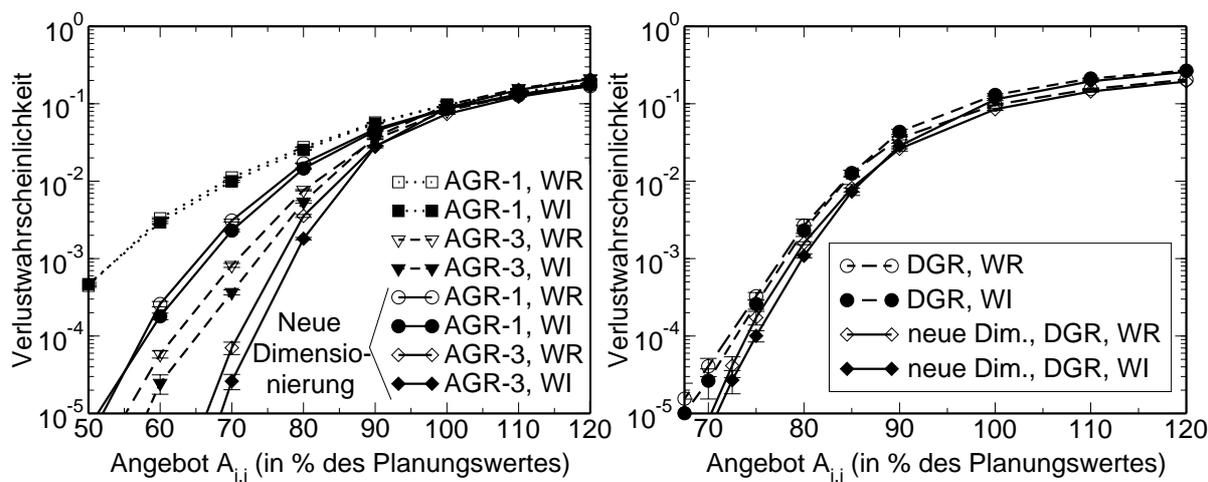
**Bild 6.91:** Blockierwahrscheinlichkeiten für die beiden Richtungen der Trasse zwischen  $K_i$  und  $K_j$ ; Deutschlandnetz mit neuer Dimensionierung und DGR-Strategie bei einem Angebot  $A_{i,j} = 80\%$  des Planungswertes (links: WR-Fall, rechts: WI-Fall)



**Bild 6.92:** Verlustwahrscheinlichkeiten für alle Knotenpaare des Deutschlandnetzes mit neuer Dimensionierung bei DGR-Strategie und  $A_{i,j} = 80\%$  des Planungswertes (links: WR-Fall, rechts: WI-Fall)

Bisher wurden die Auswirkungen der neuen Dimensionierung nur für ein bestimmtes Verkehrsangebot betrachtet. Abschließend sollen deshalb noch die Gesamtverluste über dem Verkehrsangebot für verschiedene Strategien verglichen werden. Bild 6.93 zeigt die Ergebnisse für die alternative Verkehrslenkungsstrategie AGR-x mit einer oder mit drei vorberechneten Wegmöglichkeiten (links) und für die dynamische Strategie DGR (rechts).

Im Bereich geringer und mittlerer Last sind jeweils deutliche Verbesserungen durch die neue Dimensionierung zu erkennen (durchgezogene Linien). Mit steigender Last nehmen die Verbesserungen ab, die neue Dimensionierung führt aber nicht zu höheren Verlusten als die alte



**Bild 6.93:** Vergleich verschiedener Dimensionierungen für das Deutschlandnetz mit der Strategie AGR-x (links) und DGR (rechts)

Dimensionierung. Bei der AGR-Strategie fallen die Verbesserungen wesentlich größer aus als bei der DGR-Strategie. Eine dynamische Pfadsuche kann also in gewissen Grenzen eine nicht optimale Dimensionierung ausgleichen. Weitere, hier nicht dargestellte Studien haben außerdem gezeigt, dass auch die Fairness durch die neue Dimensionierung bei allen Verfahren erhalten oder sogar noch verbessert wird. Die getroffenen Aussagen gelten auch für die anderen, hier nicht gezeigten Verkehrslenkungsstrategien.

Die Studien dieses Abschnitts belegen, dass die Ergebnisse aus der Untersuchung des dynamischen Verhaltens wichtige Verbesserungen einer auf statischen Verbindungsanforderungen basierenden Netzplanung erlauben. Dieses hier manuell durchgeführte Vorgehen zu automatisieren, stellt auf Grund der zahlreichen variablen Problemparameter sowie des großen Rechenzeitbedarfs sowohl der Planung als auch der simulativen Untersuchung des dynamischen Verhaltens eine große Herausforderung dar.

# Kapitel 7

## Zusammenfassung und Ausblick

Motiviert durch die wachsende Bedeutung von optischen Transportnetzen in der Telekommunikation und die aktuell zunehmende Flexibilität in diesen Netzen wurden in dieser Arbeit Verfahren zur Verkehrslenkung und Ressourcen-Belegung in WDM-Netzen mit dynamischem Auf- und Abbau von Wellenlängenkanälen untersucht. Die drei Hauptziele der Arbeit waren dabei der Entwurf einer Strukturierungsmethode zur Beschreibung der zahlreichen Möglichkeiten für Verkehrslenkungsverfahren, die Entwicklung effizienter Verkehrslenkungsstrategien für WDM-Netze und der Nachweis ihrer Leistungsfähigkeit durch eine quantitative Leistungsbewertung, sowie die systematische Untersuchung der zahlreichen Parameter, welche Auswirkungen auf die Güte von Verkehrslenkungsverfahren haben.

Im zweiten Kapitel wurde hierzu zunächst das sich schnell entwickelnde Feld der photonischen Netze beleuchtet und die zu deren Verständnis erforderlichen physikalischen und technologischen Grundlagen bereitgestellt. Im Mittelpunkt standen dabei Komponenten, Systeme und Architekturen von WDM-Netzen.

Das dritte Kapitel führte in die Grundlagen der Netzplanung ein, auf welchen die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Netzdimensionierungen beruhen. Anschließend wurde eine Übersicht zu Verkehrslenkungsverfahren gegeben. Da in der Literatur die Verwendung der Begriffe für die zahlreichen bekannten Verfahren nicht immer eindeutig ist, wurde eine Definition wichtiger Begriffe sowie eine Möglichkeit zur Klassifizierung der Verfahren vorgestellt. Diese Klassifizierung berücksichtigt das verwendete Verkehrslenkungsschema, den Mechanismus zur Wegauswahl, die Realisierung des Verfahrens sowie die dem Verfahren zur Verfügung stehenden Informationen über den Netzzustand.

Darauf aufbauend wurde im vierten Kapitel die Verkehrslenkung in WDM-Netzen detailliert betrachtet, wozu zunächst die Unterschiede zur Verkehrslenkung in elektronisch vermittelnden Netzen ausgearbeitet wurden. Aus funktionaler Sicht treten Unterschiede insbesondere bei eingeschränkter Wellenlängenkonversion auf: Dann wirken sich im Rahmen der Verkehrslenkung

die Absuchstrategie der Wellenlängen und die Strategie zur Verwendung von Konvertern aus. Es wurde eine ausführliche Auswertung und Klassifizierung der bekannten Arbeiten zu WDM-Netzen mit dynamischem Auf- und Abbau von Wellenlängen durchgeführt. Daraus ergab sich, dass einige Aspekte wie beispielsweise die Wechselwirkungen der zahlreichen Parameter, der Einfluss unterschiedlicher Verkehrs-Charakteristika oder die Verkehrslenkung bei partieller Konversion nur unzureichend betrachtet wurden. Die vorliegende Arbeit sollte zur Schließung dieser Lücken beitragen.

Dazu wurde zunächst jeweils ein neues Entwurfsschema für sogenannte globale Strategien – mit einer vollständigen Sicht auf das gesamte Netz – und für abschnittsweise Strategien – bei denen den Knoten nur lokale Informationen zur Verfügung stehen – vorgestellt. Basierend auf diesen Schemata wurden dann mehrere Verfahren mit unterschiedlicher Kombination der Strategie-Elemente entworfen. Sowohl die für die quantitative Bewertung dieser Verfahren erforderliche Modellierung als auch die Festlegung der Szenarien wurden im fünften Kapitel durchgeführt.

Die Leistungsbewertung der Verfahren, basierend auf der Methode der ereignisgesteuerten Simulation, erfolgte im sechsten Kapitel. Zunächst wurden an linearen Ketten wesentliche in WDM-Netzen auftretende Effekte aufgezeigt (Abschnitt 6.1). Dabei konnte gezeigt werden, dass die Auswirkungen der Wellenlängenkonversion stark vom jeweiligen Szenario abhängen: Konverter können die Verluste bei geringer Netzlast senken, während bei hoher Last durch Konverter meist sogar eine Erhöhung der Verluste erfolgt. Die Konversionsfähigkeit wirkt sich auch auf die distanzabhängigen Verluste aus: Es konnte gezeigt werden, dass insbesondere Verbindungen über größere Entfernungen von Konvertern profitieren. Zur weiteren Verbesserung der Fairness zwischen Verbindungen unterschiedlicher Distanz wurden einige Mechanismen basierend auf der Reservierung von Ressourcen vorgestellt. Aufbauend auf dem Vergleich der Absuchstrategien für Wellenlängen in diesem Abschnitt wurde die sequentielle Absuche beginnend an einem festen Ausgangspunkt als Absuchstrategie für alle nachfolgenden Untersuchungen gewählt.

Bei den im Abschnitt 6.2 betrachteten komplexeren Netzen lag der Schwerpunkt auf den möglichen Bestandteilen von Verkehrslenkungsverfahren. Die Ergebnisse aus der Untersuchung linearer Ketten, insbesondere hinsichtlich der Auswirkungen der Wellenlängenkonversion auf die Gesamtverluste und auf die Fairness, konnten bestätigt werden. Zudem zeigte sich, dass eine leistungsfähige Verkehrslenkungsstrategie für dynamische WDM-Netze mehrere Komponenten umfassen sollte: Die Menge der erlaubten Wege muss ausreichend groß sein, eine vom Zustand des Netzes abhängige Begrenzung des Ressourcen-Bedarfs ist erforderlich, um ein stabiles Verhalten bei hoher Last bei gleichzeitiger Vermeidung unnötiger Verluste bei geringer Last zu erreichen, die Strategie zur Verwendung von Konvertern muss an das jeweilige Netz-

szenario angepasst sein, und es sind spezielle Mechanismen erforderlich, falls eine möglichst gleichwertige Behandlung von Verbindungen über unterschiedliche Distanzen gewünscht wird.

Der Vergleich zwischen globalen und abschnittswisen Strategien hat gezeigt, dass durch die bei den globalen Strategien angenommene Kenntnis des gesamten Netzzustandes eine deutlich höhere Leistungsfähigkeit erreicht werden kann. Schließlich wurde aus den Untersuchungen dieses Abschnitts auch deutlich, dass die optimale Wahl der Parameter einer Verkehrslenkungsstrategie eine schwierige, aber entscheidend wichtige Aufgabe ist, da eine ungünstige Parametrisierung selbst bei prinzipiell sehr leistungsfähigen Verfahren zu schlechten Ergebnissen führen kann.

Über das künftige Verkehrsverhalten in dynamischen optischen Transportnetzen können momentan noch keine verlässlichen Aussagen gemacht werden. Deshalb sind Untersuchungen erforderlich, welche die möglichen Auswirkungen eines breiten Spektrums von Verkehrs-Charakteristika bereits heute zu bewerten erlauben. In der vorliegenden Arbeit wurde ein entsprechendes Verkehrsmodell vorgestellt, und die zugehörigen quantitativen Studien wurden in Abschnitt 6.3 diskutiert. Dabei wurden vom sogenannten Poisson-Verkehr abweichende Ankunftsprozesse und Haltedauern der Verbindungen betrachtet. Unabhängig von der Auslastung und vom Konversionsgrad wurde beobachtet, dass mit steigendem Variationskoeffizient der Haltedauern die Verluste für Variationskoeffizienten des Ankunftsprozesses  $c_A < 1$  zu- und für  $c_A > 1$  abnehmen. Diese Auswirkungen der Verkehrsparameter, die bisher in der Literatur nur teilweise und für einfache Einzelknoten-Modelle ausführlicher untersucht wurden, traten bei allen betrachteten Szenarien – wenn auch in unterschiedlicher Stärke – auf.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit wurden durch die Betrachtung einer möglichen Rückkopplung zwischen Netzplanung und simulativer Leistungsbewertung abgeschlossen (Abschnitt 6.4). Es wurde gezeigt, wie die Auswertung des dynamischen Netzverhaltens einerseits die Identifikation von wenig genutzten Ressourcen erlaubt, andererseits zur Lokalisierung von Engpässen im Netz beitragen kann, an denen durch gezielten Einsatz weniger zusätzlicher Ressourcen eine starke Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Netzes erreicht werden kann. Bei WDM-Netzen kann dadurch insbesondere der Einsatz der teuren Wellenlängenkonverter und Übertragungssysteme optimiert werden.

Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Modellierung von WDM-Netzen beruht auf einigen Annahmen, die aus dem heutigen Stand der Technik und der absehbaren Evolution der Transportnetze abgeleitet sind. Diese Annahmen müssen im Licht der zu erwartenden technischen Weiterentwicklung überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Entsprechendes gilt für das künftige Verkehrsverhalten: Mit zunehmender Verfügbarkeit realer Systeme und der Einführung von flexiblen Elementen in optischen Netzen – sowie der damit zu erwartenden Realisierung neuer Dienste – werden auch Messungen über die dynamischen Vorgänge in diesen Netzen möglich. Diese sind Voraussetzung für verbesserte Verkehrsmodelle.

Für die in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren sind ebenfalls Weiterentwicklungen denkbar. So wurde jeder Verbindungsanforderung jeweils ein Wellenlängenkanal zugeordnet. Durch entsprechende Erweiterungen der Verfahren könnten auch Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen oder Schutzanforderungen für die Verbindungen betrachtet werden.

Zusätzliche Fairness-Mechanismen stellen eine andere Erweiterungsmöglichkeit dar. Interessante neue Aspekte treten insbesondere dann auf, wenn die Verbindungen nicht – wie in dieser Arbeit angenommen – gleichberechtigt sind, sondern unterschiedliche Wertigkeiten, beispielsweise für den Gewinn des Netzbetreibers, besitzen. Dadurch ergibt sich für eine Verkehrslenkungsstrategie ein neues Optimierungsziel in Form einer Maximierung des Gewinns.

Weitere Untersuchungsmöglichkeiten erschließt auch die Betrachtung einer verteilten Steuer-ebene unter Verwendung von IP-basierten Protokollen. Entsprechende Verfahren sind hinsichtlich der ihnen zur Verfügung stehenden Information über den Netzzustand zwischen den in dieser Arbeit betrachteten globalen und abschnittswisen Verfahren einzuordnen. Insbesondere auf die zur Zeit stark diskutierte GMPLS-basierten (*generalized multi-protocol label switching*) optischen Transportnetze lassen sich sowohl die Methodik als auch die Erkenntnisse dieser Arbeit weitgehend übertragen. Solche GMPLS-basierten Netze können als die nächste Entwicklungsstufe hin zu Transportnetzen mit *optical burst switching* (OBS) und längerfristig auch *optical packet switching* (OPS) gesehen werden. Die hier entwickelten Verfahren und Werkzeuge für die Untersuchung von OBS- bzw. OPS-Netzen geeignet zu erweitern, beinhaltet ebenfalls interessante Forschungsaspekte.

Schließlich wurden in dieser Arbeit bereits Möglichkeiten für die Automatisierung von bisher weitgehend manuell gelösten Aufgaben aufgezeigt. Hierzu zählt die Kombination von der auf statischen Verbindungsanforderungen basierenden Netzplanung und von Untersuchungen des dynamischen Netzverhaltens. Ein weiteres interessantes Feld für automatisierte Abläufe stellt die optimale Wahl von Parametern für ein Verkehrslenkungsverfahren dar. Insbesondere Lösungen hierfür zu finden, die eine ausreichend schnelle Anpassung der Parameter für die zeitlichen Anforderungen des laufenden Betriebs künftiger hochdynamischer Netze liefern, stellt eine große Herausforderung dar.

# Literaturverzeichnis

- [1] *Photonic Network Communications*, Kluwer Academic Publishers, Bd. 1, 1999.
- [2] *Optical Networks Magazine*, SPIE & Baltzer Science Publishers, Bd. 1, 2000.
- [3] „High-capacity optical transport networks“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 16, Nr. 7, September 1998.
- [4] „Optical Networks“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 14, Nr. 5, Juni 1996.
- [5] „Optical networks, communication systems, and devices“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 37, Nr. 2, Februar 1999.
- [6] „Special issue on broadband optical networks“, *IEEE Journal on Lightwave Technology*, Bd. 11, Nr. 5/6, Mai 1993.
- [7] „Survivable Communication Networks“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 37, Nr. 8, August 1999.
- [8] A. Adas, „Traffic models in broadband networks“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 35, Nr. 7, S. 82 – 89, Juli 1997.
- [9] Agilent Technologies, „Neue Technik für optische Schaltmatrizen“, *Funkschau*, Nr. 8, S. 14, März 2000.
- [10] N. Ahmadvand, T. D. Todd, „Dual-hop LANs using a wavelength routing cross connect“, *Computer Networks and ISDN Systems*, Bd. 29, Nr. 16, S. 1901 – 1917, Dezember 1997.
- [11] T. Almeida, R. Ayre, E. J. Bachus, P. Demeester, B. Hein, M. N. Huber, A. Jukan, R. Marsdan, W. Müllner, M. Rasztovits-Wiech, C. Schulien, B. H. Verbeek, „PHOTON - A progressive step towards optical transport networks in Europe“, *Proceedings of the European Conference on Networks & Optical Communications 1996 (NOC '96)*, Bd. 1, S. 174 – 181, Juni 1996.

- [12] V. Anand, T. Katarki, C. Qiao, „Profitable connection assignment in all optical WDM networks“, *Proceedings of the Optical Networks Workshop*, Richardson, USA, Januar 2000.
- [13] J. Anderson, J. S. Manchester, A. Rodriguez-Moral, M. Veeraraghavan, „Protocols and architectures for IP optical networking“, *Bell Labs Technical Journal*, Bd. 4, Nr. 1, S. 105 – 124, Januar 1999.
- [14] G. Apostolopoulos, R. Guerin, S. Kamat, S. K. Tripathi, „Quality of service based routing: a performance perspective“, *Computer Communications Review*, Bd. 28, Nr. 4, S. 17 – 28, Oktober 1998.
- [15] G. Apostolopoulos, R. Guerin, S. Kamat, S.; A. Orda, S. K. Tripathi, „Intradomain QoS routing in IP networks: a feasibility and cost/benefit analysis“, *IEEE Network*, Bd. 13, Nr. 5, S. 42 – 55, September 1999.
- [16] G. R. Ash, *Dynamic routing in telecommunications networks*, McGraw-Hill Telecommunications, New York, USA, 1998, ISBN 0-07-006414-8.
- [17] ATM Forum, *Private Network-Network Interface Specification Version 1.0 (PNNI 1.0)*, af-pnni-0055.000, ATM Forum, März 1996.
- [18] P. Aukia, M. Kodialam, P. V. N. Koppol, T. V. Lakshman, H. Sarin, B. Suter, „RATES: A server for MPLS traffic engineering“, *IEEE Network*, Bd. 14, Nr. 2, S. 34 – 41, März/April 2000.
- [19] A. Autenrieth, A. Kirstädter, „Fault tolerance and resilience issues in IP-based networks“, *Proceedings of the Second International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN 2000)*, S. 284 – 290, April 2000.
- [20] D. O. Awduche, „MPLS and traffic engineering in IP networks“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 37, Nr. 12, S. 42 – 47, Dezember 1999.
- [21] D. O. Awduche, Y. Rekhter, „Multiprotocol lambda switching: combining MPLS traffic engineering control with optical crossconnects“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 39, Nr. 3, S. 111 – 116, März 2001.
- [22] B. Awerbuch, Y. Du, B. Khan, Y. Shavitt, „Routing through networks with hierarchical topology aggregation“, *Journal of High Speed Networks*, Bd. 7, Nr. 1, S. 57 – 73, 1998.
- [23] S. Bahk, M. El Zarki, „A dynamic multi-path routing algorithm for ATM networks“, *Journal of High Speed Networks*, Bd. 1, Nr. 1, S. 215 – 236, 1992.

- 
- [24] K. Bala, E. Bouillet, G. Ellinas, „Benefits of “minimal” wavelength interchange in WDM rings“, *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference and Exhibition (OFC) '97*, S. 120 – 121, Februar 1997.
- [25] K. Bala, T. E. Stern, K. Bala, „A minimum interference routing algorithm for a linear lightwave network“, *Proceedings of the GLOBECOM 1991*, S. 1264 – 1269, Dezember 1991.
- [26] K. Bala, T. E. Stern, D. Simchi-Levi, K. Bala, „Routing in a linear lightwave network“, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Bd. 3, Nr. 4, S. 459 – 469, August 1995.
- [27] A. Banerjee, J. Drake, J. P. Lang, B. Turner, K. Kompella, Y. Rekhter, „Generalized mutliprotocol label swichting: an overview of routing and management enhancements“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 39, Nr. 1, S. 144 – 150, Januar 2001.
- [28] S. Banerjee, C. Chen, „Design of wavelength-routed optical networks for circuit switched traffic“, *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '96)*, S. 306 – 310, November 1996.
- [29] S. Banerjee, V. Jain, S. Shah, „Regular multihop logical topologies for lightwave networks“, *IEEE Communications Surveys*, <http://www.comsoc.org/pubs/surveys>, First Quarter 1999.
- [30] S. Banerjee, B. Mukherjee, „Algorithms for optimized node arrangements in ShuffleNet based multihop lightwave networks“, *Journal of High Speed Networks*, Bd. 4, Nr. 4, S. 361 – 383, 1995.
- [31] R. A. Barry, P. A. Humblet, „Models of blocking probability in all-optical networks with and without wavelength changers“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 14, Nr. 5, S. 858 – 867, Juni 1996.
- [32] P. Batchelor, B. van Caenegem, P. Leuthold, J. Späth, et al., *Ultra high capacity optical transmission networks, Final Report of Action COST 239*, Zagreb, Kroatien, 1999, ISBN 953-184-013-X.
- [33] M. Berger, M. Chbat, A. Jourdan, M. Sotom, P. Demeester, B. Van Caenegem, et al., „Pan-european optical networking using wavelength division multiplexing“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 35, Nr. 4, S. 82 – 88, April 1997.
- [34] F. Bernabei, V. De Simone, L. Gratta, M. Listanti, „Shuffle vs. Kautz/De Bruijn logical topologies for multihop networks: a throughput comparison“, *Proceedings of the International IFIP-IEEE Conference on Broadband Communications '96*, S. 271 – 282, April 1996.

- [35] G. M. Bernstein, J. Yates, D. Saha, „IP-centric control and management of optical transport networks“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 38, Nr. 10, S. 161 – 167, Oktober 2000.
- [36] L. Berthelon, G. Eilenberger, O. Chambon, L. Dembeck, M. Garnot, C. Drion, „Network element and network level parameters for the management of optical networks“, *Proceedings of the 24th European Conference on Optical Communication (ECOC '98)*, Bd. 1, S. 491 – 492, September 1998.
- [37] D. Bertsekas, R. Gallager, *Data networks*, Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, USA, 2. Auflage, 1992, ISBN 0-13-200916-1.
- [38] R. Bhandari, „Shortest pair of physically-disjoint paths in telecommunication fiber networks“, *Proceedings of the Sixth International Network Planning Symposium (Networks '94)*, S. 125 – 130, September 1994.
- [39] A. Birman, „Computing approximate blocking probabilities for a class of all-optical networks“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 14, Nr. 5, S. 852 – 857, Juni 1996.
- [40] A. Birman, A. Kershenbaum, „Routing and wavelength assignment methods in single-hop all-optical networks with blocking“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM '95*, S. 431 – 438, April 1995.
- [41] M. Bischoff, „Betrieb und Wartung photonischer Netze“, *NTZ*, Bd. 49, Nr. 9, S. 10 – 19, September 1996.
- [42] M. Bischoff, M. N. Huber, O. Jahreis, F. Derr, „Operation and maintenance for an all-optical transport network“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 34, Nr. 11, S. 136 – 142, November 1996.
- [43] D. Bishop, R. Giles, C. Roxlo, „Micromirrors relieve communications bottlenecks“, *Photonics Spectra*, Bd. 34, Nr. 3, S. 167 – 169, März 2000.
- [44] L. Boivin, M. Wegmuller, M. C. Nuss, W. H. Knox, Y. Sun, A. K. Srivastava, J. W. Sulhoff, C. Wolf, „Transmission over 360 km of 110 channels at 2.35 Gb/s from a spectrum-sliced modelocked laser“, *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC / IOOC '99)*, Bd. 4 (Thursday), S. 218 – 220, Februar 1999.
- [45] G. Bonaventura, P. Di Vita, A. Manzalini, „ITU-T activities on optical networking“, *Proceedings of the 8th International Telecommunication Networks Planning Symposium (Networks '98)*, S. 269 – 274, Oktober 1998.
- [46] P. Bonenfant, A. Rodriguez-Moral, „Optical data networking“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 38, Nr. 3, S. 63 – 70, März 2000.

- 
- [47] M. S. Borella, J. P. Jue, D. Banerjee, B. Ramamurthy, B. Mukherjee, „Optical components for WDM lightwave networks“, *Proceedings of the IEEE*, Bd. 85, Nr. 8, S. 1274 – 1307, August 1997.
- [48] D. Campi, C. Coriasso, „Wavelength conversion technologies“, *Photonic Network Communications*, Bd. 2, Nr. 1, S. 85 – 95, Januar 2000.
- [49] S. Chamberland, O. Marcotte, B. Sansó, „On the joint topological, dimensioning and location problem for broadband networks“, *Proceedings of the 3rd International IFIP-IEEE Conference on Broadband Communications (BC '96)*, S. 525 – 536, April 1996.
- [50] C. W. Chao, P. M. Dollard, J. E. Weythman, L. T. Nguyen, H. Eslambolchi, „FASTAR - A robust system for fast DS3 restoration“, *Proceedings of the IEEE GLOBECOM 1991*, S. 1396 – 1400, Dezember 1991.
- [51] J. Charzinski, „Good news about heavy tails“, *Proceedings of the IEEE Conference 2000 on High Performance Switching and Routing*, S. 535 – 542, Juni 2000.
- [52] H. M. Chaskar, S. Verma, R. Ravikanth, „A framework to support IP over WDM using optical burst switching“, *Proceedings of the Optical Networks Workshop*, Richardson, USA, Januar 2000.
- [53] M. W. Chbat, E. Grard, L. Berthelon, A. Jourdan, P. A. Perrier, A. Leclert, B. Landousies, A. Ramdane, N. Parnis, et al., „Toward wide-scale all-optical transparent networking: The ACTS Optical Pan-European Network (OPEN) Project“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 16, Nr. 7, S. 1226 – 1244, September 1998.
- [54] C. Chen, S. Banerjee, „A new model for optimal routing in all-optical networks with scalable number of wavelength converters“, *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM '95*, S. 993 – 997, November 1995.
- [55] C. Chen, S. Banerjee, „A new model for optimal routing and wavelength assignment in wavelength division multiplexed optical networks“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM '96*, Bd. 1, S. 164 – 171, März 1996.
- [56] S. Chen, K. Nahrstedt, „An overview of quality of service routing for next-generation high-speed networks: problems and solutions“, *IEEE Network*, Bd. 12, Nr. 6, S. 64 – 79, November 1998.
- [57] S. T. Cheng, „Backtrack routing and priority-based wavelength assignment in WDM networks“, *Computer Communications*, Bd. 22, Nr. 1, S. 1 – 10, Januar 1999.
- [58] P. Chidgey, „Multi-wavelength transport networks“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 32, Nr. 12, S. 28 – 35, Dezember 1994.

- [59] I. Chlamtac, A. Farago, T. Zhang, „Lightpath (wavelength) routing in large WDM networks“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 14, Nr. 5, S. 909 – 913, Juni 1996.
- [60] I. Chlamtac, A. Ganz, G. Karmi, „Lightpath communications: an approach to high bandwidth optical WANs“, *IEEE Transactions on Communications*, Bd. 40, Nr. 7, S. 1171 – 1182, Juli 1992.
- [61] A. R. Chraplyvy, „High-capacity lightwave transmission experiments“, *Bell Labs Technical Journal*, Bd. 4, Nr. 1, S. 230 – 245, Januar 1999.
- [62] E. Ciaramella, „Bundling wavelengths in optical transport networks“, *Proceedings of the 26th European Conference on Optical Communication (ECOC 2000)*, Bd. 3, S. 235 – 236, September 2000.
- [63] D. Comer, *Internetworking with TCP/IP (Volume I): Principles, protocols, and architectures*, Prentice Hall, Upper Saddle River, USA, 4. Auflage, 2000, ISBN 0-13-018380-6.
- [64] A. Copley, „Optical domain service interconnect (ODSI): defining mechanisms for enabling on-demand high-speed capacity from the optical domain“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 38, Nr. 10, S. 168 – 174, Oktober 2000.
- [65] D. Cotter, „Optical digital transmission, regeneration and networks“, *Proceedings of the 24th European Conference on Optical Communication (ECOC '98)*, Bd. 1, S. 643 – 644, September 1998.
- [66] P. Demeester, M. Gryseels, A. Autenrieth, C. Brianza, et al., „Resilience in multilayer networks“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 37, Nr. 8, S. 70 – 76, August 1999.
- [67] J. Diao, P. L. Chu, „An analytical study of WDM based all-optical networks with light-path reservation“, *Proceedings of the SPIE Conference on All-Optical Networking 1999: Architecture, Control, and Management Issues*, Bd. 3843, S. 218 – 225, September 1999.
- [68] M. Dipper, *Entwurf und Implementierung von Verfahren zur Planung von photonischen Transportnetzen*, Studienarbeit Nr. 1468, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1997.
- [69] K. Dolzer, C. Gauger, J. Späth, S. Bodamer, „Evaluation of reservation mechanisms for optical burst switching“, *AEÜ International Journal of Electronics and Communications*, Bd. 55, Nr. 1, Januar 2001.

- 
- [70] B. T. Doshi, S. Dravida, P. Harshavardhana, O. Hauser, Y. Wang, „Optical network design and restoration“, *Bell Labs Technical Journal*, Bd. 4, Nr. 1, S. 58 – 84, Januar 1999.
- [71] R. D. Doverspike, S. J. Phillips, J. R. Westbrook, „Transport network architectures in an IP world“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2000*, März 2000.
- [72] R. D. Doverspike, J. Yates, „Challenges for MPLS in optical network restoration“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 39, Nr. 2, S. 89 – 96, Februar 2001.
- [73] D. A. Dunn, W. D. Grover, M. H. MacGregor, „Comparison of k-shortest paths and maximum flow routing for network facility restoration“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 12, Nr. 1, S. 88 – 99, Januar 1994.
- [74] B. Edmaier, *Pfad-Ersatzschaltverfahren mit verteilter Steuerung für ATM-Netze*, Dissertation, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, TU München, 1996.
- [75] C. A. Eldering, M. L. Sylla, J. A. Eisenach, „Is there a Moore's law for bandwidth?“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 37, Nr. 10, S. 117 – 121, Oktober 1999.
- [76] J. Elmirghani, H. Mouftah, „Technologies and architectures for scalable dynamic dense WDM networks“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 38, Nr. 2, S. 58 – 66, Februar 2000.
- [77] B. Fabianek, K. Fitchew, S. Myken, A. Houghton, „Optical network research and development in European Community programs: from RACE to ACTS“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 35, Nr. 4, S. 50 – 56, April 1997.
- [78] A. Feldmann, A. Greenberg, C. Lund, N. Reingold, J. Rexford, NetScope: „Traffic engineering for IP networks“, *IEEE Network*, Bd. 14, Nr. 2, S. 11 – 19, März/April 2000.
- [79] A. Feldmann, W. Whitt, „Fitting mixtures of exponentials to long-tail distributions to analyze network performance models“, *Performance Evaluation*, Bd. 31, S. 245 – 279, 1998.
- [80] P. Ferguson, G. Huston, *Quality of service : delivering QoS on the Internet and in corporate networks*, John Wiley & Sons, USA, 1998, ISBN 0-471-24358-2.
- [81] N. J. Frigo, „Local access optical networks“, *IEEE Network*, Bd. 10, Nr. 6, S. 32 – 36, November 1996.
- [82] J. Frings, T. Bauschert, „Integrated planning of broadband networks: a basic framework“, *Proceedings of the First International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN '98)*, Nr. IL3, Mai 1998.

- [83] C. A. Funka-Lea, C. L. Janczewski, W. C. Lau, R. Nagarajan, Y. T. Wang, Z. L. Xin, „QoS routing and performance in packet networks: a visual simulation platform and case study“, *Bell Labs Technical Journal*, Bd. 3, Nr. 4, S. 240 – 254, Oktober 1998.
- [84] M. Gagnaire, „An overview of broad-band access technologies“, *Proceedings of the IEEE*, Bd. 85, Nr. 12, S. 1958 – 1972, Dezember 1997.
- [85] P. Gambini, „Use of wavelengths in optical networks“, *CSELT Technical Reports*, Bd. 24, Nr. 3, S. 519 – 534, Juni 1996.
- [86] A. Garavaglia, M. Trubian, A. Pattavina, L. Castagna, G. Signorelli, „Algorithms for planning SDH/WDM transport networks“, *Proceedings of the European Conference on Networks and Optical Communications 1999 (NOC '99), Part 2: Core networks and network management*, Bd. 2, S. 33 – 40, Juni 1999.
- [87] M. Garey, D. Johnson, *Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness*, Freeman and Company, New York, USA, 1979, ISBN: 0-7167-1044-7.
- [88] L. D. Garrett, R. M. Derosier, A. H. Gnauck, A. R. McCormick, R. W. Tkach, R. S. Vodhanel, J.-C. Chiao, J. Gamelin, et al., „The MONET New Jersey network demonstration“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 16, Nr. 7, S. 1199 – 1219, September 1998.
- [89] D. Garthe, C. Epple, B. Edmaier, „Dense wavelength-division multiplexing and optical networking“, *British Telecommunications Engineering*, Bd. 18, Nr. 3, S. 119 – 124, Oktober 1999.
- [90] O. Gerstel, P. Lin, G. Sasaki, „Combined WDM and SONET network design“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM '99*, S. 734 – 743, März 1999.
- [91] O. Gerstel, R. Ramaswami, „Optical layer survivability: a services perspective“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 38, Nr. 3, S. 104 – 113, März 2000.
- [92] O. Gerstel, G. Sasaki, S. Kutten, R. Ramaswami, „Worst-case analysis of dynamic wavelength allocation in optical networks“, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Bd. 7, Nr. 6, S. 833 – 845, Dezember 1999.
- [93] N. Ghani, „Lambda-labelling: a framework for IP-over-WDM using MPLS“, *Optical Networks Magazine*, Bd. 1, Nr. 2, S. 45 – 58, April 2000.
- [94] N. Ghani, S. Dixit, T.-S. Wang, „On IP-over-WDM integration“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 38, Nr. 3, S. 72 – 84, März 2000.
- [95] A. Girard, *Routing and dimensioning in circuit-switched networks*, Addison-Wesley, Reading, USA, 1990, ISBN 0-201-12792.

- 
- [96] C. Glingener, „Datenübertragung im Terabit/s-Bereich – vom Labor in die Praxis“, *ntz*, Nr. 5/2000, S. 58 – 59, 2000.
- [97] E. L. Goldstein, L. Y. Lin, R. W. Tkach, „Multiwavelength opaque optical-crossconnect networks“, *IEICE Transactions on Communications*, Bd. E-82B, Nr. 8, S. 1095 – 1104, August 1999.
- [98] J. Gourlay, T.-Y. Yang, J. A. B. Dines, J. F. Snowdon, A. C. Walker, „Development of free-space digital optics in computing“, *IEEE Computer*, Bd. 31, Nr. 2, S. 38 – 44, Februar 1998.
- [99] A. Grah, T. D. Todd, „Photonic ring and bus networks with reduced station hardware“, *Journal of High Speed Networks*, Bd. 4, Nr. 1, S. 77 – 98, 1995.
- [100] P. E. Green, *Fiber optic networks*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA, 1993, ISBN 0-13-319492-2.
- [101] U. Gremmelmaier, *Methoden zur Planung von hierarchischen Hochgeschwindigkeitsnetzen (MAN)*, 64. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1996.
- [102] W. D. Grover, „High availability path design in ring-based optical networks“, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Bd. 7, Nr. 4, S. 558 – 574, August 1999.
- [103] D. L. Guen, S. Del Burgo, M. L. Moulinard, D. Grot, M. Henry, F. Favre, T. Georges, „Narrow band 1.02 Tbit/s (51x20 Gbit/s) soliton DWDM transmission over 1000 km of standard fiber with 100 km amplifier spans“, *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC / IOOC '99) : Postdeadline Papers*, S. PD4/1 – PD4/3, Februar 1999.
- [104] R. Guérin, A. Orda, „QoS-based routing in networks with inaccurate information: theory and algorithms“, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Bd. 7, Nr. 3, S. 350 – 364, Juni 1999.
- [105] C. Guillemot, F. Clerot, M. Henry, A. Le Corre, J. Kervarec, A. Dupas, L. Billes, „Optical packet switching for WDM high speed backbones“, *Proceedings of the 24th European Conference on Optical Communication (ECOC '98)*, Bd. 2, S. 83 – 85, September 1998.
- [106] S. Gupta, K. W. Ross, M. El Zarki, „Routing in virtual path based ATM networks“, *Proceedings of the IEEE Globecom 1992*, S. 571 – 575, Dezember 1992.
- [107] N. Hahn, „Breitbandige Infrastrukturen mit optischen Übertragungssystemen“, *ntz*, Nr. 2/2000, S. 48 – 51, 2000.

- [108] J. Hansryd, B. Bakhshi, B. E. Olsson, P. A. Andrekson, J. Brentel, E. Kolltveit, X. Zhang, „80 Gbit/s single wavelength OTDM soliton transmission over 172 km installed fiber“, *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC / IOOC '99) : Postdeadline Papers*, S. PD6/1 – PD6/3, Februar 1999.
- [109] H. Harai, M. Murata, H. Miyahara, „Performance of alternate routing methods in all-optical switching networks“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM '97*, S. 517 – 525, April 1997.
- [110] H. Harai, M. Murata, H. Miyahara, „Performance analysis of wavelength assignment policies in all-optical networks with limited-range wavelength conversion“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 16, Nr. 7, S. 1051 – 1060, September 1998.
- [111] K. Harikae, Y. Shibata, Y. Nakashima, „New optical access system (PI-system)“, *NTT Review*, Bd. 10, Nr. 2, S. 69 – 76, März 1998.
- [112] P. Harper, I. S. Penketh, S. Alleston, N. J. Doran, „200000 km 10 Gbit/s soliton propagation exploiting periodic saturable absorption“, *Proceedings of the 24th European Conference on Optical Communication (ECOC '98)*, Bd. 1, S. 107 – 108, September 1998.
- [113] R. Harris, S. Köhler, „Possibilities for QoS in existing Internet routing protocols“, *Technischer Bericht Nr. 228*, Universität Würzburg, Lehrstuhl für Informatik III, Mai 1999.
- [114] D. J. T. Heatley, D. R. Wisely, I. Neild, P. Cochrane, „Optical wireless: the story so far“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 36, Nr. 12, S. 72 – 82, Dezember 1998.
- [115] D. J. T. Heatley, D. R. Wisely, I. Neild, P. Cochrane, „A review of optical wireless - what is it and what does it offer?“, *British Telecommunications Engineering*, Bd. 17, Nr. 4, S. 251 – 261, Januar 1999.
- [116] E. Herter, M. Graf, *Optische Nachrichtentechnik*, Reihe Informationstechnik, Nachrichtentechnik, Hanser, München, 1994, ISBN 3-446-15977-0.
- [117] F. S. Hillier, G. J. Lieberman, *Introduction to Operations Research*, McGraw-Hill Publishing Company, New York, USA, 4. Auflage, 1986, ISBN 0-07-028908-5.
- [118] H. S. Hinton, *An Introduction to Photonic Switching Fabrics*, Plenum Press, New York, 1993, ISBN 0-306-44379-1.
- [119] A. J. N. Houghton, B. Fabianek, G. Kalbe, „Optical communications research in European Community programmes“, *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC 1999)*, Bd. 3 (Wednesday), S. 184 – 186, Februar 1999.

- 
- [120] N.-F. Huang, S.-T. Sheu, „A wavelength reusing/sharing access protocol for multi-channel photonic dual bus networks“, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Bd. 14, Nr. 5, S. 678 – 692, Mai 1996.
- [121] H. Hultzsch (Herausgeber), *Optische Telekommunikationssysteme: Physik, Komponenten und Systeme; Pilotprojekt und Serientechnik im Netz der Deutschen Telekom AG*, Damm-Verlag, Gelsenkirchen, 1996, ISBN 3-87333-082-2.
- [122] E. Hyttiä, J. Virtamo, „Dynamic routing and wavelength assignment using first policy iteration“, *Proceedings of COST 257 meeting*, Barcelona, Januar 2000.
- [123] E. Iannone, R. Sabella, L. Stefano, F. Valeri, „All-optical wavelength conversion in optical multicarrier networks“, *IEEE Transactions on Communications*, Bd. 44, Nr. 6, S. 716 – 724, Juni 1996.
- [124] J. Iness, B. Mukherjee, „Sparse wavelength conversion in wavelength-routed WDM optical networks“, *Photonic Network Communications*, Bd. 1, Nr. 3, S. 183 – 205, November 1999.
- [125] Informationstechnische Gesellschaft (ITG) im VDE, Entwurf der ITG-Empfehlung 5.2-01 „Architekturen und Verfahren der Vermittlungstechnik“, April 1996.
- [126] Informationstechnische Gesellschaft (ITG) im VDE, Entwurf der ITG-Empfehlung 5.2-03 „Begriffe der Nachrichtenverkehrstheorie“, Januar 1997.
- [127] ISO, ISO/IEC Standard 7498-1, *Information Technology – Open Systems Interconnection – Basic reference model*, 1994.
- [128] ITU-T, *ITU-T Recommendation G.692 (10/98) - Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers*, October 1998.
- [129] ITU-T, *ITU-T Recommendation G.803 (03/93) - Architectures of transport networks based on the Synchronous Digital Hierarchy (SDH)*, März 1993.
- [130] ITU-T, *ITU-T Recommendation G.805 (11/95) - Generic functional architecture of transport networks*, November 1995.
- [131] ITU-T, *ITU-T Recommendation G.872 (02/99) - Architecture of optical transport networks*, Februar 1999.
- [132] ITU-T, *ITU-T Recommendation G.911 (04/97) - Parameters and calculation methodologies for reliability and availability of fibre optic systems*, April 1997.
- [133] ITU-T, *ITU-T Recommendation X.200 (07/94), Information technology - Open Systems Interconnection - Basic reference model: The basic model*, Juli 1994.

- [134] M. W. Janoska, T. D. Todd, „A single-hop wavelength routed LAN/MAN architecture“, *Proceedings of IEEE INFOCOM '96*, Bd. 2, S. 402 – 409, März 1996.
- [135] G. Jeong, E. Ayanoglu, „Comparison of wavelength-interchanging and wavelength-selective cross-connects in multiwavelength all-optical networks“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM '96*, Bd. 1, S. 156 – 163, März 1996.
- [136] F. Jia, B. Mukherjee, „MultiS-Net: a high-capacity, packet-switched, multichannel, single-hop architecture and protocol for a local lightwave network“, *Journal of High Speed Networks*, Bd. 5, Nr. 3, S. 221 – 241, 1996.
- [137] D. Johnson, N. Hayman, P. Veitch, „The evolution of a reliable transport network“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 37, Nr. 8, S. 52 – 57, August 1999.
- [138] M. L. Jones, R. K. Butler, W. C. Szeto, „Sprint long distance network survivability: today and tomorrow“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 37, Nr. 8, S. 58 – 62, August 1999.
- [139] J. P. Jue, D. Datta, B. Mukherjee, „A new node architecture for scalable WDM optical networks“, *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '99)*, Nr. S43-P2, Juni 1999.
- [140] A. Jukan, „Resource management for service accomodation in optical networks“, *Proceedings of the IFIP TC6 / WG6.2 Fourth International Conference on Broadband Communications (BC '98)*, S. 274 – 285, April 1998.
- [141] A. Jukan, H. R. van As, „Resource allocation strategies with QoS-routing in optical networks“, *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '99)*, Paper S51 – P6, Juni 1999.
- [142] D. Jungnickel, *Graphen, Netzwerke und Algorithmen*, BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim, 1994, ISBN 3-411-14263-4.
- [143] E. Karasan, E. Ayanoglu, „Effects of wavelength routing and selection algorithms on wavelength conversion gain in WDM optical networks“, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Bd. 6, Nr. 2, S. 186 – 196, April 1998.
- [144] E. Karasan, E. Ayanoglu, „Performance of WDM transport networks“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 16, Nr. 7, S. 1081 – 1096, September 1998.
- [145] G. D. Khoe, „Coherent multicarrier lightwave technology for flexible capacity networks“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 32, Nr. 3, S. 22 – 33, März 1994.

- 
- [146] L. Kleinrock, M. Gerla, N. Bambos, J. Cong, E. Gafni, L. Bergman, J. Bannister, „The supercomputer supernet: a scalable distributed terabit network“, *Journal of High Speed Networks*, Bd. 4, Nr. 4, S. 407 – 424, 1995.
- [147] A. Kloch, P. B. Hansen, D. Wolfson, T. Fjelde, K. Stubkjaer, „Wavelength converters“, *IEICE Transactions on Communications*, Bd. 82, Nr. 8, S. 1209 – 1220, August 1999.
- [148] H. Kocher, *Entwurf und Implementierung einer Simulationsbibliothek unter Anwendung objektorientierter Methoden*, 52. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1994.
- [149] M. Kodialam, T. V. Lakshman, „Dynamic routing of bandwidth guaranteed tunnels with restoration“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2000*, März 2000.
- [150] R. König, C. Thiel, „Media Oriented Systems Transport (MOST) - Standard für Multimedia Networking im Fahrzeug“, *Informationstechnik und Technische Informatik (it+ti)*, Bd. 41, Nr. 5, S. 36 – 42, Oktober 1999.
- [151] M. Kovacevic, A. Acampora, „On wavelength translation in all-optical networks“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM '95*, S. 413 – 422, April 1995.
- [152] M. Kovacevic, A. Acampora, „Electronic wavelength translation in optical networks“, *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM '95*, S. 2182 – 2187, November 1995.
- [153] M. Kovacevic, A. Acampora, „Benefits of wavelength translation in all-optical clear-channel networks“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 14, Nr. 5, S. 868 – 880, Juni 1996.
- [154] M. Kovacevic, M. Gerla, „A new optical signal routing scheme for linear lightwave networks“, *IEEE Transactions on Communications*, Bd. 43, Nr. 12, S. 3004 – 3014, Dezember 1995.
- [155] R. M. Krishnaswamy, K. N. Sivarajan, „Design of logical topologies: a linear formulation for wavelength routed optical networks with no wavelength changers“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM '98*, S. 919 – 927, März 1998.
- [156] H. Kröner, *Verkehrssteuerung in ATM-Netzen: Verfahren und verkehrstheoretische Analysen zur Zellpriorisierung und Verbindungsannahme*, 62. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1995.
- [157] P. J. Kühn, „Approximate analysis of general queuing networks by decomposition“, *IEEE Transactions on Communications*, Bd. COM-27, Nr. 1, S. 113 – 126, 1979.

- [158] P. J. Kühn, *Nachrichtenverkehrstheorie*, Vorlesung an der Universität Stuttgart, 1997/1998.
- [159] P. J. Kühn, *Technische Informatik III - Kommunikationsnetze*, Vorlesung an der Universität Stuttgart, 1998/1999.
- [160] J. H. Laarhuis, *Multichannel interconnection in all-optical networks*, Arbeitsbericht Nr. 95-07, Centre for Telematics and Information Technology, Universität Twente, 1995.
- [161] M. Lang, *Effizienz von Verfahren zur adaptiven und verteilten Verkehrslenkung in Paketvermittlungsnetzen*, 67. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1997.
- [162] C. Law, S. Kai-Yeung, „On-line routing and wavelength assignment in WDM rings“, *Proceedings of the SPIE Conference on All-Optical Networking 1999: Architecture, Control, and Management Issues*, Bd. 3843, S. 276 – 288, September 1999.
- [163] C.-M. Lee, C.-C. R. Hui, F. F.-K. Tong, P. T.-S. Yum, „Network dimensioning in WDM-based all-optical networks“, *Photonic Network Communications*, Bd. 2, Nr. 3, S. 215 – 225, 2000.
- [164] K. C. Lee, V. O. K. Li, „Routing and switching in a wavelength convertible optical network“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM '93*, S. 578 – 585, März 1993.
- [165] K. C. Lee, V. O. K. Li, „A wavelength-convertible optical network“, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Bd. 11, Nr. 5/6, S. 962 – 970, Mai 1993.
- [166] K.-C. Lee, V. O. K. Li, „A wavelength rerouting algorithm in wide-area all-optical networks“, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Bd. 14, Nr. 6, S. 1218-1229, Juni 1996.
- [167] G. Li, R. Simha, „The partition coloring problem and its application to wavelength routing and assignment“, *Proceedings of the Optical Networks Workshop*, Richardson, USA, Paper P03, Januar 2000.
- [168] L. Li, A. K. Somani, „Blocking performance analysis of fixed-paths least-congestion routing in multifiber WDM networks“, *Proceedings of SPIE Conference on All-Optical Networking 1999: Architecture, Control, and Management Issues*, Bd. 3843, S. 56 – 67, September 1999.
- [169] L. Li, A. K. Somani, „Dynamic wavelength routing using congestion and neighborhood information“, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Bd. 7, Nr. 5, S. 779 – 786, Oktober 1999.
- [170] W. Liang, X. Shen, „Improved lightpath (wavelength) routing in large WDM networks“, *IEEE Transactions on Communications*, Bd. 48, Nr. 9, S. 1571 – 1579, September 2000.

- 
- [171] L. Y. Lin, „Micromachined free-space matrix switches with submillisecond switching time for large-scale optical crossconnect“, *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference 1998 (OFC 98)*, S. 147 – 148, February 1998.
- [172] J. C. Lu, L. Kleinrock, „Performance analysis of single-hop wavelength division multiple access networks“, *Journal of High Speed Networks*, Bd. 1, Nr. 1, S. 61 – 77, 1992.
- [173] M. W. Maeda, „Management and control of transparent optical networks“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 16, Nr. 7, S. 1008 – 1023, September 1998.
- [174] G. Maier, M. Martinelli, A. Pattavina, M. Scappini, „Performance of WDM rings with wavelength conversion under non-Poisson traffic“, *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '99)*, Paper S51–P4, Juni 1999.
- [175] G. Maier, M. Scappini, M. Martinelli, A. Pattavina, „Performance of WDM rings with partial and sparse wavelength conversion under general dynamic traffic“, *European Transactions on Telecommunications (ETT)*, Bd. 11, Nr. 1, S. 91 – 98, Januar/Februar 2000.
- [176] K. Makki, J. Broussard, N. Pissinou, „On optical communication networks and wide-band network architecture“, *Computer Communications*, Bd. 23, Nr. 10, S. 901 – 911, Mai 2000.
- [177] J. Manchester, P. Bonenfant, C. Newton, „The evolution of transport network survivability“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 37, Nr. 8, S. 44 – 51, August 1999.
- [178] V. Martin, J. Geffard, J.-L. Lutton, „A multiperiod capacity planning model for global telecommunications networks“, *Proceedings of the 8th International Telecommunication Networks Planning Symposium (Networks '98)*, S. 261 – 266, Oktober 1998.
- [179] A. McGuire, P. Bonenfant, „Standards: The blueprints for optical networking“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 36, Nr. 2, S. 68 – 78, Februar 1998.
- [180] L. McKnight, J. Bailey, *Internet economics*, MIT Press, Cambridge, USA, 1998, ISBN: 0-262-13336-9.
- [181] D. Medhi, I. Sukiman, „Admission control and dynamic routing schemes for wide-area broadband networks: their interaction and network performance“, *Proceedings of the International IFIP-IEEE Conference on Broadband Communications '96*, S. 99 – 110, April 1996.
- [182] Y. Mei, C. Qiao, „Efficient distributed control protocols for WDM all-optical networks“, *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN '97)*, S. 150 – 153, September 1997.

- [183] Y. Mei, C. Qiao, „Distributed control schemes for dynamic lightpath establishment in WDM optical networks“, *Proceedings of the Optical Networks Workshop*, Paper Nr. 05, Januar/Februar 2000.
- [184] D. Mestdagh, *Fundamentals of multiaccess optical fiber networks*, Artech House Optoelectronics Library, Artech House, Boston, USA, 1995, ISBN 0-89006.
- [185] P. P. Mishra, H. Saran, „Capacity management and routing policies for voice over IP traffic“, *IEEE Network*, Bd. 14, Nr. 2, S. 20 – 27, März/April 2000.
- [186] E. Modiano, „WDM-based packet networks“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 37, Nr. 3, S. 130 – 135, März 1999.
- [187] E. Modiano, R. Barry, „Architectural considerations in the design of WDM-based optical access network“, *Computer Networks*, Bd. 31, Nr. 4, S. 327 – 341, Februar 1999.
- [188] N. Modiri, „The ISO reference model entities“, *IEEE Network*, Bd. 5, Nr. 4, S. 24 – 33, Juli 1991.
- [189] G. Mohan, C. S. R. Murthy, „Efficient wavelength rerouting in WDM single-fiber and multi-fiber networks with and without wavelength conversion“, *Journal of High Speed Networks*, Bd. 8, Nr. 3, S. 149 – 171, 1999.
- [190] G. Mohan, C. S. R. Murthy, „A distributed control protocol for wavelength routing with fairness improvement in WDM networks“, *European Transactions on Telecommunications (ETT)*, Bd. 11, Nr. 1, S. 35 – 42, Januar/Februar 2000.
- [191] G. Mohan, A. K. Somani, „Routing dependable connections with specified failure restoration guarantees in WDM networks“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2000*, März 2000.
- [192] A. Mokhtar, M. Azizoglu, „Adaptive wavelength routing in all-optical networks“, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Bd. 6, Nr. 2, S. 197 – 206, April 1998.
- [193] G. E. Moore, „Cramming more components onto integrated circuits“, *Electronics*, Bd. 38, Nr. 8, April 1965.
- [194] B. Mukherjee, „WDM-based local lightwave networks. Part I: single-hop systems“, *IEEE Network*, Bd. 6, Nr. 3, S. 12 – 27, Mai 1992.
- [195] B. Mukherjee, „WDM-based local lightwave networks. Part II: multihop systems“, *IEEE Network*, Bd. 6, Nr. 4, S. 20 – 32, Juli 1992.
- [196] T. Naito, „One Terabit/s transmission over 10,000 km using C-band and L-band“, *Proceedings of the European Conference on Networks and Optical Communications 2000 (NOC 2000)*, Bd. „WDM and Photonic Networks“, S. 2 – 9, Juni 2000.

- 
- [197] M. Nakazawa, „Soliton transmission in telecommunication networks“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 32, Nr. 3, S. 34 – 41, März 1994.
- [198] G. Nash, A. Sofer, *Linear and nonlinear programming*, McGraw-Hill International Editions, New York, USA, 1996, ISBN 0-07-114537-0.
- [199] K. Nosu, *Optical FDM Network Technologies*, Artech House Optoelectronics Library, Artech House, Boston, USA, 1997, ISBN 0-89006-769-4.
- [200] R. O’Dowd, „Tunable and agile laser transmitter developments for future DWDM optical networks: towards managed wavelength control and switching“, *Photonic Network Communications*, Bd. 2, Nr. 1, S. 97 – 103, Januar 2000.
- [201] S. Okamoto, „Photonic transport network architecture and OA&M technologies to create large-scale robust networks“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 16, Nr. 7, S. 995 – 1007, September 1998.
- [202] S. Okamoto, A. Watanabe, K. Sato, „Optical path cross-connect node architectures for photonic transport network“, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Bd. 14, Nr. 6, S. 1410 – 1422, Juni 1996.
- [203] M. J. O’Mahony, D. Simeonidou, A. Yu, J. Zhou, „The design of a European optical network“, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Bd. 13, Nr. 5, S. 817 – 828, Mai 1995.
- [204] I. Ouveysi, F. Safaei, A. Wirth, „Planning of transport networks based on photonic and electronic cross-connection“, *Photonic Network Communications*, Bd. 2, Nr. 2, S. 199 – 208, 2000.
- [205] Y. Pan, C. Qiao, Y. Yang, „Optical multistage interconnection networks: new challenges and approaches“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 37, Nr. 2, S. 50 – 56, Februar 1999.
- [206] K. Panzer, G. Müller, H. Hurt, C. Thiel, „Von D2B zu MOST - Übertragung mit Licht: Kfz-Multimedia-Infrastruktur“, *Components (Siemens)*, Nr. 1, S. 23 – 25, Januar 1999.
- [207] G. I. Papadimitriou, „Centralized packet filtering protocols: a new family of MAC protocols for WDM star networks“, *Computer Communications*, Bd. 22, Nr. 1, S. 11 – 19, Januar 1999.
- [208] W. Pauler, „Weltrekorde aus den Bell Labs“, *Funkschau*, Nr. 5/2000, S. 8 – 9, 2000.
- [209] H. G. Perros, K. M. Elsayed, „Call admission control schemes: a review“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 34, Nr. 11, S. 82 – 90, November 1996.

- [210] M. Pickavet, P. Demeester, „Long-term planning of WDM networks: a comparison between single-period and multi-period techniques“, *Photonic Network Communications*, Bd. 1, Nr. 4, S. 331 – 246, Dezember 1999.
- [211] M. Pickavet, P. Demeester, „Multi-period planning of survivable WDM networks“, *European Transactions on Telecommunications (ETT)*, Bd. 11, Nr. 1, S. 7 – 16, Januar 2000.
- [212] C. Qiao, „Labeled optical burst switching for IP-over-WDM integration“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 38, Nr. 9, S. 104 – 114, September 2000.
- [213] C. Qiao, M. Yoo, „Optical burst switching (OBS) - a new paradigm for an Optical Internet“, *Journal of High Speed Networks*, Bd. 8, Nr. 1, S. 69 – 84, Januar 1999.
- [214] B. Rajagopalan, D. Pendarakis, D. Sha, R. S. Ramamoorthy, K. Bala, „IP over optical networks: architectural aspects“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 38, Nr. 9, S. 94 – 102, September 2000.
- [215] B. Ramamurthy, *Efficient design of wavelength division multiplexing (WDM) based optical networks*, Dissertation, University of California, Davis, 1998.
- [216] B. Ramamurthy, B. Mukherjee, „Wavelength conversion in WDM networking“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 16, Nr. 7, S. 1061 – 1073, September 1998.
- [217] S. Ramamurthy, B. Mukherjee, „Survivable WDM mesh networks, part I – protection“, *Proceedings of IEEE INFOCOM '99*, S. 744 – 751, März 1999.
- [218] S. Ramamurthy, B. Mukherjee, „Survivable WDM mesh networks, part II - restoration“, *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '99)*, Paper S51-P2, Juni 1999.
- [219] L. Raman, „OSI systems and network management“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 36, Nr. 3, S. 46 – 53, März 1998.
- [220] R. Ramaswami, A. Segall, „Distributed network control for optical networks“, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Bd. 5, Nr. 6, S. 936 – 943, Dezember 1997.
- [221] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, „Optimal routing and wavelength assignment in all-optical networks“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM '94*, Bd. 2, S. 970 – 979, Juni 1994.
- [222] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, „Routing and wavelength assignment in all-optical networks“, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Bd. 3, Nr. 5, S. 489 – 500, Oktober 1995.

- 
- [223] R. Ramaswami, K. Sivarajan, *Optical networks: a practical perspective*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, USA, 1998, ISBN 1-55860-445-6.
- [224] J. J. Refi, „Optical fibers for optical networking“, *Bell Labs Technical Journal*, Bd. 4, Nr. 1, S. 246 – 261, Januar 1999.
- [225] G. Rößler, *Einfluß des Netzmanagements auf die Struktur von OSI-Systemen und eine Methode für die erstmalige Konfiguration*, 60. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1995.
- [226] K. W. Ross, *Multiservice loss models for broadband telecommunication networks*, Springer, Berlin, Deutschland, 1995, ISBN 3-540-19918-7.
- [227] G. N. Rouskas, M. H. Ammar, „Dynamic reconfiguration in multihop WDM networks“, *Journal of High Speed Networks*, Bd. 4, Nr. 4, S. 221 – 238, 1995.
- [228] G. N. Rouskas, M. H. Ammar, „Analysis and optimization of transmission schedules for single-hop WDM networks“, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Bd. 3, Nr. 2, S. 211 – 221, April 1995.
- [229] J. P. Ryan, „WDM: North American deployment trends“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 36, Nr. 2, S. 40 – 44, Februar 1998.
- [230] D. Saha, „Lightpath versus semi-lightpath: some studies on optimal routing in WDM optical networks“, *Proceedings of the 3rd Working Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM '99)*, S. 296 – 306, Februar 1999.
- [231] D. Saha, M. D. Purkayastha, A. Mukherjee, „An approach to wide area WDM optical network design using genetic algorithm“, *Computer Communications*, Bd. 22, Nr. 2, S. 156 – 172, Januar 1999.
- [232] G. Sahin, M. Azizoglu, „Routing and wavelength assignment in all-optical networks with multicast traffic“, *European Transactions on Telecommunications (ETT)*, Bd. 11, Nr. 1, S. 55 – 62, Januar 2000.
- [233] K. Sato, *Advances in transport network technologies: Photonic networks, ATM, and SDH*, Artech House Telecommunications Library, Artech House, Boston, USA, 1996, ISBN 0-8906-851-8.
- [234] K. Sato, S. Okamoto, H. Hadama, „Network performance and integrity enhancement with optical path layer technologies“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 12, Nr. 1, S. 159 – 170, Januar 1994.

- [235] B. Schein, E. Modiano, „Quantifying the benefit of configurability in circuit-switched WDM ring networks“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2000*, März 2000.
- [236] R. Sedgewick, *Algorithmen in C++*, Addison-Wesley, Bonn, 1. Auflage, 1992, ISBN 3-89319-462-2.
- [237] L. P. Seelen, H. C. Tijms, M. H. Van Hoorn, *Tables for multi-server queues*, North-Holland/Elsevier, Amsterdam, 1985.
- [238] A. Sengupta, S. K. Alluri, S. Bandyopadhyay, A. Jaekel, „A new approach to fault-tolerant routing in all-optical networks“, *Proceedings of SPIE Conference on All-Optical Networking 1999: Architecture, Control, and Management Issues*, Bd. 3843, S. 68 – 78, September 1999.
- [239] M. Sexton, A. Reid, *Broadband networking: ATM, SDH, and SONET*, Artech House Telecommunications Library, Artech House, Boston, USA, 1997, ISBN 0-89006-578-0.
- [240] D. R. Shier, „On algorithms for finding the k shortest paths in a network“, *Networks*, Bd. 9, Nr. 4, S. 195 – 214, 1979.
- [241] R. Siebenhaar, *Verkehrslenkung und Kapazitätsanpassung in ATM-Netzen mit virtuellen Pfaden*, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Technische Universität München, 1996.
- [242] K. N. Sivarajan, R. Ramaswami, „Lightwave networks based on de Bruijn graphs“, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Bd. 2, Nr. 1, S. 70 – 79, Februar 1994.
- [243] B. Skjoldstrup, J. Späth, A. Jukan, „Transparency in high capacity networks based on an optical layer“, *Proceedings of the COST 240 Workshop on “SOA-based Components for Optical Networks” 1997*, S. 22/1 – 22/5, Oktober 1997.
- [244] J. Skorin-Kapov, J. F. Labourdette, „Rearrangeable multihop lightwave networks: congestion minimization on regular topologies“, *Telecommunication Systems*, Bd. 9, Nr. 1, S. 113 – 132, März 1998.
- [245] J. Späth, „Dynamic routing and resource allocation in WDM transport networks“, *Computer Networks*, Bd. 32, Nr. 5, S. 519 – 538, Mai 2000.
- [246] J. Späth, S. Bodamer, „Routing strategies for photonic networks under dynamic traffic conditions“, *Proceedings of the 3rd European Conference on Networks & Optical Communications (NOC '98)*, Bd. 3, S. 174 – 177, Juni 1998.
- [247] J. Späth, S. Bodamer, „Routing of dynamic Poisson and non-Poisson traffic in WDM networks with limited wavelength conversion“, *Proceedings of the 24th European Conference on Optical Communication (ECOC '98)*, Bd. 1, S. 359 – 360, September 1998.

- 
- [248] J. Späth, J. Charzinski, S. Hörz, M. N. Huber, „Performance analysis of a combined WDM/TDM network based on fixed wavelength assignment“, *Proceedings of the Working-Conference on Optical Network Design and Modelling (ONDM) 1997*, Bd. 1, S. 147 – 159, Februar 1997.
- [249] J. Späth, H. Weißschuh, „Investigation of protection strategies: problem complexity and specific aspects for WDM networks“, *Proceedings of the European Conference on Networks and Optical Communications 1999 (NOC '99)*, Bd. 2, S. 68 – 75, Juni 1999.
- [250] A. Sridharan, K. N. Sivarajan, „Blocking in all-optical networks“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2000*, März 2000.
- [251] W. Stallings, „SNMP and SNMPv2: The infrastructure for network management“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 36, Nr. 3, S. 37 – 43, März 1998.
- [252] T.E. Stern, K. Bala, *Multiwavelength optical networks: A layered approach*, Addison-Wesley, Reading, MA, USA, 1999, ISBN 0-201-30967-X.
- [253] K. Struyve, P. Demeester, „Dynamic routing of protected optical paths in wavelength routed and wavelength translated networks“, *Proceedings of the 23rd European Conference on Optical Communication (ECOC 1997)*, Paper TU3, September 1997.
- [254] K. Struyve, N. Wauters, P. Falcao, P. Arijs, D. Colle, P. Demeester, P. Lagasse, „Application, design, and evolution of WDM in GTS's pan-european transport network“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 38, Nr. 3, S. 114 – 121, März 2000.
- [255] K. E. Stubkjaer, A. Kloch, P. B. Hansen, H. N. Poulsen, D. Wolfson, K. S. Jepsen, A. T. Clausen, E. Limal, A. Buxens, „Wavelength converter technology“, *IEICE Transactions on Communications*, Bd. E82-B, Nr. 2, S. 390–400, Februar 1999.
- [256] M. Stümpfle, *Planung und Optimierung von prioritätsbasierten Steuergerätenetzen für Fahrzeuge*, 72. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1999.
- [257] S. Subramaniam, M. Azizoglu, A. K. Somani, „All-optical networks with sparse wavelength conversion“, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Bd. 4, Nr. 4, S. 544 – 557, August 1996.
- [258] S. Subramaniam, M. Azizoglu, A. Somani, „On optimal converter placement in wavelength-routed networks“, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Bd. 7, Nr. 5, S. 754 – 766, Oktober 1999.
- [259] S. Subramaniam, R. A. Barry, „Wavelength assignment in fixed routing WDM networks“, *Proceedings of the ICC '97*, S. 406 – 410, Juni 1997.

- [260] S. Subramaniam, A. K. Somani, M. Azizoglu, R. A. Barry, „A performance model for wavelength conversion with non-Poisson traffic“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM '97*, S. 500 – 507, April 1997.
- [261] Y. Sun, J. Gu, D. H. K. Tsang, „Routing and wavelength assignment in all-optical networks with multicast traffic“, *Proceedings of the International Teletraffic Congress - ITC-16 : Teletraffic engineering in a competitive world*, S. 149 – 158, Juni 1999.
- [262] Y. Sun, A. K. Srivasta, J. Zhou, J. W. Sulhoff, „Optical fiber amplifiers for WDM optical networks“, *Bell Labs Technical Journal*, Bd. 4, Nr. 1, S. 187 – 206, Januar 1999.
- [263] J. W. Suurballe, „Disjoint paths in a network“, *Networks*, Bd. 4, S. 125 – 145, 1974.
- [264] A. S. Tanenbaum, *Computer networks*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, USA, 3. Auflage, 1996, ISBN 0-13-394248-1.
- [265] T. Theimer, *Vergleichende Untersuchungen an ATM-Koppelnetzstrukturen*, 56. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1994.
- [266] S. Thiagarajan, A. K. Somani, „An efficient algorithm for optimal wavelength converter placement on wavelength-routed networks with arbitrary topologies“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM '99*, Bd. 2, S. 916 – 923, März 1999.
- [267] H. C. Tijms, *Stochastic modelling and analysis - a computational approach*, John Wiley & Sons, Chichester, USA, 1986, ISBN 0-471-90911-4.
- [268] Y. T'Joens, G. Ester, M. Vandenhoute, „Resilient optical and SONET/SDH-based IP networks“, *Proceedings of the Second International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN 2000)*, S. 255 – 260, April 2000.
- [269] S. Tomic, J. Heiles, M. Bischoff, „Making the optical layer work“, *Proceedings of the 3rd European Conference on Networks & Optical Communications (NOC '98)*, Bd. 1, S. 214 – 221, Juni 1998.
- [270] D. Torrieri, „Algorithms for finding an optimal set of short disjoint paths in a communication network“, *IEEE Transactions on Communications*, Bd. 40, Nr. 11, S. 1698 – 1702, November 1992.
- [271] T. Tripathi, K. N. Sivarajan, „Computing approximate blocking probabilities in wavelength routed all-optical networks with limited-range wavelength conversion“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM '99*, Bd. 1, S. 329 – 336, März 1999.
- [272] P. R. Trischitta, W. C. Marra, „Applying WDM technology to undersea cable networks“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 36, Nr. 2, S. 62 – 66, Februar 1998.

- 
- [273] R. S. Tucker, W. D. Zhong, „Photonic packet switching: an overview“, *IEICE Transactions on Communications*, Bd. 82, Nr. 2, S. 254 – 264, Februar 1999.
- [274] J. S. Turner, „Terabit burst switching“, *Journal of High Speed Networks*, Bd. 8, Nr. 1, S. 3 – 16, Januar 1999.
- [275] B. Van Caenegem, W. Van Parys, F. De Turck, P. M. Demeester, „Dimensioning of survivable WDM networks“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 16, Nr. 7, S. 1146 – 1157, September 1998.
- [276] P. Van Mieghem, „Estimation of an optimal PNNI topology“, *Proceedings of the IEEE ATM '97 Workshop*, S. 570 – 577, Mai 1997.
- [277] W. Van Parys, B. Van Caenegem, P. Demeester, „Reduction of blocking in arbitrary meshed WDM networks through a biased routing approach“, *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference 1998 (OFC '98)*, S. 94, Februar 1998.
- [278] K. R. Venugopal, E. E. Rajan, P. S. Kumar, „Impact of wavelength converters in wavelength routed all-optical networks“, *Computer Communications*, Bd. 22, Nr. 3, S. 244 – 257, Februar 1999.
- [279] K. R. Venugopal, M. Shivakumar, P. S. Kumar, „A heuristic for placement of limited range wavelength converters in all-optical networks“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM '99*, Bd. 2, S. 908 – 915, März 1999.
- [280] S. Verma, R. K. Pankaj, A. Leon-Garcia, „QoS based multicast routing algorithms for real time applications“, *Performance Evaluation*, Bd. 34, Nr. 4, S. 273 – 294, Dezember 1998.
- [281] N. Vicari, S. Köhler, „Measuring Internet user traffic behaviour dependent on access speed“, *Proceedings of the 13th ITC Specialist Seminar on IP Traffic Measurement, Modeling and Management*, S. 5/1 – 5/7, September 2000.
- [282] C. Vijayanand, M. Shiva Kumar, K. R. Venugopal, P. Sreenivasa Kumar, „Converter placement in all-optical networks using genetic algorithms“, *Computer Communications*, Bd. 23, Nr. 13, S. 1223 – 1234, Juli 2000.
- [283] A. Viswanathan, N. Feldman, Z. Wang, R. Callon, „Evolution of multiprotocol label switching“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 36, Nr. 5, S. 165 – 173, Mai 1998.
- [284] R. E. Wagner, R. C. Alferness, A. A. M. Saleh, M. S. Goodman, „MONET: Multiwavelength optical networking“, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Bd. 14, Nr. 6, S. 1349 – 1355, Juni 1996.

- [285] N. Wauters, N. Lemaitre, J.-P. Battaille, M. Groisman, „Protection in long distance single and multiwavelength transport networks using optical switch technology“, *Proceedings of the First International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN 98)*, Nr. O8, Mai 1998.
- [286] N. Wauters, G. Ocakoglu, K. Struyve, P. F. Fonseca, „Survivability in a new Pan-European carrier's carrier network based on WDM and SDH technology: current implementation and future requirements“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 37, Nr. 8, S. 63 – 69, August 1999.
- [287] J. Y. Wei, J. L. Pastor, R. S. Ramamurthy, Y. Tsai, „Just-in-time optical burst switching for multiwavelength networks“, *Proceedings of IFIP TC6 WG6.2 Fifth International Conference on Broadband Communications (BC'99)*, S. 339 – 352, November 1999.
- [288] G. Wöhlbier (Hrsg.), *Planung von Telekommunikationsnetzen, Band I: Fernsprechnetze*, R. v. Deckers's Verlag, Heidelberg, 1990, ISBN 3-7685-1489-7.
- [289] E. W. M. Wong, A. K. M. Chan, S. Chan, K. T. Ko, „Bandwidth allocation for virtual paths in ATM networks with dynamic routing“, *IEICE Transactions on Communications*, Bd. 83-B, Nr. 3, S. 626 – 637, März 2000.
- [290] Y.-M. Wong, D. J. Muehlner, C. C. Faudskar, D. B. Buchholz, M. Fishteyn et al., „Technology development of a high-density 32-channel 16-Gb/s optical data link for optical interconnection applications for the optoelectronic technology consortium (OETC)“, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Bd. 13, Nr. 6, S. 995 – 1016, Juni 1995.
- [291] T.-H. Wu, *Fiber network service survivability*, Artech House Telecommunications Library, Artech House, Boston, USA, 1992, ISBN 0-89006-469-5.
- [292] X. Xiao, A. Hannan, B. Bailey, L. M. Ni, „Traffic engineering with MPLS in the Internet“, *IEEE Network*, Bd. 14, Nr. 2, S. 28 – 33, März/April 2000.
- [293] G. Xiao, Y. W. Leung, „Algorithms for allocating wavelength converters in all-optical networks“, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Bd. 7, Nr. 4, S. 545 – 557, August 1999.
- [294] I. Yamashita, T. Kanada, K. Harikae, „PDS technologies realizing economical full access network opticalization“, *NTT Review*, Bd. 9, Nr. 5, S. 38 – 43, September 1997.
- [295] S. Yao, B. Mukherjee, S. Dixit, „Advances in photonic packet switching: an overview“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 38, Nr. 2, S. 84 – 94, Februar 2000.
- [296] J. Yates, J. Lacey, D. Everitt, M. Summerfield, „Limited-range wavelength translation in all-optical networks“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM '96*, Bd. 3, S. 954 – 961, März 1996.

- 
- [297] J. Yates, M. P. Rumsewicz, J. P. R. Lacey, „Wavelength converters in dynamically-reconfigurable WDM networks“, *IEEE Communications Surveys*, <http://www.comsoc.org/pubs/surveys>, Second Quarter 1999.
- [298] Y. Ye, S. Dixit, M. Ali, „On joint protection/restoration in IP-centric DWDM-based optical transport networks“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 38, Nr. 6, S. 174 – 183, Juni 2000.
- [299] H. Zang, J. P. Jue, B. Mukherjee, „A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength routed optical WDM networks“, *Optical Networks Magazine*, Bd. 1, Nr. 1, S. 47 – 60, Januar 2000.
- [300] X. Zhang, C. Qiao, „Wavelength assignment for dynamic traffic in multi-fiber WDM networks“, *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN '98)*, S. 479 – 485, Oktober 1998.
- [301] Z. Zhang, A. S. Acampora, „Performance analysis of multihop lightwave networks with hot potato routing and distance-age-priorities“, *IEEE Transactions on Communications*, Bd. 42, Nr. 8, S. 2571 – 2581, August 1994.
- [302] Z. Zhang, D. Guo, A. Acampora, „Logarithmically scalable routing algorithms in large optical networks“, *Journal of High Speed Networks*, Bd. 4, Nr. 1, S. 27 – 40, 1995.
- [303] Y. Zhu, G. N. Rouskas, H. G. Perros, „Blocking in wavelength routing networks, part I: the single path case“, *Proceedings of the IEEE INFOCOM '99*, Bd. 1, S. 321 – 328, März 1999.
- [304] Y. Zhu, G. N. Rouskas, H. G. Perros, „Blocking in wavelength routing networks, part II: mesh topologies“, *Proceedings of the International Teletraffic Congress - ITC-16*, S. 1321 – 1330, Juni 1999.
- [305] Y. Zhu, G. N. Rouskas, H. G. Perros, „A comparison of allocation policies in wavelength routing networks“, *Photonic Network Communications*, Bd. 2, Nr. 3, S. 267-295, August 2000.

# Anhang

## Anzahl von Wegen und Pfaden in optischen Netzen

In diesem Abschnitt wird für einige Szenarien die Anzahl der möglichen Wege und optischen Pfade zwischen einem Knotenpaar in einem WDM-Netz bestimmt. Wie in Abschnitt 2.2.1.3 definiert, bezeichnet *Pfad* dabei die Kombination von geographischem Weg und einer Wellenlänge auf jedem Abschnitt dieses Weges. Daraus folgt, dass die Anzahl der möglichen Wege unabhängig von der Konversionsfähigkeit im Netz ist, was für die Anzahl der möglichen Pfade nicht gilt. Letztere hängt prinzipiell von folgenden Parametern ab:

- Netztopologie (Anzahl der Knoten sowie Vermaschung des Netzes) sowie Lage der Knoten zueinander
- Anzahl der Fasern auf jedem Netzabschnitt
- Anzahl der WDM-Kanäle auf jeder Faser
- Konversionsmöglichkeit in den Netzknoten
- beschränkende Parameter (z. B. maximale Pfadlänge)

Nachfolgend soll an Hand einiger einfacher Beispiele gezeigt werden, welche große Vielfalt an Pfaden sich bereits bei relativ kleinen Netzen ergibt. Es werden zwei Beispieltopologien getrennt untersucht, da die Topologie einen starken Einfluss hat: ein vollvermaschtes Netz und ein Ringnetz als Beispiele für Netze mit sehr vielen bzw. sehr wenigen Wegmöglichkeiten zwischen zwei Knoten. Es werden folgende Annahmen zur Vereinfachung der Analyse gemacht:

- Die Anzahl der Fasern ist für alle Netzabschnitte identisch.
- Die Anzahl der Wellenlängen wird für alle Fasern im Netz gleich angenommen.
- Für die Konversionsmöglichkeit werden die beiden Grenzfälle WI (volle Konversion) und WR (keine Konversion) berücksichtigt, die hinsichtlich der Anzahl möglicher Pfade alle Varianten partieller Konversion einschließen.

- Weitere beschränkende Parameter werden nicht betrachtet. Diese führen meist zu einer Reduktion der Möglichkeiten, erschweren aber häufig die Berechnungen zur Auswahl eines Weges, so dass nicht notwendigerweise eine deutliche Komplexitätsreduktion für ein Verkehrslenkungsverfahren erfolgt.

Die Beispiele zeigen, dass eine vollständige Absuche aller Pfadmöglichkeiten durch ein Verkehrslenkungsverfahren nur in Ausnahmefällen möglich sein wird. Zum Vergleich wird auch die Anzahl der möglichen Wege angegeben. Diese Werte liegen in den meisten Fällen deutlich unter der Anzahl möglicher optischer Pfade und repräsentieren weitgehend die Komplexität bei elektronisch vermittelnden Netzen.

Es wird folgende Notation verwendet:

$N$	Anzahl der Knoten im Netz
$f$	Anzahl der Fasern pro Netzabschnitt und Richtung (für alle Abschnitte gleich)
$w$	Anzahl der Wellenlängen pro Faser (für alle Fasern gleich). Durch $w = 1$ wird der Fall eines Netzes ohne WDM erfasst.
$r_l$	Anzahl der Wege (Routen) mit genau $l$ Abschnitten. Jeder Netzabschnitt kann dabei maximal einmal von einem Weg verwendet werden.
$r_{ges}$	Gesamtanzahl der Wege zwischen den Knoten $K_i$ und $K_j$ , für $i, j \in \{1, \dots, N\}$ und $i \neq j$
$p_{ij}$	Anzahl der Pfade zwischen den Knoten $K_i$ und $K_j$ , für $i, j \in \{1, \dots, N\}$ und $i \neq j$

## A.1 Anzahl möglicher Wege und Pfade für ein Knotenpaar bei vollvermaschten Netzen

Eine Vollvermaschung erlaubt die größte Anzahl von Wegen zwischen einem Knotenpaar und stellt damit eine Abschätzung für die maximale Komplexität der Wegesuche in realistisch vermaschten Netzen dar.

### A.1.1 Anzahl der Wege bei Vollvermaschung

Die Anzahl der Wege bei Vollvermaschung errechnet sich wie folgt: für  $N \geq 3$  Knoten gibt es jeweils einen Weg mit Länge 1 sowie

$$r_l = \prod_{k=2}^l (N - k) \quad \forall l \text{ mit } 2 \leq l \leq N - 1 \quad (\text{A.1})$$

Wege mit Länge  $l$ . Damit ergibt sich die Gesamtanzahl von Wegen zwischen einem Knotenpaar zu:

$$r_{ges} = 1 + \sum_{l=2}^{N-1} \left( \prod_{k=2}^l (N-k) \right) \quad (\text{A.2})$$

### A.1.2 Anzahl der Pfade im WR-Fall

Ohne Konversion gibt es  $f \cdot w$  Möglichkeiten für die Wahl eines Kanals auf dem ersten Abschnitt. Für jeden weiteren Abschnitt gibt es  $f$  Möglichkeiten, da nur noch die Faser gewählt werden kann und die Wellenlänge unverändert bleibt. Somit ergibt sich  $p_{ij}$  zu

$$\lambda_{ij} = f \cdot w \left( 1 + \sum_{l=2}^{N-1} \left( f^{l-1} \prod_{k=2}^l (N-k) \right) \right) \quad (\text{A.3})$$

### A.1.3 Anzahl der Pfade im WI-Fall

Da für jeden Abschnitt  $f \cdot w$  Möglichkeiten zur Wahl eines Kanals bestehen, ergibt sich für die Anzahl von Pfaden zwischen zwei Knoten im WI-Fall:

$$\lambda_{ij} = f \cdot w + \sum_{l=2}^{N-1} \left( (f \cdot w)^l \prod_{k=2}^l (N-k) \right) \quad (\text{A.4})$$

Aus dieser Formel wird deutlich, dass bei einem WI-Netz nur das Produkt  $f \cdot w$  entsprechend der Kanalzahl pro Netzabschnitt entscheidend ist. Wie sich diese Zahl auf  $f$  und  $w$  aufteilt, spielt keine Rolle.

### A.1.4 Beispiele

Tabelle A.1 zeigt einige Beispielwerte für die Anzahl der entstehenden Weg- und Pfadalternativen. Die Zahlenwerte erlauben folgende Schlussfolgerungen:

- Bereits für relativ kleine Beispielnetze übersteigt die Zahl der Wegemöglichkeiten die in vertretbarer Zeit absuchbaren Varianten bei weitem, die Anzahl der Pfade ist noch deutlich größer (zum Vergleich: bei einem geschätzten Alter der Erde von 15 Mrd. Jahren sind bisher „erst“ etwa  $4,7 \cdot 10^{20}$  Sekunden vergangen; basierend auf heutigen Kenntnissen lässt sich die Anzahl der Atome im beobachtbaren Universum zu maximal  $10^{80}$  Atome abschätzen).
- Die Anzahl der Wege entspricht der Anzahl der Pfade für  $f = 1$  und  $w = 1$ ; dabei gibt es auch keinen Unterschied zwischen WI und WR.

- Ein WR-Netz mit  $w = 1$  entspricht einem WI-Netz mit der Kanalzahl  $n = f \cdot w$  (in der Tabelle für  $f \cdot w = 8$  Kanäle).

**Tabelle A.1:** Anzahl von Wegen und Pfaden bei Vollvermaschung

Knoten			3	5	8	10	50	100
Anzahl Wege			2	16	1957	109601	$3,37 \cdot 10^{61}$	$2,56 \cdot 10^{154}$
Anzahl Pfade	WR	$f = 1,$ $w = 8$	16	128	15656	876808	$2,70 \cdot 10^{62}$	$2,05 \cdot 10^{155}$
		$f = 8,$ $w = 1$	72	27848	$1,71 \cdot 10^9$	$6,13 \cdot 10^{12}$	$2,51 \cdot 10^{105}$	$2,72 \cdot 10^{243}$
		$f = 8,$ $w = 8$	576	222784	$1,37 \cdot 10^{10}$	$4,91 \cdot 10^{13}$	$2,01 \cdot 10^{106}$	$2,18 \cdot 10^{244}$
	WI	$f = 1,$ $w = 8$	72	27848	$1,71 \cdot 10^9$	$6,13 \cdot 10^{12}$	$2,51 \cdot 10^{105}$	$2,72 \cdot 10^{243}$
		$f = 8,$ $w = 1$	72	27848	$1,71 \cdot 10^9$	$6,13 \cdot 10^{12}$	$2,51 \cdot 10^{105}$	$2,72 \cdot 10^{243}$
		$f = 8,$ $w = 8$	4160	$1,02 \cdot 10^8$	$3,21 \cdot 10^{15}$	$7,38 \cdot 10^{20}$	$4,01 \cdot 10^{149}$	$6,21 \cdot 10^{332}$

## A.2 Anzahl möglicher Wege und Pfade für ein Knotenpaar bei bidirektionalen Ringnetzen

Da bei einem bidirektionalen Ring nur zwei Wege zwischen einem Knotenpaar möglich sind, stellt dieser Fall eine untere Schranke für Netze dar, bei denen Wegesuchverfahren sinnvoll einsetzbar sind. Im Unterschied zum vollvermaschten Netz hängt die Anzahl möglicher Pfade von der sogenannten *Distanz* der betrachteten Knoten ab, wobei die Distanz wie folgt definiert wird:

$d_{ij}$  Distanz zwischen den Knoten  $K_i$  und  $K_j$ , ausgedrückt als Anzahl der Verbindungsabschnitte entlang des kürzest möglichen Weges ( $1 \leq d_{ij} \leq \lfloor N/2 \rfloor$ )

### A.2.1 Anzahl der Wege bei einem bidirektionalen Ringnetz

Die Anzahl der Wege bei einem bidirektionalen Ringnetz beträgt zwei, wobei der kürzere Weg die Länge  $d_{ij}$  und der längere Weg die Länge  $N - d_{ij}$  hat (gemessen als Anzahl der Abschnitte).

## A.2.2 Anzahl der Pfade im WR-Fall

Ohne Konversion gibt es  $f \cdot w$  Möglichkeiten für die Wahl eines Kanals auf dem ersten Abschnitt. Für jeden weiteren Abschnitt gibt es  $f$  Möglichkeiten, da nur noch die Faser gewählt werden kann und die Wellenlänge unverändert bleibt. Somit ergibt sich  $p_{ij}$  zu

$$p_{ij} = f \cdot w \cdot f^{d_{ij}-1} + f \cdot w \cdot f^{N-d_{ij}-1} = w \cdot f^{d_{ij}} \cdot (1 + f^{N-2d_{ij}}) \quad (\text{A.5})$$

## A.2.3 Anzahl der Pfade im WI-Fall

Da für jeden Abschnitt  $f \cdot w$  Möglichkeiten zur Wahl eines Kanals bestehen, ergibt sich für die Anzahl von Pfaden zwischen zwei Knoten im WI-Fall:

$$p_{ij} = (f \cdot w)^{d_{ij}} + (f \cdot w)^{N-d_{ij}} = (fw)^{d_{ij}} \cdot (1 + (fw)^{N-2d_{ij}}) \quad (\text{A.6})$$

## A.2.4 Beispiele

Folgende Tabelle zeigt einige Beispielwerte für die Anzahl der entstehenden Weg- und Pfadalternativen zwischen einem Knotenpaar. Im Unterschied zur Vollvermaschung spielt nun der Abstand der betrachteten Knoten ebenfalls eine Rolle. Es werden deshalb jeweils die beiden Grenzfälle „Nachbarknoten“ ( $d_{ij} = 1$ ) sowie „gegenüberliegende Knoten“ ( $d_{ij} = \lfloor N/2 \rfloor$ ) betrachtet.

**Tabelle A.2:** Anzahl von Wegen und Pfaden bei einem bidirektionalen Ringnetz

Knoten		3		5		8		10		50		100	
$d_{ij}$		1	1	2	1	4	1	5	1	25	1	50	
Anzahl Wege		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Anzahl Pfade	WR	$f = 1, w = 8$	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	
		$f = 8, w = 1$	72	4104	576	$2,1 \cdot 10^6$	8192	$1,3 \cdot 10^8$	65536	$1,8 \cdot 10^{44}$	$7,6 \cdot 10^{22}$	$2,5 \cdot 10^{89}$	$2,9 \cdot 10^{45}$
		$f = 8, w = 8$	576	32832	4608	$1,7 \cdot 10^7$	65536	$1,1 \cdot 10^9$	524288	$1,4 \cdot 10^{45}$	$6 \cdot 10^{23}$	$2 \cdot 10^{90}$	$2,3 \cdot 10^{46}$
	WI	$f = 1, w = 8$	72	4104	576	$2,1 \cdot 10^6$	8192	$1,3 \cdot 10^8$	65536	$1,8 \cdot 10^{44}$	$7,6 \cdot 10^{22}$	$2,5 \cdot 10^{89}$	$2,9 \cdot 10^{45}$
		$f = 8, w = 1$	72	4104	576	$2,1 \cdot 10^6$	8192	$1,3 \cdot 10^8$	65536	$1,8 \cdot 10^{44}$	$7,6 \cdot 10^{22}$	$2,5 \cdot 10^{89}$	$2,9 \cdot 10^{45}$
		$f = 8, w = 8$	4160	$1,7 \cdot 10^7$	266240	$4,4 \cdot 10^{12}$	$3,4 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^{16}$	$2,1 \cdot 10^9$	$3,2 \cdot 10^{88}$	$2,9 \cdot 10^{45}$	$6,5 \cdot 10^{178}$	$4,1 \cdot 10^{90}$

Die Werte der Tabelle bestätigen die für ein vollvermaschtes Netz gezogenen Schlüsse. Obwohl sich durch die stark reduzierte Anzahl an Wegen die Problemkomplexität ebenfalls deutlich reduziert, ergibt sich auch für relativ kleine Netze (sowohl hinsichtlich der Knotenzahl als auch hinsichtlich der Anzahl von Fasern und WDM-Kanälen) eine sehr große Menge an Pfadmöglichkeiten. Diese macht eine vollständige Absuche aller Möglichkeiten in der Praxis unmöglich.

# Lebenslauf

von Jan Späth, geboren am 29. Juli 1970 in Sulz am Neckar, verheiratet, 2 Kinder.

- 1976 – 1980 Besuch der Grundschule in Dornhan
- 1980 – 1989 Besuch des Albeck–Gymnasiums in Sulz am Neckar  
Abschluss mit der allgemeinen Hochschulreife
- 1989 – 1994 Studium der Elektrotechnik an der Universität Stuttgart,  
Studienmodell „Prozessautomatisierung und Regelungstechnik“  
Abschluss als Diplom–Ingenieur
- 1995 – 1998 Lehrauftrag an der Berufsakademie Stuttgart für das Fach  
„Rechnerkommunikation“ im Studiengang Elektrotechnik  
(Vertiefungsrichtung Nachrichtentechnik)
- 1994 – 2000 Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Stuttgart,  
Institut für Kommunikationsnetze und Rechnersysteme (vorheriger Name:  
Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung)
- seit 2001 Mitarbeiter der Marconi Communications GmbH, Bereich *Network  
Strategy* innerhalb von *Optical Networks*, Backnang

Herrn Professor Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Paul J. Kühn danke ich ganz herzlich für die Möglichkeit, diese Arbeit an seinem Institut durchzuführen. Seine Unterstützung wie auch die von ihm gewährten Freiräume waren Voraussetzung einer erfolgreichen Forschungsarbeit.

Meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen vom Institut für Kommunikationsnetze und Rechnersysteme (vormals „Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung“) und allen Studenten, mit denen ich gemeinsam arbeiten durfte, möchte ich für das hervorragende Arbeitsklima und die gute Zusammenarbeit danken.

Besonders bedanke ich mich bei meinem Kollegen Stefan Bodamer, der durch wertvolle Diskussionen und durch die tatkräftige Unterstützung bei der Erstellung der erforderlichen Programmwerkzeuge zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.