

Bottom-up Kostenrechnungsmodell
zur Ermittlung der Kosten der
Zusammenschaltung im

Festnetz

Modellbeschreibung

Autoren:

Prof. Klaus D. Hackbarth

Dr. Gabriele Kulenkampff

Dr. Werner Neu

Dr. Thomas Plückebaum

WIK-Consult GmbH

Rhöndorfer Str. 68

53604 Bad Honnef

Bad Honnef, 25. Juli 2012

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einführung	1
1.1 Gegenstand und Zielsetzung	1
1.2 Aufbau des Dokuments	2
2 Methodischer Ansatz	4
2.1 Generischer Modellierungsansatz	4
2.2 Schichtorientierte Netzarchitektur - elementorientierter Ansatz	6
2.3 Ebenen-orientierte Netzarchitektur	8
2.4 Nachfrage und Netzsegmente	11
2.5 Abgrenzung gegenüber dem Zugangnetz (NGA)	13
2.6 Netzwerkplanung	17
3 Nachfragemodellierung	21
3.1 Nachfrage und QoS-Differenzierung	23
3.2 Informationsanforderungen an Verkehrsdaten	24
3.3 Bottom-up Bestimmung der Verkehrsnachfrage	31
3.3.1 Nutzertypen	35
3.3.2 Dienstmodell	35
3.3.3 Berechnung der Verkehrsnachfrage	40
3.4 Berücksichtigung von IP-TV im Breitbandkostenmodell	45
3.4.1 IP-TV – Outband	45
3.4.2 IP-TV – Inband	47
3.5 Spezifische Layer 2, Layer 1 und Layer 0 Nachfrage	49
3.5.1 Kapazitätsnachfrage auf Layer 2 und Layer 1	50
3.5.2 Nachfrage nach unbeschalteter Glasfaser (Layer 0)	51
3.5.3 Berücksichtigung der Kapazitätsnachfrage aus dem Mobilfunknetz	51
3.6 Zusammenfassung	53

4	Netzgestaltung und Dimensionierung	54
4.1	Entwurf der Netzhierarchie	55
4.2	Logische Netzstruktur und Verkehrsführung	60
4.2.1	Konzentrationsnetz	61
4.2.2	Kernnetz	65
4.2.3	Verkehrsführung von und zu Zusammenschaltungspunkten	72
4.3	Redundanzen in logischer und physikalischer Netzstruktur	75
4.4	Netzdimensionierung	80
4.4.1	Dimensionierung und QoS-Realisierungsform	80
4.4.2	Dimensionierung von Knoten und Kanten	81
5	Physikalisches Netz und seine Beziehungen zum logischen Netz	87
5.1	Stand der Entwicklung der Systeme für das physikalische Netz	91
5.1.1	SDH/SONET	92
5.1.2	Next Generation-SDH (NG-SDH)	95
5.1.3	Wellenlängen Multiplex	97
5.1.4	Optisches Transportnetz (OTN)	98
5.1.5	Ethernet und IP over DWDM	101
5.2	Anwendung der Architekturen im Breitband-Kostenmodell	103
5.3	Topologische Aspekte für das physikalische Netz	104
5.3.1	Topologie und Verbindungs-Führung im Konzentrationsnetz sowie in den hierarchischen Segmenten des Kernnetzes	105
5.3.2	Topologie und Verbindungs-Führung im Ring sowie im vermaschten Kernnetz	106
5.3.3	Schichten im physikalischen Netz	108
6	Kontrollschicht	110
6.1	NGN und IMS	111
6.2	Next Generation Internet (NGI)	114
6.3	NGN und NGI im Kostenmodell	116
6.3.1	Allgemeine Funktionselemente im Breitbandnetz	117
6.3.2	Funktionselemente für Sprache (sog. spezifische Funktionselemente)	118
6.3.3	Grafische und tabellarische Darstellung der Funktionselemente und Kostentreiber im Breitbandnetz	120

7 Systemzuweisung, Investitionswertbestimmung und Kostenberechnung	122
7.1 Ableitung eines generischen Equipments für Einrichtungen des logischen und physikalischen Netzes	122
7.1.1 Systemparameter	122
7.1.2 Preisparameter	127
7.2 Systemzuweisung und Investitionswertbestimmung für das logische Netz	128
7.2.1 Teilnehmeranschließendes Equipment im MPoP – Systemzuweisung und Abgrenzung gegenüber dem NGA	129
7.2.2 Ebene 0 – Systemzuweisung	132
7.2.3 Ebene 1 und Ebene 2 – Systemzuweisung	133
7.2.4 Ebene 3 – Systemzuweisung	135
7.2.5 Ebene 4 und Ebene 5 – Systemzuweisung	137
7.3 Systemzuweisung und Investitionswertbestimmung für das physikalische Netz	139
7.3.1 Systemzuweisung und Investitionswertbestimmung in Ringtopologien	139
7.3.2 Systemzuweisung und Investitionswertbestimmung in vermaschten Topologien (flache Kernnetzebene)	144
7.4 Systemzuweisung bei Verzicht auf Layer 1 Systeme (Transportnetz)	144
7.5 Systemzuweisung und Investitionswertbestimmung für die Kontrollschicht	151
7.6 Ermittlung der netzbezogenen Kosten für eine Sprachminute	153
7.6.1 Annualisierte Capex	153
7.6.2 Indirekte Invest, OPEX und Gemeinkosten	156
7.6.3 Bestimmung der Gesamtkosten und Kosten für einen Dienst	158
8 Merkmale des Software-Tools	162
9 Abschließende Bemerkungen	163
Literaturverzeichnis	164
Anhang 1	166
Anhang 2: Kostentreiber	168

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Schematische Darstellung eines TELRIC-Modells zur Kostenberechnung in Telekommunikationsnetzen	5
Abbildung 2-2:	Hierarchische, ebenen-orientierte Netzstruktur eines NGN, Beispiel mit 5 Netzebenen	10
Abbildung 2-3:	Netzsegmente im Festnetz	11
Abbildung 2-4:	Heterogenität der Länge der dedizierten Anschlussleitung im NGA	14
Abbildung 2-5:	NGA-Architekturen und ihre Realisierung im MPoP	15
Abbildung 2-6:	MPoP als Standort der untersten Netzebene im Konzentrationsnetz	17
Abbildung 3-1:	Verkehrsmatrix für einen MPoP (jeweils für up- und downstream)	30
Abbildung 3-2:	Das CASUAL-Model mit seiner Anwendung auf derzeitige Werte aus den Attribut-Trippeln	34
Abbildung 3-3:	Beispiel für Online-Nutzung (Deutschland)	36
Abbildung 3-4:	Korrelation zwischen Bandbreitanforderung eines Dienstes und seiner Multimedialität	37
Abbildung 3-5:	Traffic Transformation Function	48
Abbildung 3-6:	Illustration der Multicastströme im logischen Netz	49
Abbildung 3-7:	Kapazitätsnachfrage auf Layer 1 und abgeleitete Kapazitätsnachfrage aus Layer 2 und Layer 3	50
Abbildung 4-1:	Modellierungsrahmen Netzstruktur	55
Abbildung 4-2:	Nachfragegetriebene Netzmodellierung	57
Abbildung 4-3:	Modellendogene Netzstrukturen im Konzentrationsnetz: Mischformen bei der Clusterbildung	59
Abbildung 4-4:	Flaches Kernnetz	60
Abbildung 4-5:	Sternstruktur im 3- und 2-Ebenen Konzentrationsnetz	62
Abbildung 4-6:	Sternstruktur und Schwellwert abhängige Vermaschung: 2-Ebenen-Konzentrationsnetz und Verkehrsmatrix	64
Abbildung 4-7:	Einrichtungen im 3-Ebenen-Kernnetz (IP-Kernnetz)	68
Abbildung 4-8:	Logische Netzstruktur eines hierarchischen 3-Ebenen Kernnetzes	69
Abbildung 4-9:	Einsatz von LSR im Ring	71
Abbildung 4-10:	Logische Netzstruktur der obersten Kernnetzebene	72
Abbildung 4-11:	Ring als Grundform der Mehrwegeführung am Beispiel des 2-Ebenen Konzentrationsnetzes	76

Abbildung 4-12: Doppelung von logischen Einrichtungen im 3-Ebenen-Konzentrationsnetz auf Ebene 1 und 2	77
Abbildung 4-13: Doppelung von technischen Einrichtungen des physikalischen Netzes (Px)	78
Abbildung 4-14: Standortabsicherung: Clusterbildung bei Einfach- und Doppelanbindung am Beispiel eines zwei Ebenen Konzentrations- und Kernnetzes	79
Abbildung 5-1: Grundsätzliche Funktionen der physikalischen Transportschicht und ihrer zugehörigen Netzelemente	88
Abbildung 5-2: Abbildung einer Sternstruktur aus der logischen Netzschicht auf eine Ringtopologie in der physikalischen Netzschicht	90
Abbildung 5-3: Zeitmultiplex – allgemeine Darstellung	92
Abbildung 5-4: Traditionelles Schichtenmodell eines nationalen Netzbetreibers	94
Abbildung 5-5: Protokolle des NG-SDH und deren Realisierung in Form von MultiService Switch Plattform (MSSP)-Einrichtungen	96
Abbildung 5-6: Optisches Multiplexen (Frequenzmultiplex)	97
Abbildung 5-7: Signalstruktur des OTN	99
Abbildung 5-8: Schichten bei Führung der Bandbreitenanforderungen aus den logischen Netzen direkt über optische Träger	103
Abbildung 5-9: Cluster (a) und Ringbildung im Cluster auf Basis des Kleeblatt-Algorithmus (b)	106
Abbildung 5-10: Beispiel für eine logische Netzstruktur (a) und deren zugehörige physikalische Topologie (b) im flachen Kernnetz	107
Abbildung 6-1: Entwicklung der Dienste und Kontrollschicht von traditionellen Netzen zum NGN/IMS	112
Abbildung 6-2: Übersicht über die wichtigsten Funktionsblöcke des IMS und deren Verknüpfung mit den darüber- und darunterliegenden Schichten, und externen Netzen	113
Abbildung 6-3: Einrichtung der Kontrollschicht	120
Abbildung 7-1: Plug-In-Unit (PIU) mit Schnittstellenkarten und Ports	124
Abbildung 7-2: Teilnehmeranschließendes Equipment am Beispiel der DSL-Technologie bei unterschiedlich großen MPoP-Standorten	131
Abbildung 7-3: Dimensionierung eines Netzknotens der Ebene 0	133
Abbildung 7-4: Dimensionierung eines Netzknotens der Ebenen 1 oder 2	134
Abbildung 7-5: Interne Verbindung zwischen Ebene 2 und 3 in einem IP-PoP	135

Abbildung 7-6:	Dimensionierung eines Netzknotens der Ebene 3 (LER) im Kontext mit dem kolokierten Ebene 2 Knoten	137
Abbildung 7-7:	Dimensionierung eines Netzknotens der Ebenen 4/ 5 (LSR) im Kontext mit dem kolokierten Ebene 3 Knoten (LSR)	138
Abbildung 7-8:	Schematischer Aufbau eines xADM bzw. ROADM	141
Abbildung 7-9:	Zusammenspiel von Kapazitäten von Layer 2/3 Einrichtungen zu Layer 1 Einrichtungen	142
Abbildung 7-10:	Auswahl des Kabeltyps und zu berücksichtigende Größen	143
Abbildung 7-11:	Individual Ring, Layer 2/ 3 ohne Transportschicht	145
Abbildung 7-12:	Common Ring, Layer 2/ 3 ohne Transportschicht	146
Abbildung 7-13:	Individual Ring 6 Level Modellarchitektur	147
Abbildung 7-14:	Individual Ring Level 5 Knotenstandort und Anbindung an untere Ebenen	148
Abbildung 7-15:	Individual Ring Konzentrationsnetz	149
Abbildung 7-16:	Common Ring Konzentrationsnetz	149
Abbildung 7-17:	Ethernet mit Transportschicht im Konzentrationsnetz	150
Abbildung 7-18:	Schnittstellen am Media Gateway	152
Abbildung 7-19:	Zuschläge für indirektes Invest, OPEX und Gemeinkosten und Bestimmung der Gesamtkosten	156
Abbildung 7-20:	Rechenweg über indirekte Investitionen, OPEX und Gemeinkosten zur Bestimmung der Gesamtkosten	158
Abbildung 7-21:	Beispiel für Tagesverkehrskurven eines NGN für Sprach- und sonstigen Breitbandverkehr	159
Abbildung 8-1:	Excel Interface und eingebettetes Netzplanungsmodul	162

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Schichten in einem NGN-Verbindungsnetz	6
Tabelle 2-2:	Standorte der unterschiedlichen Netzebenen und ihr Funktionsumfang	8
Tabelle 3-1:	Nachfragematrix eines Anschlusstyps, gegliedert nach Nutzerarten und Diensten, hier in Erlang zur Busy hour	27
Tabelle 3-2:	Beschreibung einer möglichen Klassifikation von Nutzertypen	35
Tabelle 3-3:	Numerische Beschreibung von Diensten	38
Tabelle 3-4:	Dienstekategorien im vereinfachtem Dienstmodell und ihre zugehörigen Attributwerte	40
Tabelle 3-5:	Beispiel für eine Verkehrszuweisung je Nutzer und Dienstkategorie in Erlang/Busy Hour	42
Tabelle 3-6:	Bandbreitenwerte [kbps] je Nutzer in der Busy Hour entsprechend den Beispielwerten aus Tabelle 3-4 und Tabelle 3-5	43
Tabelle 3-7:	Beispiel für die Bandbreiten (downstream) an einem MPoP nach Nutzertypen bzw. Dienstkategorien, Werte in [Mbps/Busy Hour]	44
Tabelle 3-8:	Durchschnittlicher Kostenanteil von IP-TV je betroffenen Ring	46
Tabelle 3-9:	Anteil der Ringe mit IP-TV je Netzsegment	46
Tabelle 3-10:	Reduktionsfaktoren für die Layer 0 Kosten bei Berücksichtigung von IP-TV	46
Tabelle 4-1:	Optionen für die logische Struktur eines 3-Ebenen Netzes	67
Tabelle 4-2:	Beispiel für Zusammenschaltungsszenarien in einem 3-Ebenen-Konzentrations- und 2-Ebenen-Kernnetz	73
Tabelle 4-3:	Relative Werte für die Verkehrsverteilung bei Doppelanbindung an einem bzw. zwei Standorten (Auslastung)	79
Tabelle 4-4:	Dienste-/Verkehrsklassen-Matrix	83
Tabelle 5-1:	Entwicklung der Übertragungssysteme	89
Tabelle 5-2:	Virtuelle Container und ihre Verkettung im SDH	93
Tabelle 5-3:	Zusammenfassende Darstellung der Protokolle des NGN-SDH	95
Tabelle 5-4:	Vergleich der Kapazitätsausnutzung zwischen NG-SDH (vc) und SDH/SONET (cc)	96
Tabelle 5-5:	Derzeitige OTN Einrichtungen und ihre Ethernet-Schnittstellen	100
Tabelle 6-1:	Kontrollschicht-Szenarien in Koordination zwischen der logischen– und physikalischen Ebene	114

Tabelle 6-2:	Kostentreiber der Einrichtungen der Kontrollschicht	121
Tabelle 7-1:	Verschiedene Typen von ADM-Einrichtungen	140
Tabelle 7-2:	Parametrierung indirekter Investitionen	157
Tabelle A1-1:	Implementierte Varianten der Realisierung des logischen und physikalischen Netzes	167
Tabelle A2-1:	Kostentreiber Layer 2/3	168
Tabelle A2-2:	Kostentreiber Layer 1	168
Tabelle A2-3:	Kostentreiber Layer 0	168
Tabelle A2-4:	Kostentreiber Kontrollschicht	169

Abkürzungsverzeichnis

3GPP	3rd Generation Partnership Project
A	jährliche Amortisationsrate
ACCC	Australian Competition and Consumer Commission
ADM	Add-Drop-Multiplexer
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AP	Application
AS	Application Server
ASON	Automatic Switched Optical Network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
B	mittlere Bandbreite
BGCF	Breakout Gateway Control Function
BDF	Bidirectional Forwarding Detection
BH	busy hour
BNetzA	Bundesnetzagentur
BRAS	Broadband Remote Access Server
BTS	Base Transceiver Station
BU	Bottom-Up
BW	Bandbreite (bandwidth)
CAPEX	Capital Expenditure
CC	Crossconnect
CCSSn°7	Common Channel Signalling System #7
COPS	Common Open Policy Server Protocol (RFC 2748)
CSCF	Call State Control Function
DCX	Digital Crossconnector
Δg	prognostizierte durchschnittliche Änderungsrate der Auslastung der Anlage während ihrer wirtschaftlichen Lebensdauer
Δp	durchschnittliche erwartete Veränderungsrate im Preis der Anlage (als Modern Equivalent Asset) während ihrer wirtschaftlichen Lebensdauer
DiffServ	Differentiated Services
DNS	Domain Name System
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex
ETSI	European Telecommunications Standards Institute

EU	Europäische Union	
EVPL	Ethernet Virtual Private Line	
EVPLAN	Ethernet Virtual Private LAN	
FGI	Future Generation Internet	
FR	Frame Relay	
FRR	Fast Reroute	
FTR	Fixed Termination Rate	
FTTx	Fibre to the x	
FTTEx	Fibre to the Exchange	
FTTC	Fibre to the Cabinet	
FTTB	Fibre to the Building	
FTTH	Fibre to the Home	
FTTH P2P	Fibre to the Home Point to Point	
GbE	Gigabit Ethernet	
Gbps	Gigabit per second	
GFP	Generic Frame Procedure	
Ggf.	Gegebenenfalls	
GGSN	Gateway GPRS Support Node	
GMPLS	Generalized Multiprotocol Label Switching	
GoS	Grade of Service	
GPON	Gigabit Passive Optical Network	
G.SHDSL	Global Standard Single-Pair High-speed Digital Subscriber Line	
GSM	Global System for Mobile communication	
HDTV	High Definition Television	
HSS	Home Subscriber Server	
HVt	Hauptverteiler	
/	Investition	
<i>i</i>	Zinssatz	
IC	Interconncetion	
IETF	Internet Engineering Task Force	IMS IP Multimedia System
IM MGW	IP Multimedia Gateway	
IMS	IP Multimedia Subsystem	
IP	Internet Protocol	
IPoDWDM	IP over Dense Wavelength Division Multiplex	
IPoOTN	IP over Optical Transport Network	

IPoSDH	IP over Synchronous Digital Hierarchy
IPTV	Internet Protocol Television
ISDN	Integrated Services Digital Network
kBit/s	kilobit pro Sekunde
Kbps	kilobit pro Sekunde
KVZ	Kabelverzweiger
λ	mittlere Paketrate (lambda)
LAN	Local Area Network
LE	Large Enterprise
LER	Label Edge Router
LSP	Label Switched Path
LSR	Label Switch Router
LRIC	Long Run Incremental Cost
MPLS	Multiprotocol Label Switching
MPLS-TE	Multiprotocol Label Switching Traffic Engineering
MPLS-TP	Multiprotocol Label Switching Transport Profile
MPoP	Metropolitan Point of Presence
MGCF	Media Gateway Control Function
MRFC	Media Research Function Controller
MRFP	Media Research Function Processor
MSC	Mobile Switching Center
MTR	Mobile Termination Rate
Mux	Multiplexer
NASS	Network Attachment Subsystem
NGA	Next Generation Access
NGI	Next Generation Internet
NGN	Next Generation Network
NG-SDH	Next Generation SDH
n	wirtschaftliche Lebensdauer
O_i	Opex für den Anlagentyp i ,
OADM	Optical Add-Drop-Multiplexer
OAM	Operations, Administration, Maintenance
OCh	Optical Channel
OCX	Optical Crossconnect
ocf_i	Faktor, der Opex als Anteil am Investitionswert des Anlagentyps i bestimmt

ODU	Optical Data Unit
OMS	optische Multiplex-Schicht / Optical Multiplex Section
ONU	Optical Network Unit
OPEX	Operational Expenditure
OSI	Open Systems Interconnection
OTN	Optisches Transportnetz / Optical Transport Network
OTS	optische Transportschicht / Optical Transmission Section
OTU	Optical Transport Unit
OXC	optischer Crossconnector
P2P	Peer to Peer
P-CSCF	Proxy Call State Control Function
PBX	Public Branch Exchange (Nebenstellenanlage)
PDF	Policy Decision Function
PLMN	Public Land Mobile Network
PoI	Point of Interconnection
PON	Passive Optical Networks
PoP	Point of Presence
PSTN	Public Switched Telephone Network
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RACS	Resource and Administration Control subsystem
ReADSL	Reach Extended Asymmetric Digital Subscriber Line
RFC	Request for Comments
RFoG	Radio Frequency over Glass
ROADM	Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer
RSVP	Resource Reservation Protocol
RTCP	RealTime Control Protocol
RTP	Real-Time Transport Protocol
RTR	Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDP	Session Description Protocol
SEG	Security Gateway
S-GMPLS	segmented GMPLS
SGSN	Service GPRS Support Node
SGW	Signaling Gateway

SIP	Session Initiation Protocol
SME	Small Medium Enterprise
SOHO	Small Offices Home Offices
SONET	Synchronous Optical Network
STM	synchrones Transportmodul
STV	Standard Television
TCM	Tandem Correction Monitoring
TDM	Time Division Multiplexing
TCP	Transmission Control Protocol
TE	Total Element
TISPAN	Telecommunications and Internet converged Services and Protocols for Advanced Networking
TSP	Travelling Salesman Problem (Algorithmus)
TELRIC	Total Element Long Run Incremental Cost
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VDSL	Very high speed Digital Subscriber Line
vgl.	vergleiche
VIX	Vienna Internet Exchange
VLAN	Virtual Local Area Network
VoD	Video-on-Demand
VoIP	Voice over IP
vULL	virtuelle Entbündelung des Teilnehmerzugangs (Unbundled Local Loop)
WACC	Weighted Average Cost of Capital
WDM	Wavelength Division Multiplex
WIK	Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur- und Kommunikationsdienste
xDSL	verschiedene DSL-Varianten, z.B. ADSL, VDSL, SDSL

1 Einführung

1.1 Gegenstand und Zielsetzung

Die Terminierungsentgelte in Österreich für Fest- und Mobilnetze sollen mit Hilfe von Bottom-Up Kostenmodellen bestimmt werden, wobei entsprechend der Empfehlung der Europäischen Kommission zur Behandlung von Festnetz- und Mobilfunkterminierungsentgelten die Migration der Telekommunikationsarchitekturen zu Netzen der nächsten Generation (Next Generation Networks, NGN) zu antizipieren erstmalig auch neue Kostenmaßstäbe (pure LRIC) anzusetzen sind.

Dieses Dokument beschreibt das Analytische Kostenmodell für das NGN-Festnetz in einer für die sachverständige Allgemeinheit verständlichen Version.

Der Umfang der Kostenmodellierung richtet sich zunächst nach den Anwendungszielen dieses Instrumentes, der Kostenermittlung für Sprach-Terminierungsleistungen (TDM Interconnection und für spätere Anwendungen auch VoIP-Interconnection). Ergänzend hat die RTR in ihrem Ausschreibungsdokument weitere Anforderungen dargelegt, die sich zum einen aus der LRIC-Regulierung von Terminierungsleistungen ableiten bzw. zukünftige Adaptionmöglichkeiten für den Next Generation Access (NGA) vorsehen.

Die Modellierung umfasst das Festnetz im Sinne des Verbindungsnetzes der nächsten Generation. Gegenstand sind daher die Netzsegmente „Konzentrationsnetz“ und „IP-Kernnetz“¹.

Eine zentrale Anforderung an das Kostenmodell und letztlich seine Anwendbarkeit im Rahmen von Entgeltregulierungsentscheidungen ist die Transparenz über die Art und Weise des Zustandekommens der berechneten Kostengrößen. Auf Basis einer dokumentierten und nachvollziehbaren Berechnungslogik ermöglicht ein analytisches Kostenmodell

- eine Kostenbestimmung unabhängig von den Kostendaten der zu regulierenden Unternehmen und damit
- die Ermittlung eines externen Maßstabs zur Beurteilung der Kostennachweise der zu regulierenden Unternehmens sowie

¹ Soweit mit der Entstehung von NGA eine Erweiterung des konzentrierenden Netzes in Richtung Teilnehmer erfolgt, können auch diese Kosten mit Hilfe des Bottom-up Modells bestimmt werden. Die Abgrenzung zum Accessnetz ist bei den Netzen der neuen Generation nicht mehr so eindeutig beschreibbar wie bei dem klassischen PSTN, sondern kann vielmehr von den implementierten FTTx-Zugangsarchitekturen abhängen. Ob der Demarcation Point, im Sinne einer Abgrenzung der auf Anschlussleitung- bzw. Verbindungsnetz und damit Terminierungsleistung zurechenbaren Kosten eine Berücksichtigung der Kosten des NGA erfordert, kann zu diesem Zeitpunkt nicht abschließend festgestellt werden. Siehe hierzu auch [EU Kommission-10].

- einen sachgerechten Diskurs über zentrale, kostenbestimmende Parameter und deren Auswirkungen auf die Kosten.

Die Beschreibung des analytischen Kostenmodells für das Breitbandnetz hilft, in nachvollziehbarer Form alle relevanten Beziehungen zwischen Input- und Outputgrößen zu dokumentieren und Transparenz in seine Verwendung zu schaffen. Das Bottom-Up-Modell ist so konstruiert, dass Kosten auf der Basis von nicht unternehmensspezifischen (Kosten-)Daten ermittelt werden können, es aber zugleich möglich ist, solche Daten dort, wo sie verfügbar sind, in die Berechnungen mit einzubeziehen. [WIK-05]

Das in diesem Dokument dargestellte Kostenmodell stellt einen analytischen Ansatz dar, der auf einer allgemein zugänglichen Wissensbasis über die netztechnische Realisierung von Breitbanddiensten die Kostenstruktur dieser Telekommunikationsnetze auf wesentliche Beziehungen reduziert. Die in das Kostenmodell eingespeisten Parameter beruhen im Grundsatz auf einer landesspezifischen Erhebung von Kosten- und Strukturparametern im österreichischen Telekommunikationsmarkt auf Basis einer Marktbefragung. Dort, wo keine Antworten eingegangen sind, wurden von der WIK-Consult GmbH europäische Vergleichswerte auf Basis ihrer eigenen, in vielen Befragungen recherchierten Erkenntnisse vorgeschlagen. Die eingestellten Netzstrukturparameter optimieren das Modell mit dem Ziel eines effizienten Netzes. Dabei wurden die Parameter zur Sicherstellung einer hinreichenden Netzverfügbarkeit (Redundanz/ Absicherung) im Hinblick auf den Stand der Technik und eine nicht zu großen Störwirksamkeit ausgelegt. So erlaubt das Modell eine Parametrierung, die berücksichtigt, dass das Netz so dimensioniert wird, dass beispielsweise bei Auftreten eines Fehlers in einem zentralen Netzknoten bzw. dem Totalausfall eines Netzknotenstandortes nicht mehr als die dort direkt angeschlossenen Teilnehmer vom Zugang zum Netz und seinen Diensten getrennt werden. Die vorliegende Ausprägungen derartiger Parameter entspricht der Einschätzung der WIK-Consult für eine dem Stand der Technik entsprechende Auslegung eines nationalen Netzes in Österreich und können ggf. im Rahmen von Entgeltregulierungsentscheidungen geändert werden.

1.2 Aufbau des Dokuments

Das vorliegende Dokument unterteilt sich in 9 Kapitel, wobei das erste die Einführung und das 9te die abschließenden Bemerkungen beinhaltet. Im Einzelnen werden die folgenden Aspekte abgehandelt:

- Ein Überblick über die methodische Vorgehensweise.
- Die differenzierte Modellierung der Nachfrage.
- Die Netzstruktur und Dimensionierung unter Berücksichtigung qualitativer Aspekte.

- Die Netzwerkplanung für das logische und physikalische Netz sowie für die Kontrollplattform – unter Berücksichtigung der Verschiedenartigkeit der Qualitätsanforderungen der Dienste in einem Multiservicenetzen sowie von Aspekten der Verkehrsverteilung und Dimensionierung.
- Die Dimensionierung der Netzelemente aller Schichten (Systemzuweisung) auf Basis generischen Equipments
- Die Berücksichtigung teilnehmeranschließenden Equipments (auch NGA)..
- Die Berücksichtigung indirekter Investitionen, der Kapitalkosten- und OPEX- Bestimmung, der Bestimmung der Gemeinkosten und der Gesamtkosten.
- Die Bestimmung der Kosten für einen Dienst.
- Die Skizzierung der softwaretechnischen Implementierung.

2 Methodischer Ansatz

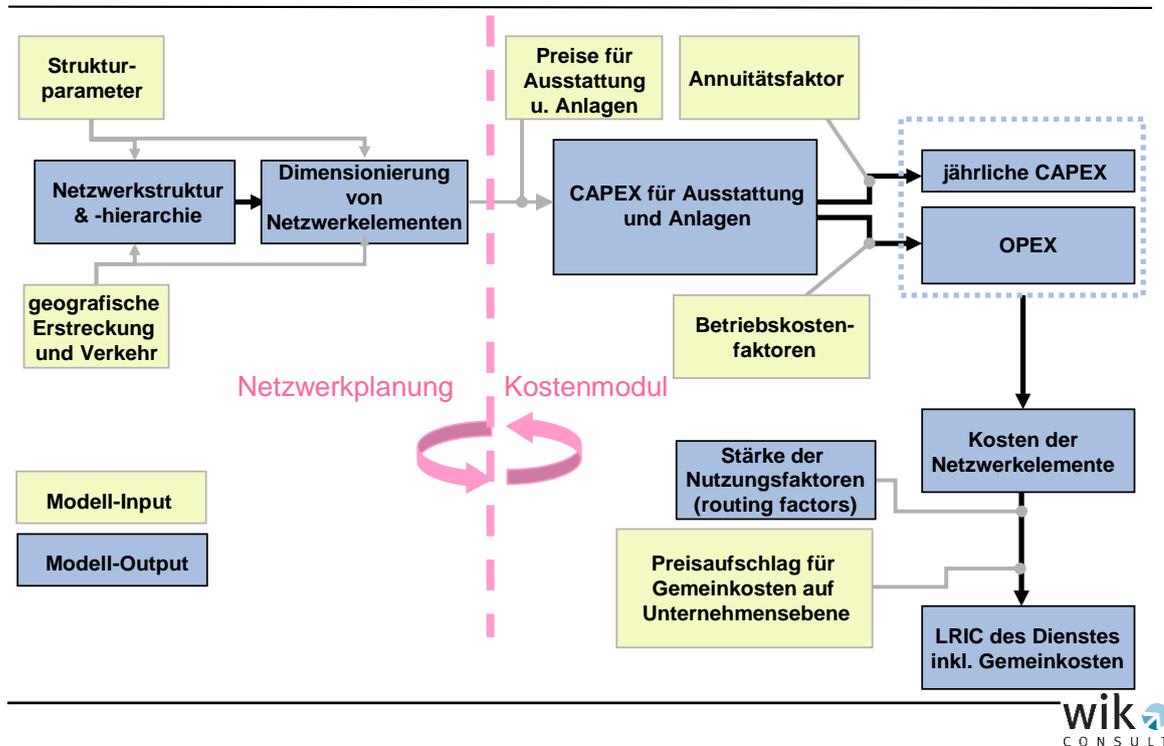
2.1 Generischer Modellierungsansatz

Bei dem hier beschriebenen Kostenmodell handelt es sich um ein sog. Bottom-up Kostenmodell. Es zeichnet sich dadurch aus, dass die durch die Modellberechnungen bestimmten **Mengengerüste** (Anzahl von Routing und Switching-Einrichtungen, Add-Drop-Multiplexer, Crossconnectoren oder Glasfaserkabeln) **in Abhängigkeit von der** in das Modell als Inputparameter einfließenden **Nachfrage** und deren Quellen und Senken **bestimmt** wird. Dieser zentrale Zusammenhang zwischen Nachfrage und Netzdimensionierung soll anhand der nachfolgenden Abbildung 2-1 illustriert werden, wobei auch verdeutlicht wird, dass ergänzend weitere Größen auf das zu bestimmende Mengengerüst einwirken (hier dargestellt durch "Strukturparameter").

Besondere Eigenschaft der NGN ist, dass sie nahezu alle Verkehre (Daten, Sprache, Video, Festverbindungen (VPN und sogenannte Pseudowire)) über eine „All-IP“ Plattform übertragen. Alle diese Dienste tragen durch ihre Integration in eine technische Übertragungs- und Vermittlungsplattform zu Skaleneffekten bei und müssen ihren Anteil an den Gesamtnetzkosten tragen. Dies gilt auch für den Sprachverkehr, für den dann daraus mit Hilfe des Modells die Kosten der Terminierung des Verkehrs in dem betrachteten Netz zu bestimmen sind.

Daher wurde für das vorliegende Kostenmodell ein Total Element Ansatz (TE) implementiert, der es ermöglicht, die Inanspruchnahme von Netzelementen nach Maßgabe der sie gemeinsam in Anspruch nehmenden Dienste zu bestimmen sowie diese für die Kostenzurechnung verwendbar zu machen. Die nachfolgende Abbildung 2-1 illustriert auf der linken Seite das Zusammenspiel von Verkehrsnachfrage, exogenen Strukturparametern und ingenieurtechnischen Regeln zur Netzdimensionierung, sowie deren Verknüpfung mit einer Kostenfunktion (auf der rechten Seite), die eine Equipmentzuweisung nach Maßgabe der Dimensionierung – unter Berücksichtigung von Preisparametern vornimmt. Die dargestellten Funktionen zur Nachfrageeinschätzung, Annualisierung und Kapitalkostenermittlung beschreiben dabei zentrale Elemente für die Umsetzung des Kostenstandards der Long Run Incremental Cost (LRIC) bzw. Pure LRIC.

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung eines TELRIC-Modells zur Kostenberechnung in Telekommunikationsnetzen



Quelle: [ACCC-07]

Grundsätzlich gibt es derzeit unterschiedliche technische Lösungen zur Realisierung eines NGN-Verbindungsnetzes, die sich je nach Land mit seinen geographischen Gegebenheiten und der Verkehrsnachfrage in ihrer Verwendung unterschiedlich effizient ergeben können. Das Modell erlaubt daher unterschiedliche technische Umsetzungsformen nachzubilden. Das Modell ist so angelegt, dass die Systemzuweisung der Übertragungs-, Vermittlungs- und Kontrollsysteme im Kostenmodul durch eine geeignete Parametrierung erfolgt (siehe rechte Hälfte in Abbildung 2-1). Entsprechend der zu betrachtenden Technologien werden auch die Kapazitäten der Einrichtungen des logischen Netzes durch den Modellanwender angegeben. Das Modell dimensioniert dann daraus ein Netz, das die gleichfalls anzugebende Nachfrage aller Verkehrsarten zu übertragen erlaubt.

Das Modell erlaubt, die Technologie und zugehörige Verkehre zu parametrieren.² Durch komparativ statische Vergleiche kann die für das Land und die gegebene Verkehrsnachfrage effizienteste Architektur bestimmt werden.

² Die Unterscheidung in Layer 2 und Layer 3 Verkehre erlaubt auch die Differenzierung von zugehörigen Verkehrsnachfragen. So werden im Konzentrationsnetz neben den IP-Verkehren (für die das

Ausgangspunkt aller Modellierung sind die bestehenden Knotenstandorte des Zugangsnetzes, in denen aller Verkehr von den Teilnehmern zusammenläuft und in den Systemen des Verbindungsnetzes ein erstes Mal konzentriert wird. Diese Standorte sind in der klassischen Netzwelt aus Kupferanschlussnetzen und PSTN/ ISDN Vermittlungssystemen als Hauptverteilerstandorte (HVt) bekannt. In der neuen NGN/ NGA Welt werden sie als MPoP (Metropolitan Point of Presence) bezeichnet. Diese Standorte gelten wegen Ihrer Abhängigkeit vom Zugangsnetz als gesetzt³. Modellsprachlich bilden sie scorched nodes, die von außen vorgegeben werden. Sie bilden die unterste Ebene der Netzknotenstandorte des Modells.

2.2 Schichtorientierte Netzarchitektur - elementorientierter Ansatz

Telekommunikationsnetze lassen sich in ihrer Komplexität durch einen Schichten orientierten Ansatz beschreiben⁴. Für ein NGN Verbindungsnetz, wie es hier modelliert wird, ergeben sich die folgenden Funktionen und Zuordnungen zu Schichten:

- logisches Netz (Layer 2 und Layer 3),
- physikalisches Netz (Layer 1 und Layer 0),
- Kontrollplattform (zum Teil oberhalb von Layer 3, zum Teil schichtübergreifend, d.h. quer zu Layer 1 bis 3)

Tabelle 2-1: Schichten in einem NGN-Verbindungsnetz

Netzbezeichnung	Schichten	Funktion	Aufgabe	Kontrollplattform
logisches Netz	Layer 3	Kernnetz	Vermittlung Dienste	Verbindungssteuerung Abrechnung Netzmanagement Ersatzschaltung ...
	Layer 2	Konzentrationsnetz	Verkehrsbündelung	
physikalisches Netz	Layer 1	Transportnetz	Standorte Verbinden	
	Layer 0	Infrastruktur	Signale Weiterleiten	

Der Bottom-up Modellierungsansatz kommt dabei für das Transportnetz (Layer 0 und 1), für die Vorkonzentration und Vermittlung der Daten der Nutzer (Layer 2 und 3) sowie für die Plattform zur Dienste Realisierung zum Aufbau, Monitoring und Abbau von Verbindungen sowie zur Netzverwaltung (Kontrollschicht) zur Anwendung.

Konzentrationsnetz lediglich die Zubringerfunktion erfüllt) auch spezifische Layer 2 Verkehre berücksichtigt.

³ Für die Abgrenzung zwischen NGN-Verbindungsnetz und Zugangsnetz vgl. Abschnitt 2.5.

⁴ Insgesamt umfasst das international standardisierte OSI Modell 7 Schichten.

Im Layer 3 sind die Systeme angesiedelt, die den Nutzerverkehr individuell und fallweise von Verbindung zu Verbindung durch das Netz bis ins Ziel vermitteln oder an ein Nachbarnetz weitergeben. Diese Schicht nutzt das IP-Protokoll als Kommunikationsgrundlage, die in IP-Routern interpretiert werden. Im Layer 2 sind die Systeme angesiedelt, die den Verkehr der unterschiedlichen Nutzer und Dienste auf eine Verbindung zusammenfassen (Ethernet-Protokoll, Ethernet Switches). Den Systemen beider Ebenen ist gemeinsam, dass sie den Verkehr auf eine physikalische Verbindung datenpaketweise multiplexen/ konzentrieren. Fest durchgeschaltete nutzerindividuelle physikalische Verbindungen gibt es auf diesen Schichten nicht, sondern nur durch die Adressierung der Datenpakete definierte logische Verbindungen.

Im Layer 1 hingegen werden feste Verbindungen definierter konstanter Kapazität zwischen den Netzknoten (OTN, NG-SDH) der Transportschicht definiert, die die Knoten der höheren Netzschichten miteinander verbinden⁵. Diese Systeme erlauben zudem, klassische Mietleitungen/ Festverbindungen bereitzustellen. Layer 0 besteht aus Glasfasern, Glasfaserkabeln, Leerrohrzügen, Leerrohren und Gräben. Layer 1 und 0 bilden, da sie nur physikalische Verbindungen bereitstellen können, das physikalische Netz.

Zur Unterscheidung zwischen physikalischem und logischem Netz lässt sich Anführen: Auf dem durch die Physik der Gräben, Leerrohre, Kabel und sie unmittelbar beschaltenden Systeme vorgegebenen physikalischen Netz können im Prinzip zwischen allen angeschlossenen Netzknoten Verbindungen geschaltet werden, die weitgehend von ihrer physikalischen Führung losgelöst betrachtet werden können. Sie bilden daher die logischen Verbindungen als Grundlage für das logische Netz. Während die Verbindungen des physikalischen Netzes starr zwischen festen Standorten aufgebaut sind, können die Verbindungen des logischen Netzes dynamisch aufgebaut und geändert werden, wobei sich sowohl die Zielrichtungen als auch die Kapazitätsinanspruchnahme dynamisch über die Zeit verändern können⁶.

Für ein allgemeines vermittelndes Telekommunikationsnetz sind funktional nur die Layer 0 und 3 erforderlich. Die übrigen Ebenen dienen der Bereitstellung eigener Dienste und der technischen, betrieblichen und ökonomischen Optimierung des Netzes.

Für die Nachfragemodellierung bedeutet dies, dass für die Dimensionierung der gemeinsam genutzten Systeme alle Dienste zu berücksichtigen sind, die diese Systeme

⁵ Die physikalischen Verbindungen folgen der Physik der gegebenen Trassen und Netzknoten im Layer 1 über deren Standorte, d.h. man kann sagen, auf dieser Schicht „sieht“ das Netz noch die Physik seiner Verbindungsstrukturen. Darüber legen die Systeme der höheren Schichten ihre Verbindungen untereinander auf Basis eigener Adressstrukturen und unabhängig von der konkreten physikalischen Realisierung als logisches Netz. Die unmittelbare logische Verbindung zweier „benachbarter“ Netzknoten im Layer 2 oder 3 kann im physikalischen Netz über mehrere Netzknoten und eine größere Entfernung hinweg realisiert sein (z.B. in einem Ring).

⁶ Beim klassischen Telefonnetz (PSTN/ ISDN) wird durch das logische Netz der Vermittlungssysteme eine Verbindung fester Bandbreite für eine bestimmte Dauer hergestellt, im NGN erfolgt dies für Datenpakete unterschiedlicher Länge und Anwendungen i.d.R. ohne festen Verbindungsaufbau.

nutzen. Dies erfordert die Vorgabe einer Verkehrsmatrix (Modellinput), sofern die Kostenmodellierung über eine reine Zuschlagskalkulation hinaus gehen und eine nachfragegetriebene Netzdimensionierung erlauben soll. Für Verkehre, die sich nur das Glasfaserkabel oder das Leerrohr teilen, sind Mitnutzungsfaktoren zur Parametrierung vorgesehen. Für die gemeinsame Nutzung von Gräben durch andere Infrastrukturträger (Gas, Wasser, Strom, Telekommunikation, Signalsteuerung, Ampelsteuerung, ...) erlaubt ein Mitbenutzungsfaktor, die Kosten entsprechend aufzuteilen.

2.3 Ebenen-orientierte Netzarchitektur

Telekommunikationsnetze sind typischerweise in ihrer räumlichen Verteilung in Standorte unterschiedlichen Funktionsumfangs gliederbar. Dies ist dadurch begründet, dass nicht in allen Standorten der Verkehrsaggregation alle Funktionen eines Telekommunikationsnetzes angesiedelt sein müssen, sondern manche Funktionen aus ökonomischen Gründen und aus Gründen der Reduktion der Komplexität und verbesserten Handhabbarkeit auf weniger Standorte beschränkt werden, die dann für ein größeres Gebiet zuständig sind. Im Gegensatz und in Ergänzung zu den Protokoll- und Technologieschichten des vorhergehenden Abschnittes (2.2) unterscheiden wir verschiedene Netzebenen, in denen ein unterschiedlicher Funktionsumfang vertreten ist. Derartige Netzstrukturen beschreibt man auch als hierarchisch gegliedertes Netz. Tabelle 2-2 gibt einen Überblick, während Abbildung 2-2 die Hierarchie verdeutlicht.

Tabelle 2-2: Standorte der unterschiedlichen Netzebenen und ihr Funktionsumfang

Ebene	Funktionsumfang		
	Konzentrationsnetz	Kernnetz	
5		Layer 3	oberste Vermittlungsebene
4			2. Vermittlungsebene
3			1. Vermittlungsebene
2	Layer 2	Layer 2	Oberste Konzentrationsebene
1			2. Konzentrationsebene
			1. Konzentrationsebene
0	Layer 1	Layer 1	Transportnetz
	Layer 0	Layer 0	Infrastruktur

An allen Standorten der Ebene 0 (level 0) gibt es grundsätzlich die Funktionen der Schicht 0 (layer 0, Infrastruktur), der Schicht 1 (layer 1, Transportnetz) und der Schicht 2 (layer 2, 1. Konzentrationsebene). Auf der 1. Konzentrationsebene werden alle Verkehre von den Endteilnehmern ins Verbindungsnetz hinein konzentriert und in der an-

deren Richtung an die Endteilnehmer verteilt. Diese Standorte, auch MPoP (Metropolitan Points of Presence) genannt, bilden damit die natürlichen Standorte, auf die Nachfragen nach den verschiedenen Telekommunikationsdiensten abgebildet werden. Die MPoP Standorte bilden die Grundgesamtheit aller Netzknotenstandorte eines Landes.

An den Standorten der Ebene 1 (level 1) gibt es zusätzlich eine weitere, höhere Konzentrationsstufe des Verkehrs (2. Konzentrationsebene). Die Ebene 1 Standorte sind eine Teilmenge der Ebene 0 Standorte.

An den Standorten der Ebene 2 (level 2) gibt es darüber hinaus eine weitere, höhere und finale Konzentrationsstufe des Verkehrs auf Schicht 2 (layer 2). (Oberste Konzentrationsebene). Die Ebene 2 Standorte sind eine Teilmenge der Ebene 1 Standorte.

Die Standorte der Ebene 3 sind mit ihren ergänzenden klassifizierenden und vermittelnden Funktionen der Schicht 3 (layer 3) identisch mit den Standorten der Ebene 2. Diese Funktionen sind kolloziert. Die Übergabe der Verkehre zwischen Konzentrations- und Kernnetz erfolgt durch Inhaus-Verbindungen. Diese Standorte werden auch IP-PoP genannt.

Die Standorte der Ebene 4 (level 4) sind wiederum eine Teilmenge der Standorte der Ebene 3 und bieten eine ergänzende 2. Vermittlungsebene.

Die Standorte der Ebene 5 (level5) bilden die oberste Netzebene und bieten ergänzend die oberste Vermittlungsschicht, die nun eine Vermittlung der Verkehre in alle Regionen eines Landes erlaubt.

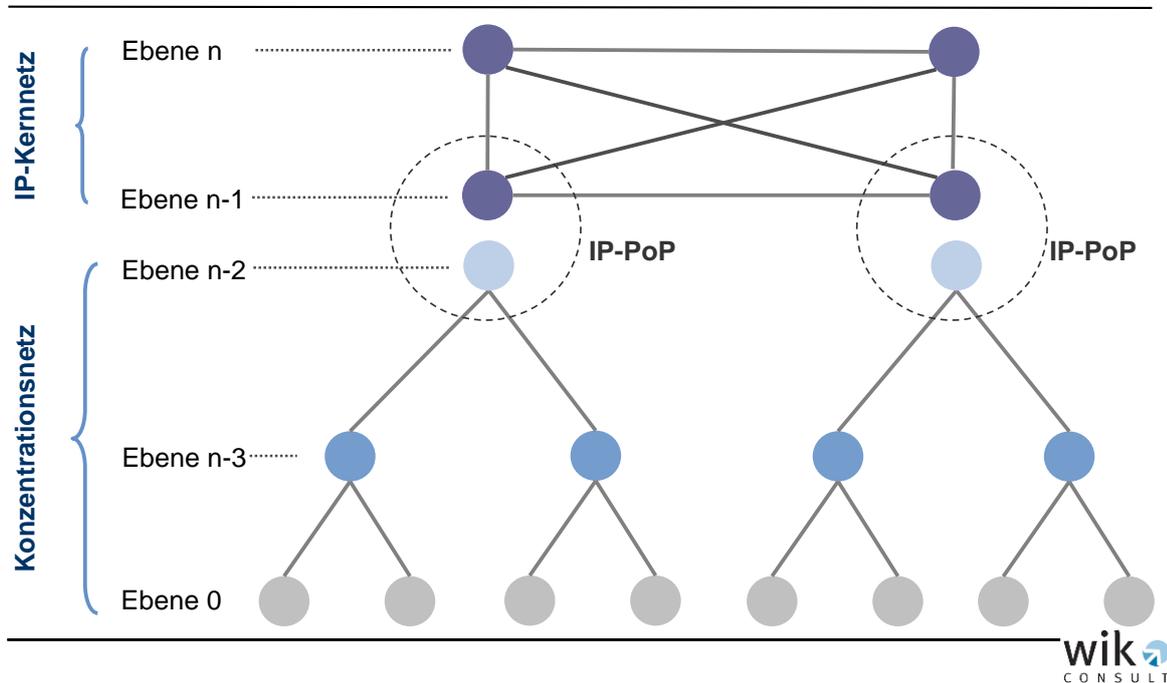
Typischerweise sind die weiteren zentralen Netzfunktionen an den oberen Standorten des Kernnetzes (Ebenen 5, 4 ggf. auch 3) angesiedelt. Sind dies nur wenige Standorte, dann an den Standorten der obersten Netzebene zuerst. Dort sind sie von allen Standorten des Netzes gleichermaßen gut und effizient zu erreichen. Derartige Funktionen sind z.B. Server basierte Dienste, Content Housing, IP-TV und Video-on-Demand (VoD) Server, Caches, Zusammenschaltungspunkte mit anderen Netzen (Interconnection, Peering)

Die Zahl der Netzebenen muss aus programmtechnischen Gründen beschränkt sein. Das Modell hat eine obere Grenze von 6 Netzebenen, davon typischerweise 3 Ebenen als Konzentrationsnetz und 3 als Kernnetz⁷. Insofern beschreibt Tabelle 2-2 die maximal mögliche Netzstruktur des Modells, während Abbildung 2-2 ein abstraktes 5-Ebenen Netz mit 2 Kernnetzebenen darstellt.

⁷ Während die Begrenzung auf max. 6 Ebenen fest ist, ist die Grenze zwischen Kernnetz und Konzentrationsnetz durch entsprechende Parametrierung flexibel.

Die obere Grenzen wurden von den Marktteilnehmern in Österreich im Rahmen der Kommentierung des Referenzdokumentes als deutlich ausreichend angesehen

Abbildung 2-2: Hierarchische, ebenen-orientierte Netzstruktur eines NGN, Beispiel mit 5 Netzebenen



Der gegebene Rahmen von 6 Netzebenen (Ebene 0 - 5) muss nicht ausgeschöpft werden, sondern die Anzahl der Netzebenen und die Anzahl der Netzknoten je Netzebene werden als Parameter dem Modell vorgegeben und können dann über komparativ statische Vergleiche effizient gestaltet werden. Netzebene 5 in ihrer Funktion als oberste Netzebene muss es für das Modell immer geben. Sie kann im Fall eines flachen Kernnetzes mit den IP-PoP Standorten zusammenfallen, so dass eine Kernnetzebene verbliebe. Das in Hinblick auf die hierarchische Netzgliederung kleinste Netz könnte theoretisch zudem aus einer einzigen Konzentrationsnetzebene (Ebene 0) bestehen, die nur in den IP-PoP Standorten angesiedelt ist. Damit wären alle Netzfunktionen in allen Netzstandorten vorhanden und es läge de facto ein Ein-Ebenen-Netz vor⁸.

Die Zahl der Netzknotenstandorte insgesamt ist nicht beliebig oder frei wählbar, sondern durch die MPoP Standorte fest vorgegeben (Scorched Node Ansatz). Diese Standorte bilden die Grundgesamtheit aller Netzknotenstandorte und haben zunächst die Funktionen der Ebene 0. Die Standorte der nächst höheren Netzebenen werden aus Ihnen schrittweise Ebene für Ebene ausgewählt. Sie bilden dann die entsprechende Teilmenge der Knoten mit den Ebenen spezifischen Zusatzfunktionen. Entscheidendes Kriterium für die Allokierung der höheren Funktionen ist die Menge des Verkehrs,

⁸ Ein derartiges Netz ist im Grundsatz theoretisch möglich, müsste allerdings seine Wirtschaftlichkeit erst unter Beweis stellen. Das Modell erlaubt derzeit die Nachbildung eines solchen Netzes nicht

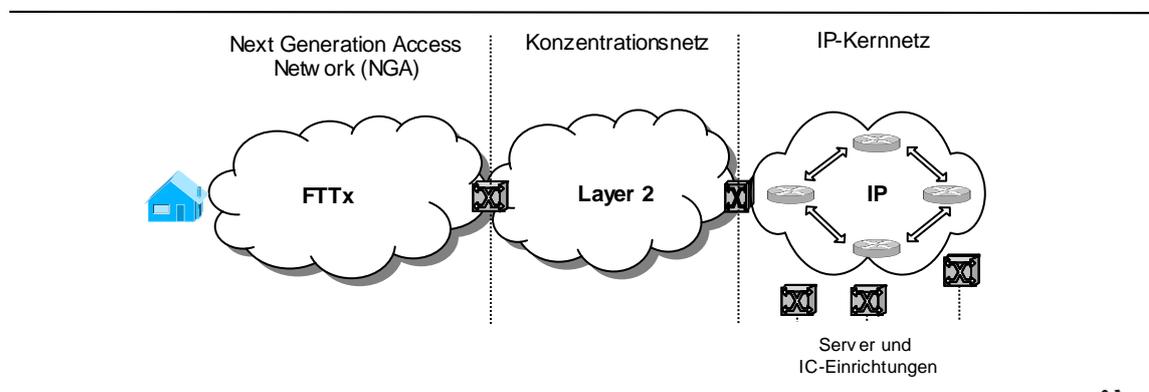
der in dem Knoten jeweils aggregiert wird. Die Knoten mit der höchsten Verkehrsstärke bekommen den Zuschlag. Eine Randbedingung bildet das Mindestdistanzkriterium für Knoten gleicher Ebene, das verhindert, dass ab Ebene 1 Knoten gleicher Funktion nicht zu dicht beieinander liegen und so eine ineffiziente Anhäufung in Ballungsräumen entsteht.

Die Knoten der Ebene 0 werden jeweils dem nächstgelegenen Knoten der Ebene 1 nach Maßgabe der kürzesten Straßenentfernung zugeordnet. So werden Ebenen spezifische Cluster gebildet, d.h. im nächsten Schritt werden aus der Menge der Ebene 1 Knoten die Ebene 2 Knoten gewählt und wieder entsprechende Cluster gebildet. Gleiches gilt für Cluster der Ebene 4 oder 5 (Ebene 3 ist IP-PoP Ebene und damit mit Ebene 2 Standort identisch). Die Standorte eines Ebenen spezifischen Clusters werden mit dem Knotenstandort der nächst höheren Netzebene verbunden und ihr Verkehr über diesen Knoten weitergeleitet.

2.4 Nachfrage und Netzsegmente

Gegenstand der Modellierung ist ein Dienste integriertes Multiservicenetz, wobei unterstellt wird, dass die Dienste Integration auf dem Layer 3, d.h. dem IP (Internet Protocol) erfolgt. Schematisch lässt sich das Telekommunikationsnetz entsprechend der nachfolgenden Abbildung 2-3 skizzieren. Die ganz rechts dargestellte Wolke stilisiert dabei das eigentliche Dienste erbringende IP-Kernnetz, die mittlere Wolke hat eine reine Konzentration der Verkehre von den Endpunkten des Zugangsnetzes zum IP-Kernnetz zur Aufgabe und die Wolke ganz links kennzeichnet die Teilnehmeranschlusstechnologie der neuen Generation. Die Schnittstelle zwischen Zugangsnetz und Konzentrationsnetz bildet der MPoP (Metropolitan Point of Presence) entsprechend der EU Nomenklatur [EU-09]. Für derzeitige Kupferdoppelader gestützte Anschlussnetze ist dieser mit dem Hauptverteilerstandort (HVt) identisch.

Abbildung 2-3: Netzsegmente im Festnetz



Diese Darstellung entspricht einer gängigen Interpretation zukunftsorientierter Festnetze. Es gibt eine Vielzahl von Freiheitsgraden bei der Netzgestaltung, die letztlich von der hier vorgestellten funktionalen Unterteilung der drei Netzsegmente als auch ihrer Realisierungsform auf den angegebenen Layern des OSI-Modells abweichen. – Diese Freiheitsgrade der Netzgestaltung sind auch in dem hier vorgestellten Kostenmodell weitgehend abbildbar, eine weitere Motivation für den generischen und modularen Aufbau des Kostenmodells.⁹

Sowohl Netzplanung als auch Kostenermittlung erfolgen für die dargestellten Segmente NGA, Konzentrationsnetz und IP-Kernnetz separat. Eine Kostenermittlung im Anschlusssegment (NGA) ist nur dann von Relevanz, wenn dort bereits eine Verkehrsaggregation erfolgt, die für die Bestimmung von Terminierungsentgelten relevant ist. Für dieses Netzsegment wird in diesem Modell keine Netzplanung im Sinne einer Bottom-up Planung vollzogen, sondern lediglich eine Kostenbestimmung auf Basis vorgegebener Mengen- und Strukturgrößen im Kostenmodul. Dabei werden die unterhalb des MPoP zum Teilnehmer hin benötigten konzentrierenden Netzelemente (z.B. VDSL-DSLAM, Splitter, ONT/ ONU, ...) auf den diese aggregierenden MPoP projiziert und kostenmäßig erfasst.

Das Konzentrationsnetz und das IP-Kernnetz bilden das "Verbindungsnetz" im traditionellen Sinne und diese beiden sind hier Gegenstand einer generischen Bottom-up, d.h. Nachfrage getriebenen Modellierung.

Den regulatorischen Anforderungen entsprechend, kann die Kostenermittlung auf Basis des Maßstabs der LRAIC bzw. „Pure LRIC“ vorgenommen werden. Der LRAIC Maßstab und der ihm zu Grunde liegende Effizienzgedanke verlangt dabei, die aus einer Verbundproduktion realisierbaren Größen- und Verbundvorteile zu berücksichtigen. Ausgehend von der Zielgröße Kosten der Terminierung sind sämtliche Netzelemente zu betrachten, die zur Realisierung dieses Dienstes erforderlich sind.

Da es sich – auch aus Sicht der Marktteilnehmer – bei dem Festnetz der nächsten Generation um ein auf Layer 3 (IP) integriertes Multiservicenetz handelt, sind prinzipiell sämtliche IP-basierten Dienste zu berücksichtigen, da diese gemeinsam mit der Sprache das Transportnetz (und teilweise auch die Kontrollplattform) in Anspruch nehmen. Abgrenzungskriterium sind die von VoIP in Anspruch genommenen Netzelemente auf Ebene des betrachteten logischen und physikalischen Netzes sowie der zugehörigen Kontrollplattform.

Darüber hinaus müssen alle anderen Dienste niedrigerer Ebenen soweit berücksichtigt werden, wie sie eine gemeinsame Infrastruktur und deren Kosten mit dem Sprachverkehr teilen.

⁹ Siehe hierzu auch Fußnote 2.

Die Unterteilung des Bottom-up Modells in zwei Segmente (Konzentrations- und Kernnetz) erlaubt es, für das Konzentrationsnetz eine zusätzlich parametrisierbare Verkehrsnachfrage zu berücksichtigen, die lediglich für das Konzentrationsnetz von Relevanz ist. Illustrativ – wie es derzeit dem Stand der Technik entsprechend erwartet werden kann – sind in Abbildung 2-3 dem Konzentrationsnetz eine Layer 2 Technologie (Ethernet Switches) und dem Kernnetz eine Layer 3 Technologie (IP-Router) zugeordnet. Über die Layer 2 Technologie werden dann sämtliche IP-Verkehre dem Kernnetz zugeführt und dort geroutet (vermittelt). Entsprechend leitet sich die Layer 2 Nachfrage aus der IP-Nachfrage einerseits und aus und der zusätzlichen Layer 2 Nachfrage aus dem Konzentrationsnetz andererseits ab.¹⁰

Die zusätzliche Layer 2 Nachfrage besteht aus Verkehren, die in dem jeweiligen Konzentrationsnetz-Cluster abgewickelt werden und dazu lediglich logische Einrichtungen des Konzentrationsnetzes in Anspruch nehmen. Diese Verkehrsnachfrage wird separat von der Nachfrage nach IP-Diensten über eine entsprechende Verkehrsmatrix parametrisiert.

Da auch weitere Verkehre (z.B. Mietleitungen auf Layer 1, dem Transportnetz) dazu beitragen, die Kosten des Netzes zu teilen, werden auch diese in die Betrachtungen der Kosten der entsprechenden Netzebenen einbezogen.

2.5 Abgrenzung gegenüber dem Zugangsnetz (NGA)

Eine Abgrenzung der beiden zu modellierenden Netzsegmente voneinander erfolgt – wie gerade skizziert – auf Basis der auf der logischen Schicht eingesetzten Technologien. Wie aus Abbildung 2-3 hervorgeht, ist jedoch auch eine Abgrenzung gegenüber dem teilnehmerseitigen NGA erforderlich, da letztlich die unterste Ebene des Konzentrationsnetzes zu bestimmen ist.

Traditionell (im Schmalband) wurde das Ende der dedizierten Teilnehmeranschlussleitung als Demarkationspunkt für die Separierung von Anschlussnetz und Verbindungsnetz herangezogen. Eine genauere Betrachtung der NGA-Architekturen offenbart jedoch die sich hinter der FTTx-Familie verbergende Vielfalt aus kupfer- und glasfaserbasierter Realisierung des Teilnehmeranschlusses. Bezeichnet man den netzseitigen Abschluss eines NGA mit dem MPoP (Metropolitan Point of Presence), wie es in der NGA Recommendation der EU dargestellt ist,¹¹

¹⁰ Es sei nochmals auf Fußnote 2 verwiesen.

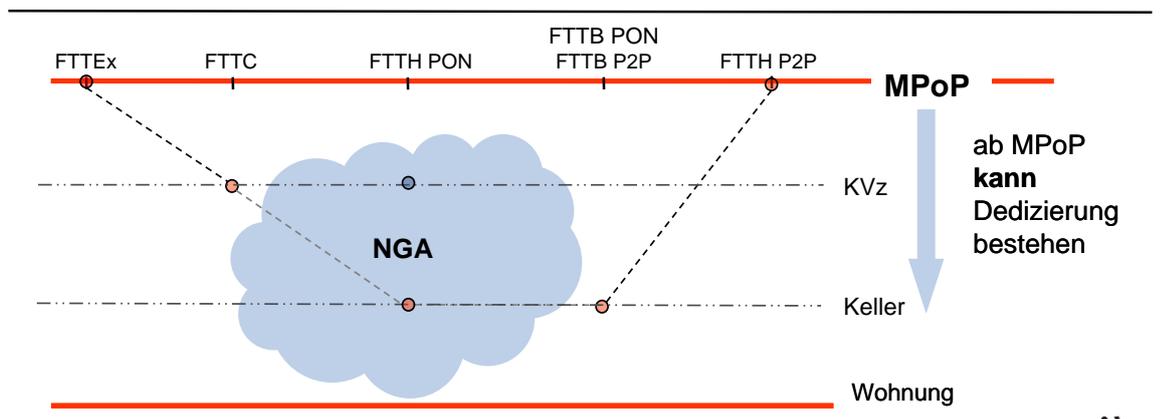
¹¹ [EU Kommission 10] p. 11.

“The "Metropolitan Point of Presence" (MPoP) means the point of inter-connection between the access and core networks of an NGA operator. It is equivalent to the Main Distribution Frame (MDF) in the case of the copper access network. All NGA subscribers' connections in a given area (usually a town or part of a town) are centralised to the MPoP on an Optical Distribution Frame (ODF). From the ODF, NGA loops are connected to the core network equipment of the NGA operator or of other operators, possibly via intermediate backhaul links where equipment is not collocated in the MPoP.”

so ergeben sich abwärts (d.h. teilnehmerseitig, unterhalb des MPoP) unterschiedliche Ausmaße in der Länge der dedizierten Anschlussleitung des Kunden. In der nachfolgenden Abbildung 2-4 ist das Ende der dedizierten Leitung durch einen Punkt gekennzeichnet. Die gestrichelte Linie bildet die Umhüllende für die potenziellen Demarkationspunkte nach Maßgabe der unterschiedlichen NGA Architekturen und soll das unterschiedlich Ausmaß der Länge der dedizierten Anschlussleitung illustrieren.

Im Fall von FTTH PON finden sich in Abbildung 2-4 mehrere Demarkationspunkte. Da es sich um eine PON Architektur handelt, werden die Glasfasern an einem Splitter konzentriert. Nur bis zu diesem Standort verfügt der Kunde über eine individuelle Glasfaser für seinen Teilnehmeranschluss. Dieser Splitter kann entweder in einem Keller (oder vor einem Haus) installiert sein, oder auch an einem für alle Teilnehmer entfernten Standort (Distribution Point).¹² Mit Blick auf eine Entbündelung ist letztlich der Standort des Splitters, der dem Kunden am nächsten liegt (Keller/KVz), bei dieser Architektur von Relevanz.

Abbildung 2-4: Heterogenität der Länge der dedizierten Anschlussleitung im NGA



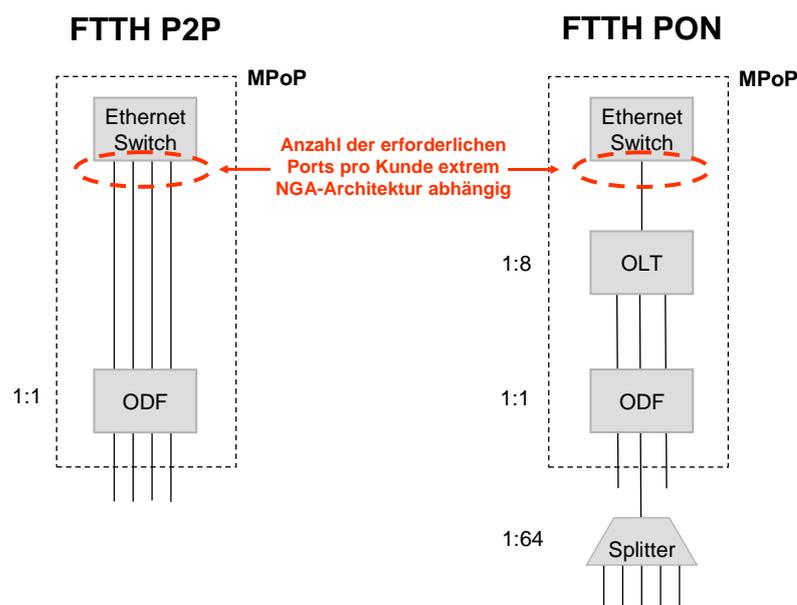
Die einzelnen FTTx Bezeichnungen sind dabei wie folgt zu verstehen:

¹² [Jay, Plückerbaum, Ilic-10] führen aus, dass selbst auf dem letzten Stück der Teilnehmer individuellen Glasfaserleitung bis zum Haus keine Dedizierung vorliege, da die Inanspruchnahme selbst des dedizierten Teils der Glasfaser (von der Wohnung bis zum Splitter) durch den OLT gesteuert wird, der den einzelnen Anschlüssen Senderechte zuteilt. Da diese Senderechte zwischen den angeschlossenen Teilnehmern rivalisieren, könne aus technischer Sicht bei der Realisierung einer FTTH PON Architektur von einer Rivalität bis zur Wohnung des Endkunden gesprochen werden.

FTTEx	Fibre to the Exchange (CuDA bis zum HVt bzw. MPoP)
FTTC	Fibre to the Cabinet (VDSL-Realisierung am bisherigen KVz-Standort)
FTTB	Fibre to the Building
FTTH	Fibre to the Home
PON	Passive Optical Network
P2P	Point to Point

Neben der Länge der dedizierten Leitung hat die NGA-Architektur auch Einfluss auf das am MPoP vorzusehende Equipment. So muss bei FTTEx und FTTH P2P für jeden Kundenanschluss ein individueller Port vorgehalten werden. Bei allen anderen Architekturen wird bereits auf dem Weg zwischen Teilnehmer und MPoP eine Vorkonzentration vorgenommen, so dass sich die Zahl der erforderlichen Ports und damit auch der standortbezogene Konzentrationsbedarf am MPoP reduzieren. Dies ist in Abbildung 2-5 vereinfacht dargestellt.

Abbildung 2-5: NGA-Architekturen und ihre Realisierung im MPoP



Der MPoP wird für die Modellierung des Konzentrationsnetzes als Standort der untersten Netzebene (Ebene 0) herangezogen. Mit dieser Vorgehensweise kann erreicht werden, dass – trotz einer Heterogenität der Lage der Demarkationspunkte – eine einheitliche Parametrisierung der Netzstruktur umsetzbar ist. Mit anderen Worten: Es ist eine

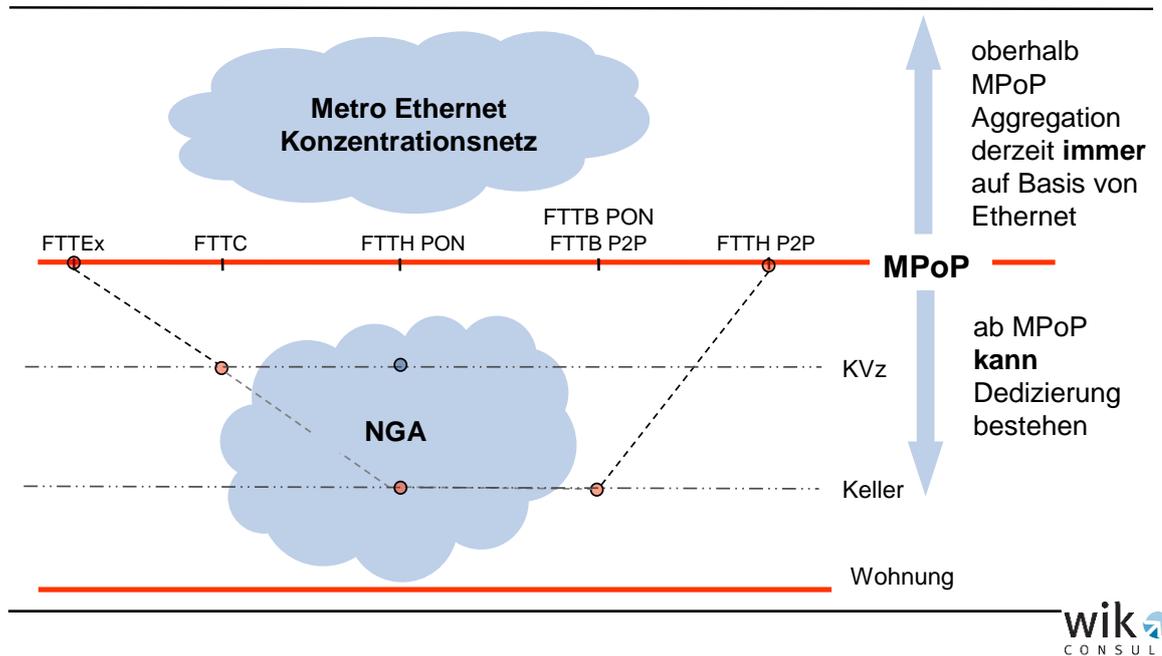
einheitliche Anwendbarkeit des Kostenmodells für das nationale Versorgungsgebiet möglich.¹³

- Letztlich gilt für den MPoP im Falle zweier Architekturen (FTTEx sowie FTTH P2P), dass an diesem Standort die dedizierte Anschlussleitung endet.
- Ferner stellt der MPoP aus Sicht der NGA-Architektur die netzseitige Begrenzung dar (siehe [EU-Kommission 10]).
- Die Modellierung eines NGA Netzes hätte letztlich die Anbindung der Teilnehmer an den MPoP zum Gegenstand und müsste modelltechnisch auch unter Berücksichtigung eines GIS-Straßenlayers erfolgen (was für das Konzentrations- und IP-Kernnetz zu vernachlässigen wäre).
- Darüber hinaus kann netzseitig festgestellt werden, dass dort aus heutiger Sicht uneingeschränkt (d.h., für jede NGA Architektur) Ethernet als Layer-2-Technologie zum Einsatz kommt, was letztlich das charakterisierende Element für dieses Netzsegment darstellt.

13 Zur Kostenberechnung für Vorleistungen mit einer dedizierten Anschlussleitung unterhalb des MPoP muss ergänzend auf Kostenmodelle des Anschlussnetzes zurückgegriffen werden, um die Lücke zwischen MPoP und Punkt der Dedizierung bei der Kostenberechnung zu schließen.

Mit einer Beschränkung der Kostenmodellierung auf die netzseitige Schnittstelle des MPoP (nach Maßgabe der an dem jeweiligen Standort erforderlichen Übertragungskapazität) lässt sich der Investitionsbedarf für das Konzentrationsnetz unabhängig von der zugrunde liegenden NGA-Architektur bestimmen. Für die Berücksichtigung der Kosten der Konzentration des Verkehrs im MPoP oder ggf. an davor liegenden Standorten müssen die Kosten je Anschluss auf den jeweiligen MPoP projiziert werden, um auch diese in die Berechnung mit einzubeziehen. Wir gehen allerdings davon aus, dass das Equipment des Anschlussnetzes für den einzelnen Anschluss für den Fall mit oder ohne Terminierungsverkehr gleich dimensioniert werden wird, die diese Kosten bei der Bestimmung der Pure LRIC also wieder herausrechnen (zu Null subtrahieren).

Abbildung 2-6: MPOp als Standort der untersten Netzebene im Konzentrationsnetz



Ergänzend soll an dieser Stelle betont werden, dass die hier vorgenommen Grenzziehung nicht als regulatorische Grenzziehung zwischen „Teilnehmeranschlussnetz“ u. „Konzentrationsnetz“ zu verstehen ist. Ein Modellentwurf für ein Kostenmodell für das IP-Kernnetz und Konzentrationsnetz – das flexibel auf unterschiedliche NGA-Architekturen angewendet werden soll – kann diese regulierungspolitische Frage nicht beantworten. – Wie oben ausgeführt, konzentrieren verschiedene NGA-Architekturen bereits unterhalb des MPOPs. Die hier gewählte Vorgehensweise stellt letztlich einen pragmatischen Ansatz dar, der die hier zu spezifizierenden Module für das Kernnetz und Konzentrationsnetz durch ein zusätzliches NGA-Modul ergänzbar macht.

2.6 Netzwerkplanung

Die Netzwerkplanung, ist von der Kostenbestimmung im Kostenmodul abzugrenzen. Beide nutzen jedoch die Kostengrößen der Systemparameter als Input. Die Netzwerkplanung braucht die Kostengrößen zur wirtschaftlichen Optimierung der Netzstruktur, das Kostenmodul braucht sie zur Bestimmung der daraus resultierenden Kosten.

Die Netzwerkplanung lässt sich in weitere Teil-Module unterteilen. Zu nennen sind hier die Modellierung der:

- Nachfrage
- logischen Netzstruktur

- physikalischen Netzstruktur
- Kontrollplattform

Logisches und physikalisches Netz bilden die technische Realisierungsform zur Befriedigung der Verkehrsnachfrage ab. Dabei können sowohl für die logische Netzstruktur als auch für die physikalische Netzstruktur verschiedene Strategien unterstellt werden, die in unterschiedlich kosteneffizienten Lösungen resultieren.

Der Modellierungsansatz zielt darauf ab, auf den zentralen Kenngrößen aufzusetzen, die die Kosten des Netzes maßgeblich bestimmen. Naturgemäß nimmt ein Modell eine Abstraktion von der Realität vor. Dies geht einher mit einer Reduktion der Komplexität der Netzplanung auf ein mit vertretbarem Aufwand modellierbares Maß – und zwar nach Maßgabe der Kostenrelevanz der Steuerungsgrößen.

Der hier vorgestellte Modellierungsansatz berücksichtigt insbesondere die folgenden **Strukturmerkmale, die über Eingabeparameter durch den Modellanwender gesteuert werden können** und auf deren Basis unter Rückgriff auf Optimierungsalgorithmen ein effizientes Netz abgeleitet werden kann.

- Netzstruktur und Netzhierarchie
 - Differenzierung von IP-Kernnetz und Konzentrationsnetz (Separierung in zwei Module)
 - Anzahl der Netzebenen je Modul
 - Anzahl der Standorte je Netzebene
 - Vorgabe der insgesamt vorhandenen Standorte (Geokoordinaten, scored node Ansatz)
- Technologiewahl
 - auf Layer 3
 - auf Layer 2
 - auf Layer 1
- Logische Struktur und Topologie
 - logische Netzstruktur (Vorgabe einer Grundstruktur, veränderbar über weitere Inputparameter: Schwellwerte für die Einrichtung zusätzlicher logischer Verbindungen)

- Topologie des physikalischen Netzes (Vorgabe einer Grundstruktur, veränderbar über weitere Inputparameter: Ring, vermascht)
- Absicherung
 - Absicherung von Einrichtungen des logischen Netzes
 - Absicherung von Einrichtungen des physikalischen Netzes
 - Absicherung von Einrichtungen der Kontrollplattformen
 - Absicherung von Standorten
 - im Konzentrationsnetz redundante Standortanbindung
 - im Kernnetz Gewährleistung von Bi-Konnektivität (Mindestanforderung)
 - Doppelabstützung
- Vorgabe von Auslastungsgraden
 - Für Einrichtungen des logischen Netzes
 - Für Einrichtungen des physikalischen Netzes
 - Für Einrichtungen der Kontrollplattform
- Festlegung der Anzahl von Serverstandorten und IC-Standorten (PoI) durch den Modellanwender
 - Differenziert nach Dienstekategorien (Endkundendienste)
 - Differenziert nach Vorleistungen
- Qualitätsanforderungen von Verkehrsklassen
 - Mittlere Verzögerung¹⁴

Die verschiedenen Realisierungsformen resultieren – so die Ausgangshypothese – in verschieden hohen Kosten. Darüber hinaus sind sie auch mit unterschiedlichen Eigenschaften – insbesondere mit Blick auf die Absicherung und Netzverfügbarkeit – verbunden. Diese unterschiedliche Leistungsfähigkeit in der Absicherung kann im Rahmen

¹⁴ Die Modellierung von weiteren, die Qualität bestimmenden Parametern, insbesondere Jitter und Paketverlustrate, erfolgt im Modell implizit über die gewählte mittlere Verzögerungszeit.

eines Kostenmodells nicht beantwortet werden. Sie wirkt in unterschiedlicher Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Dienste sowie in der Störwirkbreite, d.h. Anzahl der durch einen Fehler maximal ausfallenden Kundenanschlüsse. Ihre Bewertung spiegelt sich letztlich in der Zahlungsbereitschaft der Marktteilnehmer hierfür wider. Um diese – zumindest indirekt – in die Modellierung einfließen zu lassen, wurde im Rahmen der Marktbefragung eine Einschätzung der Marktteilnehmer erfragt, wie die verschiedenen Architekturen bei ihnen eingesetzt werden.

3 Nachfragemodellierung

Die Abbildung der Nachfrage für die Bottom-up Modellierung ist von zentraler Bedeutung. Letztlich bestimmen der Umfang der Verkehrsnachfrage, deren Qualitätsanforderungen, die Verteilung der Nachfrager im Raum sowie die zugehörigen Verkehrsmatrizen (Quelle-Ziel) die Gestaltung des Netzes.

Einführend wurde bereits erläutert, für welche Netzsegmente und auf welchen Netzschichten eine Verkehrsnachfrage zu berücksichtigen ist. In diesem Abschnitt der Nachfragemodellierung ist eine institutionelle Abgrenzung relevant. Neben der Endkundenachfrage sind auch die Verkehre aus Vorleistungen für alternative Netzbetreiber dimensionierungsrelevant und entsprechend zu berücksichtigen. Hierbei sind insbesondere der Bitstrom-Verkehr, Sprach-Interconnection-Verkehr (TDM- und IP-basiert) sowie der generelle IP-Interconnection-Verkehr (Peering) zu nennen. Diesen Nachfragergruppen entsprechend ist im Modell eine Parametrisierung der Verkehrsnachfrage vorgesehen.

Das Modell verfügt über eine Vielzahl von "Stellschrauben", die die Netzgestaltung bestimmen. Die Veränderbarkeit einzelner Parameter ermöglicht dabei die Durchführung komparativ-statischer Vergleichsrechnungen. – Die in das Modell einfließende Nachfrage stellt ebenfalls eine veränderbare Größe dar und erlaubt insbesondere vor dem Hintergrund sich verändernder Dienstangebote und Anschlusstechnologien die Kostenmodellierung für verschiedene Nachfrageszenarien.

Durch den Modellanwender zu parametrieren ist die Nachfrage

- nach Layer 3 basierten Diensten
- nach Layer 2 basierten Diensten
- nach Layer 1 basierten Diensten
- (nach Layer 0 basierten Diensten, d.h. dark fibre, über Beilauffaktoren)¹⁵
- nach Layer 0 (gemeinsame Nutzung von Gräben) über einen Mitbenutzungsfaktor

Die Vorgabe der Verkehrsnachfrage steht in direktem Zusammenhang mit der Technologiezuweisung. Sofern die Verkehrsnachfrage abstrakt, d.h. technologieunabhängig vorgegeben wird, so ist dennoch eine Transformation vorzunehmen, die diese Ver-

¹⁵ In diese Kategorie fallen auch die Einsparpotentiale, die sich durch die gemeinsame Nutzung der Linientechnik durch Anschlussnetz (NGA) und Verbindungsnetz (Konzentrations- und Kernnetz) ergeben. Sie sind durch einen entsprechenden Beilauffaktor abzubilden.

kehrsnachfrage in eine korrespondierende Nachfrage, differenziert nach den 4 Netzschichten vornimmt.¹⁶

Für die Modellierung eines NGN Verbindungsnetzes ist relevant, dass verlässliche Eingangsdaten für die unterschiedlichen Verkehre je MPoP bereitgestellt werden. Sofern diese vom zu regulierenden Betreiber in ausreichender Form vorliegen, können diese Daten verwendet werden. Andernfalls können die Daten durch unabhängige Nachfrageschätzungen aus den verschiedenen Nutzergruppen und deren Nutzungsverhalten abgeschätzt werden. Diese Verfahren erlaubt auch Prognosen für unterschiedliches zukünftiges Verhalten der Nutzer bezogen auf die verschiedenen Anwendungen. Gerade vor dem Hintergrund des technologischen Wandels und der zukünftig zu realisierenden Dienste ist die Option einer **unabhängigen Modellierung der Nachfrage** von zentraler Bedeutung. Nicht zuletzt auch, um unterschiedliche Szenarien miteinander vergleichbar zu machen.

Das Modell kann sowohl auf tatsächliche Nachfragedaten (die i.d.R. vom regulierten Unternehmen bereitgestellt werden, wie dies beispielsweise aus der Anwendung des Kostenmodells für das nationale Verbindungsnetz im Zuge von Kostenstudien der Fall ist) als auch auf unabhängige Nachfrageschätzungen angewendet werden. Letztlich ist es ein zentrales Merkmal eines Bottom-up Kostenmodells, Veränderungen der Nachfrage mit Blick auf die Kostenimplikationen zu untersuchen. Modellanwendungen sollen möglich sein

- auf Basis von Betreiberangaben sowie
- auf Basis von unabhängigen Nachfrageschätzungen.

Die im Modell vorgesehenen Inputparameter sind daher so konzipiert, dass sie beiden Anwendungsfällen genügen. Gegebenenfalls sind die von Netzbetreibern gelieferten Angaben so zu transformieren, dass sie eine – mit Blick auf die Kostentreiber – realitätsnahe Abbildung der Verkehre erlauben.

Einführend soll jedoch zunächst der Aspekt von Quality of Service (QoS) und QoS Differenzierung und seine Rolle bei der Kostenmodellierung erläutert werden, um damit ein Grundverständnis für die insbesondere in Abschnitt 3.3 dargestellte unabhängige Bestimmung der Verkehrsnachfrage vorzunehmen.

¹⁶ Dieser Zusammenhang lässt sich am besten anhand eines Beispiels illustrieren: Abstrakt sei eine Mietleitungsnachfrage einer vorgegebenen Kapazität (z.B. 144 MBitps) angenommen. Sofern das Netz auf Layer 1 eine SDH-Technologie vorsieht, kann die Nachfrage auf Basis des Layer 1 befriedigt werden. Wird nun das Modell nicht mit SDH parametrisiert, sondern beispielsweise mit WDM, so ist die kleinste, auf Layer 1 wirtschaftlich realisierbare Schnittstelle, eine Kapazität von einer Wellenlänge. Entsprechend wird ein effizienter Netzbetreiber versuchen, diese Nachfrage auf einer höheren Schicht zu befriedigen und es ist dann die benannte Transformation vorzunehmen.

3.1 Nachfrage und QoS-Differenzierung

Ein zentraler Aspekt des Kostenmodells für das NGN-Verbindungsnetz ist die Berücksichtigung von Quality of Service (QoS). Ein IP-Netz ist zunächst einmal ein reines best effort Netz, das aufgrund der Eigenschaften des TCP den Verlust von Daten vermeiden kann, sofern denn die zeitlichen Anforderungen an die Übertragung der Informationen ein wiederholtes Senden der Daten erlauben¹⁷. Es lässt sich als Warteschlangen-Verlustsystem charakterisieren, welches im Fall der Überfüllung nicht wie das PSTN weitere Diensteanfragen blockiert, sondern die bereitgestellte Bandbreite für alle TCP-basierten Dienste im Netz undifferenziert verringert. Damit erhöht sich prinzipiell die Gefahr von Paketverlusten, höheren Durchlaufzeiten (Latenz) und größeren Schwankungen in den Laufzeitverzögerungen (Jitter) bei hoher Netzauslastung.

Mit der Integration von Diensten auf IP-Netzen wurden die Beschränkungen des Netzes hinsichtlich der Realisierung von QoS deutlich. Dienstespezifische Anforderungen an QoS-Parameter wie Latenz, Jitter oder Paketverlust können in einem best effort Netz zunächst nicht gewährleistet (garantiert) werden. – Da es dennoch als wirtschaftlich sinnvoll und technisch machbar angesehen wird, Dienste auf dem IP-Netz zu integrieren, wurden alternative Strategien zur Realisierung von QoS entwickelt, die über eine reine Überdimensionierung von Kapazitäten hinausgehen. Dies sind insbesondere Verfahren der

- Priorisierung sowie
- Kapazitätsreservierung.

Verschiedene Netzbetreiber bringen diese Verfahren zur Anwendung. Bis zum heutigen Zeitpunkt muss jedoch festgestellt werden, dass eine allgemein anerkannte netzübergreifende (Betreiber übergreifende) Spezifizierung von Parametern und Protokollen nicht erfolgt ist.¹⁸ Für die „interconnected world“ bildet daher nach wie vor das TCP/IP die Basis für einen best effort Dienst.

Mit zunehmender Bedeutung der Einführung IP-basierter und diensteintegrierter NGN wird in der öffentlichen Diskussion die Einführung von QoS bzw. QoS-Klassen relevanter. IMS- und Softswitch-Architekturen beinhalten eine QoS-Realisierung beispielsweise für Sprachdienste.

¹⁷ Das TCP (Transport Control Protocol) stellt die Übertragung der IP-Pakete sicher, in dem es ihre Übertragung kontrolliert. Gehen beispielsweise IP-Pakete infolge von Überfüllung verloren, dann sorgt das TCP dafür, dass diese Pakete erneut verschickt werden. Auch steuert es die Versenderate der Pakete in Abhängigkeit der Netzlast. Das TCP ist dem Layer 4 zuzuordnen (oberhalb des IP, Layer 3). Das an dieser Stelle insbesondere für Streaming von Sprache und Video eingesetzte UDP (User Datagram Protocol) hat diese Paketsicherungsfunktion nicht und ist damit grundsätzlich unsicherer.

¹⁸ Dies sagt nichts über die Machbarkeit aus.

Zur Berücksichtigung differenzierter Qualitätsklassen sieht das Kostenmodell verschiedene Verkehrsklassen vor, die jeweils Dienste mit relativ homogenen Qualitätsanforderungen zusammenfassen. Verkehrsklassen werden anhand von festzulegenden Werten für die Latenz definiert, die im Modell bereits vorparametriert sind. Bei der Anwendung des Modells entscheidet der Modellanwender parametergesteuert, wie viele Verkehrsklassen er berücksichtigen will (die Mindestanzahl beträgt dabei eine einheitliche Verkehrsklasse (best effort); die maximale Anzahl kann auf acht verschiedene Verkehrsklassen festgelegt werden).¹⁹ Anschließend werden die unterschiedlichen Dienste den Verkehrsklassen zugewiesen und erhalten so standardisierte Qualitätswerte.

Mit der Implementierung von maximal 8 Verkehrsklassen soll im Modell weder die Notwendigkeit noch der Umfang einer Qualitätsdifferenzierung vorweggenommen werden. Die hier gewählte Vorgehensweise soll lediglich sicherstellen, dass im Fall einer QoS-Differenzierung das Modell zur Kostenbestimmung geeignet ist und einen ausreichend großen Rahmen zur Verfügung stellt.

Darüber hinaus ist zu betonen, dass die Beurteilung der Wünschenswertigkeit einer QoS-Differenzierung auch nicht auf die „Betrachtung der Netzkosten“ reduziert werden kann. Letztlich sind wettbewerbliche Aspekte und Dynamiken für eine umfassende Würdigung einer Einführung verschiedener Verkehrsklassen aus regulatorischer Sicht von zentraler Bedeutung.

Das Modell berücksichtigt die qualitativen Anforderungen der verschiedenen Verkehrsklassen durch Zuschlagsfaktoren (Mark-up) auf die grundsätzlich aus der Anwendung abgeleiteten mittleren Bandbreite, wobei die Zuschlagsfaktoren unter Rückgriff auf Modelle der Warteschlangentheorie (M/M/1) im Netzplanungsmodul aus den Qualitätsparametern belastbar abgeleitet werden.

3.2 Informationsanforderungen an Verkehrsdaten

Da es sich um ein Bottom-up Kostenmodell handelt, stellt die Modellierung der Nachfrage ein zentrales Element dar – sowohl für die Investitionswertbestimmung (Peaknachfrage) als auch später für die Kostenzurechnung. Wie in Abschnitt 3.1 angedeutet, müssen in einem diensteintegrierten Breitbandnetz die verschiedenen Anforderungen der Dienste hinsichtlich Verkehrszielen und QoS – neben der eigentlichen Verkehrsmengenbetrachtung - Berücksichtigung finden.

¹⁹ Verkehrsklasse wird hier als Oberbegriff zu QoS-Klasse verwendet. Damit wird ausgesagt, dass ggf. mehrere (ähnliche) QoS-Klassen bei der Verkehrsführung zu einer Verkehrsklasse zusammengefasst werden.

Zentrale Größen der Netzdimensionierung des Breitbandnetzes sind

- Busy Hour-Verkehr des Gesamtnetzes, beschrieben durch das Maximum des faktisch schwankenden Busy Hour Verkehrs für die definierte Busy Hour (die in den Grenzen von 0 bis 24 Stunden definiert sein kann)²⁰
- Verkehrsziele
- QoS-Anforderungen

Verkehrswerte

Die Verkehrswerte leiten sich aus dem vom Nutzer induzierten Verkehr ab. Letztlich wird der Nutzer als Verkehrsverursacher angesehen und ihm werden die Verkehrswerte – differenziert nach up- und downstream – zugeordnet und für alle an einen MPoP angeschlossenen Endkunden entsprechend aggregiert²¹.

Die Verkehrsnachfrage fließt somit auf Ebene der MPoP-Standorte in das Modell ein. Die beschriebene Vorgehensweise – die Verkehrsnachfrage auf Basis einer durchschnittlichen Nachfrage pro Nutzer, differenziert nach Produktgruppen zu beschreiben²² – ist aus herkömmlichen Modellen für das klassische PSTN-Verbindungsnetz bekannt. Für eine möglichst realistische Verteilung der Verkehrsnachfrage in der Fläche wurden für die drei Anschlusstypen Analog, ISDN und PrimärMultiplex jeweils individuelle durchschnittliche Erlangwerte für die Busy Hour angegeben. Für das vorliegende NGN-Kostenmodell wurde ein vergleichbarer Ansatz vorgesehen, der es erlaubt, bis zu 36 verschiedene Anschlusstypen²³ zu definieren, denen spezifische Verkehrsnachfragen zugeordnet werden können. Auf diese Weise kann – sofern die berücksichtigten Anschlusstypen in der Fläche hinreichend unterschiedlich stark vertreten sind (Häufigkeit

20 Bei der Busy Hour handelt sich um die globale Spitzenlast aus allen Diensten. Eine Netzdimensionierung hat nach Maßgabe des größten Verkehrsbedarfes im Netz zu erfolgen, d.h. nach der Spitzenlast in der Busy Hour (BH). Allerdings wird bei Netzelementen, die nur vom Sprachverkehr in Anspruch genommen werden, die individuelle Busy Hour des Sprachdienstes verwendet, um die sprachspezifischen Netzelemente (z.B. den Softswitch) entsprechend zu dimensionieren. Der Unterschied zwischen Gesamtnetz Busy Hour und der Sprachnetz Busy Hour wird durch einen Multiplikationsfaktor beschrieben und umgerechnet.

21 In der Welt des PSTN wurde in diesem Kontext von der Bestimmung des Quellverkehrs gesprochen. Dabei wurde der A-Teilnehmer immer als Verkehrs-Quelle definiert. In der paketvermittelten Welt des NGN besteht nicht mehr die Symmetrie der in Anspruch genommenen Übertragungskapazitäten in beide Richtungen („full duplex“). So kann umgangssprachlich bei einem Download der entsprechende Server als „Quelle“ angesehen werden und nicht der Endkunde, der diesen Download initiiert. – Um diese sprachliche Unschärfe zu vermeiden, sprechen wir nicht von Quellverkehr, sondern von nutzer-induziertem Verkehr.

22 Dabei wird „Nutzer“ synonym zu „Anschlussleitung“ verwendet. Die Anschlussleitung ist für die Modellierung die sinnvolle Bezugsgröße, da auf dieser Ebene eine Erfassung von Verkehrsmengen durch den Netzbetreiber möglich ist – dies gilt nicht für die dahinterliegenden Nutzer, welche sich letztlich hinter den Anschlüssen „verbergen“.

23 Anstelle von Anschlusstypen können auch andere eindeutige die Nachfrage differenzierende Kriterien verwendet werden, wie z.B. Produktgruppen.

der Anschlussstypen je MPoP-Standort) – ein entsprechendes regional differenziertes Abbild der Nachfrage generiert werden.

Sollen Verkehrswerte vom Netzbetreiber erfragt werden, bilden die real existierenden Anschlussnetze (HVt-Standort bzw. MPoP) die Basis für die Informationserhebung.

Die Modellanwendung verlangt, dass für jeden Standort der untersten Netzebene (MPoP) folgende Größen vorliegen, die sich u.a auch aus den an ihnen angeschlossenen Anschlussnetzen ergeben:

- Anzahl der Nutzer je Nutzertyp (inkl. der zugehörigen, nachgefragten Dienstekategorien),
- die am Standort anzuwendende Anschluss Technologie (Anschlussmix).

Für jeden der maximal 36 Anschlussstypen²⁴ ist eine durchschnittliche Verkehrsnachfrage in der Busy Hour zu parametrieren. Dazu ist im Modell vorgesehen, für jeden Anschlussstypen die Busy Hour Erlang Nachfrage, differenziert nach Dienstekategorien, zu spezifizieren.

Hierfür sind im Modell die Verkehrseigenschaften der Dienste bzw. der Dienstekategorien zu parametrieren. Letztlich greifen die Busy Hour Erlang Werte der im Modell berücksichtigten Anschlussstypen auf die durchschnittliche Bandbreite der jeweiligen Dienstekategorie, sowohl im upstream als auch im downstream, zurück.²⁵ Solange eine QoS-Differenzierung von Diensten im Modell vernachlässigt wird, sind die mittleren Bandbreiten hinreichend für die vorzunehmende Netzdimensionierung.

Die Verkehrsnachfragen je Dienst und Nutzertyp werden durch Matrizen pro Anschlussart für jeden Standort (MPoP) angegeben. Damit wird sichergestellt, dass die Bandbreitenachfrage eines Nutzers nicht die Bandbreitenwerte der Anschlussart überschreiten. Im Ergebnis wird in das Modell ein je Anschlussart abgeleitetes Nutzerverhalten zur Busy Hour eingespeist.

²⁴ vgl. Fußnote 23, die Ausführungen gelten beispielsweise für eine Differenzierung nach Produktgruppen entsprechend.

²⁵ Aufgrund der full duplex Eigenschaften der Übertragungstechnik ist das Maximum aus down- und upstream für die Netzdimensionierung von Layer 1 bestimmend und damit auch für die Ports der Layer 2 und Layer 3 Einrichtungen.

Tabelle 3-1: Nachfragematrix eines Anschlusstyps, gegliedert nach Nutzerarten und Diensten, hier in Erlang zur Busy hour²⁶

Name	Trad.	Standard	Premium	SOHO	SME	LE
Premium Business Dienste	0	0	0	0	0,2	1
Sprachdienste	0,05	0,075	0,1	0,15	1,5	5
Konferenzdienste	0	0	0	0,001	0,005	0,01
VoD Dienste	0	0,01	0,02	0	0	0
Business Data Dienste	0	0	0	0,1	0,5	5
P2P	0,1	0,2	0,5	0	0	0
Sonstige Best effort Dienste	0,1	0,2	0,5	0,2	0,5	5
Erlang total	0,25	0,485	1,12	0,451	2,705	16,01

Ein Bottom up Modell bedarf neben der Information über die Nutzer induzierten Verkehre noch zusätzlichen Informationen über das Routing und die damit in Verbindung stehenden Verkehrsziele sowie ggf. über zu berücksichtigende QoS-Anforderungen. Beide Merkmale sind Dienste spezifisch und daher entsprechend für jede Dienstekategorie festzulegen. Sofern keine Informationen über diese Eigenschaften von dem betrachteten Netzbetreiber bereitgestellt werden, kann ggf. über andere verkehrs- oder netzbezogene Kennziffern (bspw. die Busy Hour Bandbreite an den IP-IC Einrichtungen) eine Aufteilung der durchschnittlichen Busy Hour Erlang Nachfrage vorgenommen werden. Aufgrund ihrer Bedeutung sollen Verkehrsziele und QoS-Anforderungen von Dienstekategorien nachfolgend näher erläutert werden.

Verkehrsziele

Die Bottom-up Kostenmodellierung bedarf einer Verkehrsmatrix, die neben der Quelle (hier der MPoP, auf den der Verkehr der Endkunden, die als Verkehrsverursacher von up- und downstream gelten, projiziert wird) auch die Ziele beinhaltet. Erst auf dieser Basis kann dann in einem weiteren Schritt eine Spezifizierung der Verkehrsführung (der Weg des Verkehrs von der Quelle bis zum Ziel) vorgenommen werden, aus denen die für das Kostenmodell die notwendigen Informationen zur Dimensionierung von Netzknoten und –kanten generieren können.²⁷

²⁶ Die Busy hour Erlang Werte können über die durchschnittliche Bandbreite eines Dienstes je Nutzertyp zur Busy hour in Bandbreitenwerte eines Anschlusses umgerechnet werden und umgekehrt, vgl. auch Tabelle 3-5..

²⁷ Eine Sonderrolle nimmt hier der Dienst IP-TV ein. Aufgrund des Einsatzes von Multicast muss nicht der gesamte Datenstrom für jeden Nutzer individuell übertragen werden. Dies gilt nur für den jeweils letzten Netzabschnitt. – Aus diesem Grund wird auf den Dienst IP-TV und seine Berücksichtigung im Modell gesondert eingegangen.

Das von den Nutzern induzierte Verkehrsvolumen, projiziert auf die jeweiligen MPoP-Standorte, bildet die Ausgangsbasis für die Verkehrsverteilung. Die Verkehrsbeziehungen werden nicht nur zwischen Teilnehmern realisiert (Ende-zu-Ende), sondern zu einem Großteil durch sogenannte Client-Server Verkehrsrelationen, die zwischen Teilnehmern und zentral aufgestellten Servern etabliert werden. Wir unterscheiden²⁸ daher zwischen den dienstespezifischen Verkehrsrelationen

- Ende-zu-Ende und
- Client-Server

Darüber hinaus gilt es zu unterscheiden, ob die so klassifizierten Verkehre im Netz verbleiben, also On-net sind, oder das Netz an irgendwelchen Netzübergängen verlassen (Interconnection/ Peering). Die Anwendung einer Quelle-Ziel Matrix wurde für sämtliche Dienstekategorien im Kernnetz implementiert.

Bei den Ende-zu-Ende Verbindungen sind die Verkehrsquellen gleichzeitig auch die potentiellen Verkehrssenken. Für die Aufteilung des Verkehrs wird eine Gewichtung unter den Verkehrszielen vorgenommen. Steuerungsparameter sind dabei der „Interne Verkehr“ (Quelle und Ziel sind identisch, d.h. die Teilnehmer sind an denselben MPoP bzw. HVt angeschlossen), und das Verkehrsgewicht der Knoten²⁹ im Kernnetz. Je höher der Verkehrswert, desto mehr Verkehr wird dorthin geroutet. Ebenso wie der interne Verkehr mindert der Interconnection-Verkehr (welcher als Anteil des ausgehenden Verkehrs festzulegen ist) das mit Hilfe der Verkehrsverteilungsfunktion zu verteilende ausgehende Verkehrsvolumen. Im Konzentrationsnetz erfolgt die Verkehrsverteilung innerhalb der jeweiligen Netzsegmente clusterbezogen, wobei hier zusätzliche Inputparameter zur Verfügung stehen, die es erlauben, den Umfang des in den unteren Clustern verbleibenden Verkehrs zu steuern. Innerhalb der Cluster greift dann – ebenso wie im Kernnetz – die Verteilung nach dem Knotengewicht.³⁰

Für die Beschreibung der Client-Server Verkehrsrelationen sind die Standorte der Server sowie ihre Anzahl von Bedeutung. Die dienstespezifischen Serverstandorte werden jeweils in Ihrer Menge als Eingabeparameter in das Modell eingepflegt. Auf dieser Basis lassen sich dann die von den Nutzern in den MPoP-Standorten generierten Verkehre auf die verschiedenen (Ziel-)Standorte verteilen.

Die Bildung von Dienstekategorien erlaubt es dabei, Verkehre mit homogener Charakteristik sowie ähnlicher QoS-Anforderung und mit gleicher Zielstandortmenge zusam-

28 Neben reinen Punkt-zu-Punkt-Relationen sind im Breitbandnetz auch Punkt-zu-Multipunkt-Relationen von Bedeutung.

29 Verkehrsmenge, die im Knoten (und den zugehörigen untergeordneten Knoten) aggregiert wird.

30 Es ist selbstredend, dass eine Intra-Cluster Verkehrsverteilung im Konzentrationsnetz nicht auf client-server Relationen Anwendung finden kann.

menzufassen,³¹ und dann für diese Dienstekategorien jeweils spezifische Verkehrsverteilungsfunktionen zu parametrieren, so dass eine Verkehrsmatrix abgeleitet werden kann. Hinsichtlich der Ende-zu-Ende Dienstenachfrage wie beispielsweise VoIP oder Peer-to-Peer ist der Anteil bei der Verkehrsbestimmung zu beachten, der innerhalb des betrachteten Netzes verbleibt und somit bei jedem der beiden Clients gezählt werden muss.

Erst auf Basis einer Verkehrsmatrix kann dann – unter Anwendung von Regeln der Verkehrsführung und unter Berücksichtigung der abgeleiteten Hierarchie des logischen Netzes – eine Dimensionierung von Netzelementen vorgenommen werden. Die Asymmetrie der Verkehrsströme, d.h. eine Differenzierung von up- und downstream ist dabei zu berücksichtigen.

Multicast-Dienste werden separat zu den sonstigen Verkehren berücksichtigt. Dies ist methodisch deswegen notwendig, da vom Einspeisepunkt des Multicast-Stroms ausgehend, das Verkehrsvolumen nicht mit der Anzahl der Multicast-Teilnehmer multipliziert werden darf.³² In Abschnitt 3.4 wird die Berücksichtigung von IP-TV im Modell beschrieben.

Qualitätsdifferenzierung

Ob dienstespezifische QoS-Anforderungen eingehalten werden können, hängt letztlich von charakteristischen Parameterwerten der Verkehrsnachfrage ab. Sie fließen in die Netzdimensionierung ein.

Verkehrsmatrix

Die nachfolgend dargestellte Verkehrsmatrix fasst letztlich die Informationsanforderungen an die Bestimmung der Verkehrsnachfrage zusammen. Idealtypisch werden diese Informationen (Busy Hour Verkehrswerte) vom zu betrachtenden Netzbetreiber bereitgestellt. Liegen diese Informationen nicht aufgegliedert, sondern nur als Gesamtwert vor, so kann unter Rückgriff auf Koeffizienten eine Aufteilung der Verkehre auf Ziele und Verkehrsklassen erfolgen. Hierbei sind entsprechende Einschätzungen über die Höhe der Koeffizienten vorzunehmen. Siehe hierzu auch die beispielhafte Ableitung der Verkehrswerte dargestellt in Tabelle 3-7 in Abschnitt 3.3.3.

31 Beispielsweise können unter der Kategorie „best effort Dienste“ verschiedene Dienste wie E-Mail und WWW zusammengefasst werden, da hier in beiden Fällen Server die Zielstandorte im Netz charakterisieren.

32 Sofern über Bitstrom als Vorleistungsprodukt auch von alternativen Netzbetreibern Multicast-Ströme realisiert werden, sind diese Verkehre entsprechend bei der Abbildung des Interconnection-Verkehrs zu parametrisieren.

Abbildung 3-1: Verkehrsmatrix für einen MPoP (jeweils für up- und downstream)

Ziel	Ziel 1	Ziel 2	Ziel 3	[...]	Ziel n	Σ Verkehrsnachfrage nach Verkehrsklassen
Verkehrsklasse für						
Verkehrsklasse 1	[kBit/s]					Σ Verkehrsnachfrage Klasse 1 MPoP-Standort i
Verkehrsklasse 2						
...						
...						
...						
Verkehrsklasse n						
Σ Verkehrsnachfrage nach Verkehrszielen						Σ Verkehrsnachfrage MPoP-Standort i

Summe über alle am MPoP-Standort i angeschlossenen Teilnehmer

Hinsichtlich des Datenbedarfs ist anzumerken, dass die **Verkehrsmatrizen keinen Modellinput** darstellen. Das Modell bedarf lediglich der Angabe des durchschnittlichen nutzerinduzierten Verkehrs der MPoPs (differenziert nach Nutzertypen bzw. Anschlussprodukten) sowie der Angabe, wie sich dieser Verkehr (für den durchschnittlichen Nutzertyp) auf die verschiedenen Verkehrsziele (Clients, Server oder IC-Punkte) aufteilt. Die Standorte der Server- und IC-Einrichtungen fließen separat als Input in das Modell ein. Das Modell selbst sorgt dann für die Verknüpfung des nutzerinduzierten Verkehrs (und seiner zielspezifischen Angaben) mit den Standortinformationen und damit letztlich für die Ableitung der Verkehrsmatrizen.³³

Neben den allgemeinen Dienstekategorien findet die Zusammenschaltung von Sprachverkehr eine besondere Berücksichtigung. Eine zentrale Zielgröße der Breitbandnetzmodellierung ist die Bestimmung von Kosten der Zusammenschaltung. Dies macht es erforderlich, den Interconnection-Verkehr – ausgehend wie eingehend – explizit zu betrachten. Aufgrund der Anforderungen an die Verkehrsführung konstituiert dabei jede Kategorie von Zusammenschaltungsverkehr (dazu zählen auch die verschiedenen Tarifstufen local, single und double³⁴) einen eigenen Dienst im Breitbandmodell. Zum ei-

³³ Sofern beispielsweise mehrere Diensteserver an verschiedenen Standorten vorgesehen werden, erfolgt ein Routing des entsprechenden Serververkehrs zum nächstgelegenen Serverstandort.

³⁴ Die Verkehrsmengen zu den verschiedenen Tarifstufen erlauben Rückschlüsse über die regionale Verteilung des Verkehrs. Sofern sich die Interconnection Struktur nicht ändert, können die Anteile der Verkehre dieser drei (EU-normierten PSTN-) Tarifstufen unmittelbar im Modell parametrisiert werden. Bei grundsätzlichen Änderungen der Zusammenschaltungsstrukturen sind diese jedoch über Exper-

nen sind für den Interconnection-Verkehr (IC-Verkehr sowohl für Sprach- als auch IP-Zusammenschaltung sowie Bitstrom) entsprechende Zusammenschaltungspunkte (Verkehrsziele) zu definieren, die gleichermaßen für eingehenden und ausgehenden Verkehr verwendet werden. Da die IC-Standorte nicht IC-Tarif spezifisch sind, sondern sich die Einordnung des IC-Verkehrs in eine bestimmte Tarifstufe unter Berücksichtigung des Routings innerhalb der Netzhierarchie ableitet, wurden entsprechende Routing-Regeln für die verschiedenen Tarifstufen implementiert.

Zusätzlich erfordert die Modellanwendung, die Angabe der zugehörigen Anteile (Verkehrsvolumina) der Tarifstufen (Verkehrsübergabestufen) festzulegen. Die Modellierung sowohl des eingehenden als auch des ausgehenden IC-Verkehr soll anteilig am gesamten Sprachverkehr erfolgen.

Die Verkehre für Sprach-Interconnection (VoIP, PSTN) werden nach Maßgabe der Verkehrsstärke der einzelnen Knoten verteilt. Gleiches gilt für den Bitstrom Verkehr. Die Übergabepunkte für die Verkehre in andere Netze werden je Dienst (Sprache (TDM, VoIP), Bitstrom) unabhängig voneinander festgelegt. Für Bitstrom gilt als Nebenbedingung, dass alle Knoten einer Netzebene den Bitstromübergang anbieten oder nicht. Für die Übergabe des Internetverkehrs an andere Netze können mehrere Übergabepunkte definiert werden, die sich auf die Knoten der oberen Netzebene in der Reihenfolge ihrer Verkehrsstärke verteilen. Sofern exogen keine andere Verteilung vorgegeben wird, wird das Modell die Verkehre auf Basis von Inputparametern endogen verteilen und den Umfang des abzuführenden Verkehrs über einen prozentualen Anteil an der Verkehrsnachfrage dieses Dienstes Inputparametergesteuert festlegen. Diese Vorgehensweise erlaubt sowohl eine gleichmäßige Verteilung des IC-Verkehrs auf die Points of Interconnection (PoI) als auch eine Gewichtung.

3.3 Bottom-up Bestimmung der Verkehrsnachfrage

Eingangs wurde bereits ausgeführt, dass die Modellanwendung auch einer unabhängigen Bestimmung der Verkehrsnachfrage zugänglich gemacht werden soll. Dies bedeutet, dass die Nachfrage in diesem Fall nicht in Form von Verkehrswerten – wie in Abschnitt 3.2 beschrieben – abgebildet wird, sondern es wird von allgemeinen Nachfrage-daten ausgegangen, die dann entsprechend transformiert werden, um die für die Modellierung notwendigen Verkehrswerte zu generieren.

tenschätzungen in angemessene neue Werte zu überführen, die das Ausmaß des verbleibenden Sprachverkehrs auf den oberen Netzebenen beschreiben, die ja den überregionalen Verkehr transportieren. Für die Parametrierung des Modells dienen die Tarifstufen eher als Verkehrsübergabestufen.

Dieser Abschnitt illustriert die methodische Vorgehensweise einer solchen unabhängigen Nachfragebestimmung und motiviert unter Rückgriff auf die bestehenden Zusammenhänge der verschiedenen Einflussgrößen den implementierten Modellierungsansatz. In den Ausführungen werden dabei **die umfassendsten Informationsanforderungen berücksichtigt, da – wie bereits ausgeführt – das Modell auch für eine potenziell zukünftig erforderliche Differenzierung von Verkehrsklassen anwendbar sein soll**. Die Umsetzung dieses Anspruchs macht eine stark differenzierte Abbildung der Bestimmung der Verkehrsnachfrage erforderlich.

Die in diesem Abschnitt gewählten Beispiele dienen ausschließlich der Illustration und sollen keine – ggf. entgeltregulierungsrelevante – Bestimmung der Verkehrsnachfrage vorwegnehmen. Dies gilt insbesondere für die Klassifizierung von Diensten hinsichtlich Zielen, Verbindungstopologie und Verkehrsklassen.

Selbstverständlich gilt auch hier, dass eine Reduktion der Komplexität (Verringerung der Anzahl von Verkehrsklassen sowie Differenzierung von Zielstandorten bei Client-Server Diensten sowie Zusammenschaltung) immer möglich und vermutlich in absehbarer Zeit die wahrscheinlichste Anwendungsform ist.

Aus dem globalen Modellansatz, der im letzten Kapitel dargestellt wurde, ergibt sich die grundlegende Bedeutung der Verkehrsnachfrage und seine Netzelement bezogene Projektion. Wie bereits ausgeführt sind dabei bestimmend

- die Standort bezogene Busy Hour Erlang Verkehrsnachfrage unter Berücksichtigung der dienstespezifischen Bandbreiten
- die dienstespezifischen Verkehrsziele sowie
- die dienstespezifischen QoS-Anforderungen.

Daraus wird deutlich, dass die Dienstespezifizierung einen zentralen Ausgangspunkt für die generische Bottom-up Modellierung bildet. Sie konstituiert die Basis für Ableitung des Mengengerüsts, d.h. Nutzerzahlen und Busy Hour Erlang Werte werden – ggf. differenziert nach Anschlusstypen³⁵ – auf die definierten Dienstekategorien angewendet.

Die Ableitung eines standortspezifischen Mengengerüsts erfordert

- die Festlegung von Busy Hour Erlang Werten je Dienstekategorie für jeden Anschlusstyp

³⁵ vgl. Fußnote 23, die Ausführungen gelten für eine andere Nachfrageerfassung (z.B. nach Produktgruppen) entsprechend.

- die Festlegung der Anschlusszahlen je Anschlusstyp für jeden MPoP

Auf dieser Basis kann unter zu Grunde legen von Nutzer-/Anschluss- und zugehörigen Verkehrsszenarien die Verkehrsnachfrage und ihre Verteilung über die Standorte der untersten Netzebene (den MPoP-Standorten) bestimmt werden.

Bei einer generischen Bottom-up Modellierung bedarf es daher auch der Festlegung von Busy Hour Erlang Werten je Dienstekategorie differenziert nach Anschlusstypen. Liegen keine Daten für konkrete Anschlussprodukte vor, kann eine allgemeine Klassifizierung von Nutzertypen und Zugangstechnologien eine generische Struktur zur Ableitung der benötigten Busy Hour Erlang Nachfrage bieten.

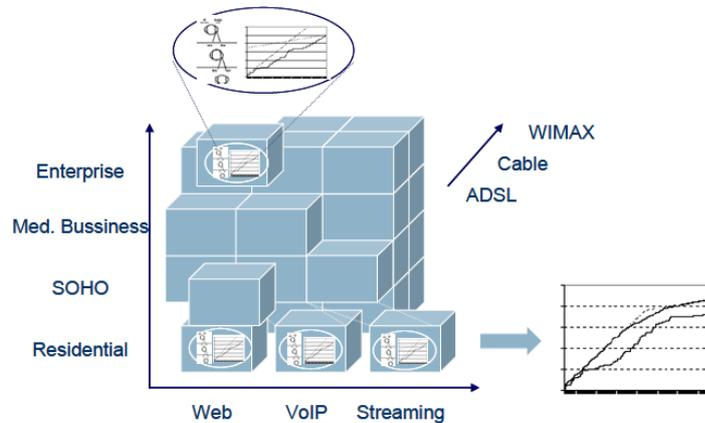
D.h., die Verkehrsnachfrage der Nutzer bzw. Anschlusstypen wird durch ein Mengengerüst aus Diensten, Anschlusstechnologien und Nutzertypen abgeleitet. Damit wird ein Szenario über die von den Nutzern generierte Verkehrsnachfrage durch ein Werte-Triple aus drei Attributen gebildet:

- Nutzertyp
- Technologie des zugehörigen Anschlussnetzes
- Dienste und deren Inanspruchnahme

Ein analytisches Modell, welches den Zusammenhang zwischen den Werte-Trippeln auf mathematische Weise beschreibt, findet sich in [Garcia-08]. Auf der Grundlage dieses Modells wurde dort ein Szenariengenerator entworfen und durch das sog. CASUAL Model³⁶ abgebildet. Dieses Modell wird als Grundlage für die unabhängige Ableitung der Verkehrsnachfrage herangezogen. Abbildung 3.2 zeigt ein Beispiel für die Anwendung des CASUAL-Modells auf Attributwerte, wie sie sich aus heutiger Sicht für den Netzentwurf eines NGN und dessen Dimensionierung darstellen. Die verwendeten Nutzertypen, Anschlusstechnologien und Dienste sind lediglich beispielhaft und bedürfen einer entsprechenden Spezifikation für den jeweiligen Anwendungsfall.

³⁶ Cube of Accesses / Services / Users for Free Assignment.

Abbildung 3-2: Das CASUAL-Model mit seiner Anwendung auf derzeitige Werte aus den Attribut-Trippeln



Quelle: [Garcia-08]

Nach diesem Modell sind die Nutzer nach entsprechenden Typen zu klassifizieren und jedem Nutzertyp ein Attribut für die Anschlusstechnologie sowie Dienste- und Verkehrsparameter zuzuweisen.

Da wir im regulatorischen Kontext jedoch davon ausgehen, dass zentrale Verkehrsparameter für die Modellparametrisierung verfügbar sind, beschränkt sich die nachfolgende Darstellung auf die Festlegung der Dienste- und Verkehrsparameter. Nachfolgend werden die Kategorien Nutzertyp und Anschlusstechnologie vereinfachend zu der Variablen Anschlusstyp³⁷ zusammengefasst.

Die Marktbefragung in Österreich ergab, dass die Netzbetreiber derzeit typischerweise auf eine Differenzierung nach Nutzertypen verzichten. Offensichtlich sind die Beschränkungen des Anschlusses derzeit noch überwiegend Verkehrsverhalten bestimmend. Dies mag sich zukünftig, bei Existenz breitbandiger Anschlüsse in der Fläche, ändern. Das Modell ist diesbzgl. flexibel. Derzeit wurde es daher mit anschlussbezogenen Daten befüllt.

Dennoch sollen die auch im weiteren beispielhaft verwendeten Nutzertypen im folgenden Abschnitt 3.3.1 kurz vorgestellt werden.

³⁷ Vgl. Fußnote 23, ggf. auch Variable Produktgruppe

3.3.1 Nutzertypen

Eine Differenzierung nach Nutzertypen erlaubt, die Zusammensetzung und den Umfang der nachgefragten Dienste differenziert abzubilden.

Sie ist beispielhaft in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Bestimmend für die Klassifikation ist die Homogenität der Verkehrsnachfrage innerhalb einer Klasse. Es kann daher **hier ggf. eine andere als die in Tabelle 3-2 dargestellte Klassifizierung vorgenommen werden.**

Tabelle 3-2: Beschreibung einer möglichen Klassifikation von Nutzertypen

Traditionell	Private Nutzer, die das NGN nur für klassische Dienste verwenden wie Telefon, Internetabfragen bzw. private Nutzer in Zonen, die einen Anschluss an das NGN nur mit verminderter Bandbreite ermöglichen
Standard	Private Nutzer, die das NGN für klassische Dienste, aber auch für Internetdienste verwenden, die keine hohe Bandbreite erfordern, bzw. private Nutzer in Zonen, die einen Anschluss an das NGN nur mit verminderter Bandbreite ermöglichen
Premium	Private Nutzer, die das NGN für klassische Dienste für Internet Dienste sowie Multimedia-Dienste verwenden
SOHO Small Offices / Home Offices	Nutzer in der Kategorie von Selbstständigen, Freiberufler bzw. Heim-Arbeiter die aus Heimbüros arbeiten und ein anderes Dienste-Profil als Premium-Nutzer haben
SME Small and medium enterprises	Geschäftsnutzer aus kleinen- und mittleren Unternehmen
LE Large enterprises	Geschäftsnutzer aus großen Unternehmen

Für die Modellparametrisierung sind diesen Nutzertypen konkrete Dienstenachfragen in Form einer Dienste-Verkehrsmatrix zuzuordnen (differenziert nach Dienstekategorien, beschrieben durch die Parameter unter Abschnitt 3.3.2).

3.3.2 Dienstemodell

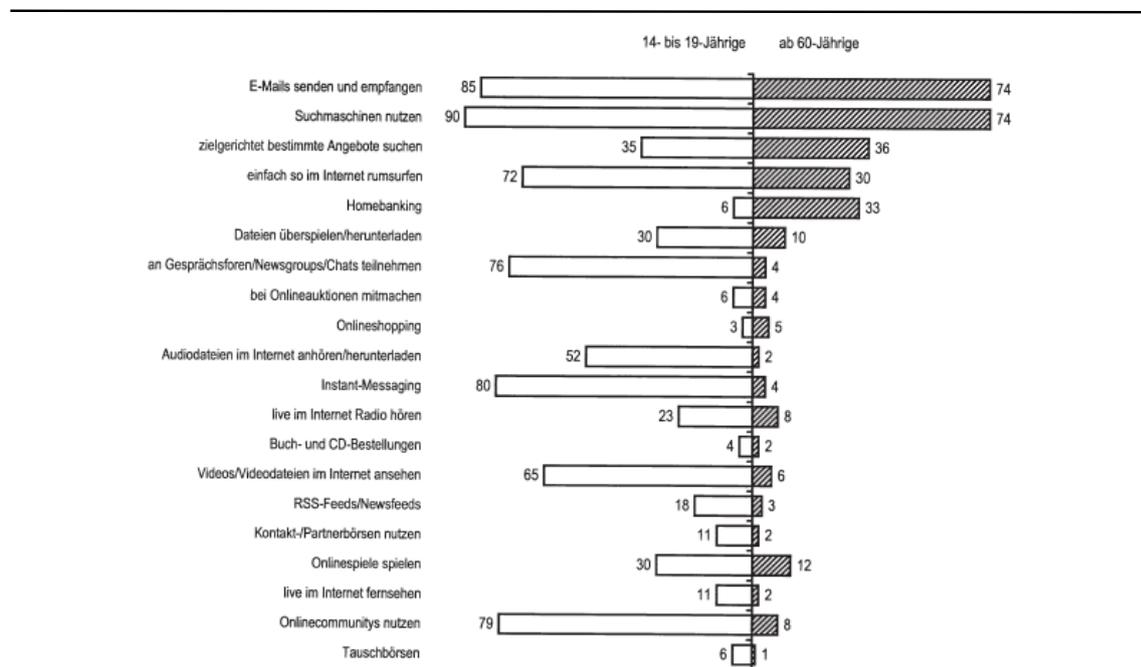
Dieser Abschnitt gliedert sich in 3 Unterabschnitte. Im Ersten werden die bestehenden und zukünftigen Kommunikations- und Multimediadienste klassifiziert und verbal beschrieben. Im Zweiten werden die modellierungsrelevanten Eigenschaften der Dienste zusammengefasst. Abschließend wird ein vereinfachtes Dienstemodell beschrieben, das die verkehrsspezifischen Eigenschaften der Dienste/Dienstekategorien illustriert.

3.3.2.1 Verbale Beschreibung aktueller Dienste

Das NGN stellt eine Transport-, Kontroll- und Dienstzugangs-Plattform zur Verfügung, die es gestattet, alle bisherigen Dienste, sowohl Kommunikations- als auch Multimedia-Dienste, zu integrieren.

Die Online-Dienste bieten aus heutiger Sicht das umfangreichste Angebot. Abbildung 3-3 beschreibt an einem Beispiel die wichtigsten Online-Dienste und deren Verwendung für 2 Altersklassen.³⁸

Abbildung 3-3: Beispiel für Online-Nutzung (Deutschland)



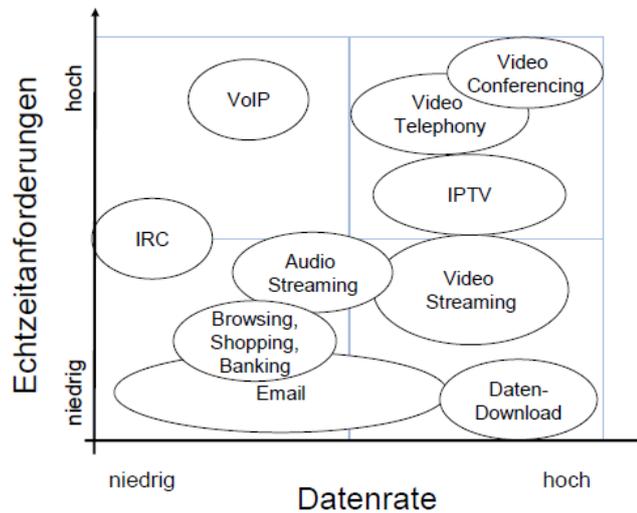
Quelle: [Eimeren-09]

Die Integration von Sprache, Video und Multimedia-Diensten in das NGN ergibt erhöhte QoS-Anforderungen, die sich aus den Echtzeit-Anforderungen dieser Dienste ergeben und im bisherigen best-effort Internet nur begrenzt erfüllt werden. Den Zusammenhang von Echtzeit-Anforderungen eines Dienstes und seinem Bandbreitenbedarf zeigt Abbildung 3-4. Danach ergibt sich, dass vor allem Video-Dienste sowohl hohe Echtzeit- als

³⁸ Auch wenn mit der mittleren Altersklasse der größte Teil der Online-Nutzer ausgeblendet bleibt, illustriert die Abbildung die Vielzahl von Online-Diensten.

auch Bandbreitenanforderungen haben. Dagegen rangiert VoIP in seinen Bandbreitenanforderungen eher an hinterer Stelle.³⁹

Abbildung 3-4: Korrelation zwischen Bandbreitenanforderung eines Dienstes und seiner Multimedialität



Quelle: [Jay-08]

Die bisher betrachteten Dienste entstehen vor allem im Sektor von Privatkunden, während aus dem Sektor von Geschäftskunden noch Dienste aus virtuellen und Festverbindungen wie „Pseudowire“, VLAN, VPN sowie digitale Mietleitung in die Modellierung einzubeziehen sind.

3.3.2.2 Modellierungsrelevante Eigenschaften der Dienste

Für die Modellierung sind die in der nachfolgenden Tabelle 3-3 dargestellten Attribute für jede Dienstekategorie zu parametrisieren.

³⁹ Um das Verkehrsaufkommen eines Dienstes am Gesamtverkehr zu beurteilen, ist letztlich auch die Häufigkeit der Nachfrage von Bedeutung.

Tabelle 3-3: Numerische Beschreibung von Diensten

Attribut-Name	Werte
Mittlere Bandbreite up	[kbitps]
Mittlere Bandbreite down	[kbitps]
Mittlere Paketlänge up	[kbitps]
Mittlere Paketlänge down	[kbitps]
Verbindungstopologie (distribution characteristics)	Point to Point, Point to Multipoint, Point to Server
durchschnittliche Anzahl der Endpunkte (Ziele) pro Verbindung	≥ 2
Qualitätsklasse	z.B. 1 – 8
mittlere Verzögerungszeit	[ms]

Neben den Bandbreitenanforderungen oder Angaben, aus denen die Bandbreite berechnet werden kann, sind für jeden Dienst die Symmetrie und Topologie der Verbindung sowie die Form der Verteilung der Verkehre anzugeben. Zusätzlich ist jeder Dienst nach seinen Qualitätsanforderungen zu klassifizieren. Im Kostenmodell ist dazu eine maximale Anzahl von Verkehrsklassen (acht) definiert.

3.3.2.3 Vereinfachtes Dienstemodell

Die Vielzahl der bestehenden Dienste und die Möglichkeit von zukünftigen Diensten machen es erforderlich, vergleichbare Dienste in einem ersten Schritt in eine begrenzte Menge von Dienstekategorien zusammenzufassen und für jede gemeinsame Kategorie Bandbreitenwerte und QoS Parameter anzugeben. Bei einer sinnvollen Zusammenfassung kann damit die Anzahl der Eingabeparameter für die Beschreibung der Verkehrsnachfrage wesentlich reduziert werden, ohne dass das Modell an Aussagekraft verliert. Dabei ist auch zu beachten, dass die Abschätzungen auf der Basis der Dienstekategorien u.U. die Streubreite in den Fehlern einer Feinabschätzung der individuellen Dienste ausgleichen kann.

Im Kostenmodell sind jeder dieser Dienstekategorien Attributwerte entsprechend den Attributen aus Tabelle 3-3 zuzuweisen. Im Modell sind bis zu 12 Dienstekategorien vorgesehen. In Tabelle 3-4 findet sich eine erste Näherung von Attributwerten zu illustrativen Zwecken. Man beachte, dass die Bandbreite (BW, Bandwidth) im downstream/upstream immer aus der Sicht der Nutzer betrachtet wird, unabhängig vom Verkehrsurprung oder Ziel, und dass dieser Wert die mittlere Bandbreite auf IP-Ebene darstellt.

Die in Tabelle 3-4 angegebenen Bandbreitenwerte sind letztlich beispielhafte Eingabeparameter zur Abbildung von Verkehrsszenarien pro Dienstkategorie. Entsprechende Werte sind zu erheben oder aus Marktstudien zu ermitteln bzw. vom Netzbetreiber auf Grundlage der daraus abgeleiteten Busy Hour Erlang-Werte anzugeben. Für die hier

angesetzten und zum derzeitigen Zeitpunkt als sinnvoll erachteten Bandbreitenwerte wurden Daten aus diversen Referenzen entnommen und hochgerechnet.⁴⁰ Den Werten liegen u.a. folgende Annahmen zu Grunde:

- In den einzelnen Dienstekategorien sind Premium-Business-Dienste VPN (derzeit basierend auf FR oder ATM) einschließlich digitaler Mietleitungen auf virtueller Basis (Pseudowire) enthalten.
- Für Sprachdienste wurden Werte nach G.711 verwendet, da dieser genau die Sprachdienste aus dem PSTN/ISDN abbildet.⁴¹
- Konferenzdienste beinhalten sowohl Telefon- als auch Videokonferenz und es wird angenommen, dass diese i.d.R. über einen zentralen Konferenzserver des Betreibers abgewickelt werden.
- Für Video-on-Demand-Dienste (VoD) wird eine Bandbreite von 2880,2 kbitps angenommen.
- Bei IPTV wird sowohl Standard- (3,6 Mbps) als auch High-Definition-TV (9 Mbps) angesetzt. Nachfolgend wird ein Mix von 116:16 plus 30 SD Zusatzkanäle betrachtet, woraus sich ein durchschnittlicher BW-Wert von 4,1 Mbps ergibt (vgl. auch Fußnote 46).

⁴⁰ Eine detaillierte Beschreibung findet sich u. a. in Artikeln, zwei Sondernummer des Journals *Annal de Telecommunication* zum Thema QoE/QoS und Kostenmodelle, vgl. [Fielder-10], [Garica-10].

⁴¹ Unabhängig davon, welcher Verkehrsklasse der Sprachdienst zugeordnet wird, muss für die Modell-anwendung festgelegt werden, welcher Komprimierungsstandard zur Anwendung kommt, um die notwendigen Bandbreitenabschätzungen vornehmen zu können.

Tabelle 3-4: Dienstekategorien im vereinfachtem Dienstmodell und ihre zugehörigen Attributwerte

Name	BW Down [kbps]	BW up [kbps]	Ursprung	Ziel(e)	Nº der Ziele	Verkehrsklasse
Premium Business Dienste	512,5	512,5	user	user	3	
Sprachdienste	95,2	95,2	user	user	1	
Konferenzdienste	420,2	420,2	user	Konferenzserver	3	
VoD Dienste	2880,2	25	user	VoDServer	1	
IPTV (STV) pro Kanal	3600	0	IPTVServer	user	alle	
IPTV (HDTV) pro Kanal	9000	0	IPTVServer	user	alle	
Business Data Dienste	442,4	320	user	user	1	
P2P	336,3	336,3	user	user	4	
Sonstige best effort Dienste	128	64	user	Internet Server	1	

Aufgrund der Offenheit des Modells steht es dem Modellanwender frei, die verfügbaren Dienstekategorien über die Inputparameter individuell anzupassen und somit ggf. auch von Netzbetreibern zur Verfügung gestellte Daten einfließen zu lassen.

Die in der Tabelle ausgewiesenen Bandbreitenwerte repräsentieren die am Netzeingang (Konzentrationsnetz) entstehende Bandbreitenanforderung und beinhalten daher die erforderlichen Overheads der zur Anwendung kommenden Übertragungstechnologien. Diese müssen letztlich auch in den von Netzbetreibern erfassten Daten zur Erfassung der Kapazitätsnachfrage enthalten sein.

3.3.3 Berechnung der Verkehrsnachfrage

Bei der Anwendung des Casual-Modells zur Bestimmung der Verkehrsnachfrage ist eine Standortmenge festzulegen (MPoP-Liste), auf die dieses Modell angewendet wird. Dies ist die unterste Netzebene des Modells und damit der Übergabepunkt zwischen den entsprechenden Anschlussnetzen, welche die Nutzer an den ersten Verkehrskonzentrations-Standort des breitbandigen Verbindungsnetzes anschalten. Dieser Punkt wird – den Ausführungen in Abschnitt 2 entsprechend – als Metropolitan Point of Presence (MPoP) bezeichnet.

Diese MPoP können

- (1) entweder als Eingangsdaten festgelegt werden oder aber
- (2) aus bekannten Standorten von tieferen Ebenen und deren Charakteristiken (Anschlussarten und zugehörige Häufigkeiten) abgeleitet werden.

Liegen Informationen über die MPoP-Standorte vor, Fall (1), so können diese direkt in das Modell einfließen. Die für das Modell notwendigen Daten sind dabei

- die Geokoordinaten der MPoP-Standorte
- die jeweilige Anzahl von Leitungen für die maximal 36 Anschlusstypen⁴²
- die Anzahl von Anschlussleitungen je Anschlusstyp, die über Bitstrom realisiert werden, unter Berücksichtigung der Netzebenen für die Verkehrsübergabe

Werden die erforderlichen Informationen nicht vom Netzbetreiber bereitgestellt, Fall (2), so muss geprüft werden, ob ggf. andere Daten als Ausgangsbasis herangezogen werden können.

Nachdem die Anzahl der Anschlusstypen (ggf. beschrieben durch Nutzertyp und Anschlusstechnologien) und die potenziell in Anspruch zu nehmenden Dienste festgelegt sind, ist abzuschätzen, **in welchem Umfang ein Nutzer während einer Breitbandverbindung in der Busy hour die jeweiligen Dienste in Anspruch nehmen wird.** Dies wird auf Basis des vereinfachten Dienstmodells und deren Dienstekategorien nach Tabelle 3-4 vorgenommen. – An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Möglichkeiten der Netzbetreiber, die von den Endkunden genutzten Dienste zu beobachten, sich in den letzten 5 Jahren wesentlich verbessert haben. War es damals noch eine spürbare Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit der Router, wenn sie im IP-Header den Type of Service (TOS) auslesen sollten, so ist dies heutzutage bei den leistungsfähigen Einrichtungen keine spürbare Beeinträchtigung der Bearbeitungsgeschwindigkeit. Entsprechend gehen wir davon aus, dass heutzutage sowohl Erhebungen der Netzbetreiber möglich sind als auch dass diese Daten unabhängig von regulatorischen Erhebungen in Nachfragestudien analysiert werden. Es ist daher auch möglich, dass eine alternative Zuordnung von Diensten zu Dienstekategorien vorgenommen wird, wobei dann der Zuordnung entsprechende Bandbreiten, Paketlängen und sonstige Merkmale festzulegen sind.

Auf Basis der skizzierten Vorgehensweise zeigt Tabelle 3-5 ein Beispiel für die sich ergebenden Verkehrswerte je Nutzertyp (Anschlusstyp) und Dienstekategorie, ausgedrückt in Erlang in der Busy Hour. Der Wert zeigt die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein

⁴² Vgl. Fußnote 23, ggf. andere Nachfrageklassifizierungen verwendbar, z.B. Produktgruppen

Nutzer über die Busy Hour einen spezifischen Dienst in Anspruch nimmt; z.B. ergibt sich aus Tabelle 3-5, dass von 100 SOHO-Nutzern durchschnittlich vier Nutzer einen Konferenzdienst während der gesamten Busy Hour in Anspruch nehmen, bzw. von 50 Nutzern vier Nutzer über 30 Min. Die hier angegebenen Werte sind illustrativ.⁴³

Die Abbildung der Nachfrage nach IP-TV ist in dieser Darstellung nicht enthalten. Die Beschreibung findet sich in dem separaten Abschnitt zur Implementierung von IP-TV (siehe Abschnitt 3.4).

Tabelle 3-5: Beispiel für eine Verkehrszuweisung je Nutzer und Dienstkategorie in Erlang/Busy Hour⁴⁴

Name	Trad.	Premium	BS PK	SOHO	MLE	BS GK
Premium Business Dienste	0	0	0	0,12	0,066	0,12
Sprachdienste	0,02	0,11	0,11	0,13	0,74	0,19
Konferenzdienste	0	0	0	0,04	0,003	0,004
VoD Dienste	0,01	0,015	0,028	0,021	0,008	0,018
Business Data Dienste	0	0	0	0,5	0,044	0,45
P2P	0,09	0,14	0,16	0,31	0,06	0,13
Sonstige Best effort Dienste	0,16	0,16	0,225	0,485	0,1	0,226
Erlang total	0,29	0,43	0,53	1,60	1,01	1,14

Aus diesen Busy Hour Verkehrswerten können unter Rückgriff auf die Bandbreitenwerte für jede Dienstekategorie aus Tabelle 3-4 die Bandbreite je Nutzer nach down- und upstream und deren Summenwerte berechnet werden. Tabelle 3-6 zeigt beispielhaft für die Werte aus Tabelle 3-5 und Tabelle 3-4 die sich daraus ergebenden Bandbreitenwerte. Für die Konferenzdienste wird ein Konferenzserver als Sternpunkt im Kernnetz unterstellt, zu dem die Verkehre aller beteiligten Nutzer geroutet werden. Der Server bündelt auch die downstream Signale aller beteiligten Teilnehmer in einem gebündelten Signal gleicher Bandbreite. Für die übrigen Dienste mit mehr als einem Teilnehmer bestehen jeweils individuelle bilaterale Verkehrsbeziehungen untereinander. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Multicast-Verkehre nicht proportional von der Nutzerzahl abhängen und daher separat bestimmt werden. Sie sind deshalb nicht in der nachfolgenden Tabelle enthalten und müssen nachträglich aufgeschlagen werden (siehe Abschnitt 3.4.2).

⁴³ In der Darstellung wurde auf stilisierte Nutzertypen zurückgegriffen. Dabei steht BS PK/ GK für Bitstrom Privatkunden/ Geschäftskunden und MLE für Medium und Large Enterprises.

⁴⁴ Für Dialogdienste zwischen zwei Endnutzern (Sprach- und Konferenzdienste) enthält dieser Erlangwert sowohl den abgehenden als auch den ankommenden ON-Net als auch OFF-Net Verkehr.

Tabelle 3-6: Bandbreitenwerte [kbps] je Nutzer in der Busy Hour entsprechend den Beispielwerten aus Tabelle 3-4 und Tabelle 3-5

Name	Trad.	Premium	BS PK	SOHO	MLE	BS GK
Premium Business Dienste	0	0	0	65,15	34,85	62,12
Sprachdienste	2,37	10,83	10,83	14,77	1,18	1,52
Konferenzdienste	0	0	0	14,77	1,18	1,52
VoD Dienste	29,49	44,24	81,11	61,94	22,56	51,91
Business Data Dienste	0	0	0	224,96	20,05	204,47
Sonstige Best effort Dienste	24,31	24,31	33,98	73,24	14,54	34,13
P2P	31,00	49,11	55,10	105,39	20,89	46,15
Total downstream	87,17	128,49	181,01	557,82	184,13	418,45
Premim Business Dienste	0	0	0	65,15	34,85	62,12
Sprachdienste	2,37	10,83	10,83	12,38	70,05	18,15
Konferenzdienste	0	0	0	14,77	1,18	1,52
VoD Dienste	0,26	0,38	0,70	0,54	0,20	0,45
Business Data Dienste	0	0	0	91,42	8,15	83,10
Sonstige Best effort Dienste	7,41	7,41	10,35	22,31	4,43	10,40
P2P	31,00	49,11	55,10	105,39	20,89	46,15
Total upstream	41,02	67,73	76,99	311,96	139,75	221,89
Total down+upsteam	128,19	196,22	258,00	869,78	323,88⁴⁵	640,33

Die Verkehre gleicher Dienstekategorien über die verschiedenen Anschluss- bzw. Nutzertypen sind dann zu summieren, um den Gesamtverkehr je Dienstekategorie in einem Standort zu ermitteln. Um die verschiedenen Standorte nach dem nutzerinduzierten Verkehr zu gewichten, ist die Summe der Gesamtverkehre über alle Dienste zu bilden. Da die verschiedenen Dienste unterschiedliche Bandbreitenanforderungen haben, ist dies auf der Basis der Bandbreitenwerte vorzunehmen.

Im Folgenden wird dies am Beispiel eines durchschnittlichen MPoP betrachtet und es wird angenommen, dass sich pro MPoP 50.000 potenzielle Nutzer ergeben, eine Breitband-Marktdurchdringung von 50% besteht und der betrachtete Betreiber davon 40% der Nutzer (10.000) angeschlossen hat. Damit ergeben sich aus den Verkehrswerten von Tabelle 3-6 Nutzerwerte und Bandbreiten pro MPoP, die in Tabelle 3-7 gezeigt werden. Für den beschriebenen MPoP ergibt sich ein gesamter Bandbreitenbedarf (downstream) von 1,587 Gbps. Dem sind die Bandbreiten für die IPTV-Dienste zuzu-

⁴⁵ Der Bandbreitenwert für MLE Nutzer ist kleiner als der Wert für SOHO, weil im Beispiel die SOHO Nutzer mehr bandbreitenintensive SDSL Anschlüsse nutzen als die MLE.

schlagen⁴⁶, womit sich ein durchschnittlicher Gesamtwert von rund **1,855 Gbps** am MPoP ergibt.

Tabelle 3-7: Beispiel für die Bandbreiten (downstream) an einem MPoP nach Nutzertypen bzw. Dienstkategorien, Werte in [Mbps/Busy Hour]

Name	Trad.	Premium	BS PK	SOHO	MLE	BS GK	Summe	Rel. Anteil
Verteilung	10%	60%	20%	4,7%	5%	0,3%	100%	
Anzahl Anschlussleitungen (Nutzer)	1.000	6.000	2.000	470	500	30	10.000	
Anzahl SDTV Kanäle							116+30	
Anzahl HDTV Kanäle							16	
Premium Business	0	0	0	0	30,62	17,42	1,86	49,91
Sprachdienste	2,37	64,97	21,66	5,82	35,03	0,54	130,38	8,22%
Konferenzdienste	-	-	-	6,94	0,59	0,05	7,58	0,48%
VoD-Dienste	29,49	265,44	162,21	29,11	11,28	1,56	499,09	31,45%
Business-Data	-	-	-	105,73	10,03	6,13	121,89	7,68%
Sonstige Best effort	24,31	145,87	67,95	34,42	7,27	1,02	280,84	17,70%
P2P	31,00	294,67	110,21	49,53	10,45	1,38	497,24	31,33%
IP TV SD							210	
IP TV HD							58	
Summe ohne IPTV	87,17	770,94	362,03	262,18	92,07	12,55	1.586,93	100,00%
Relativer Anteil ohne IPTV [%]	5,49%	48,58%	22,81%	16,52%	5,80%	0,79%	100,00%	

⁴⁶ Es werden in diesem Beispiel 116 Kanäle mit SDTV à 3,6 Mbps und 16 Kanäle HDTV à 9 Mbps sowie 30 SDTV Zusatzkanäle angesetzt (Gesamtbandbreite aller Kanäle 670 Mbit/s). Zu der von der Nutzerzahl abhängigen Modellierung der Bandbreitenwerte für IPTV siehe Abschnitt 3.4.2, Tabelle 3-7. Hier unterstellt wurden 1000 IP-TV Nutzer, die 40% der Gesamtkapazität zur Busy hour sehen. damit ergibt sich beim dynamischen Multicast für IP TV eine Gesamtbandbreite von 268 Mbit/s ($670 \times 0,4 = 268$ Mbit/s).

3.4 Berücksichtigung von IP-TV im Breitbandkostenmodell

Im Kostenmodell NGN-Verbindungsnetz ist es möglich, die Kostenimplikationen von IP-TV anhand zweier unterschiedlicher Realisierungsformen abzubilden. Die erste Realisierungsform, als „Outband“ bezeichnet, dient der Abschätzung der Größenvorteile auf Layer 0 (Gräben, Rohre, Kabel), die sich kostensenkend auf die sonstigen Breitbanddienste auswirkt; d.h. es wird von vollständig separierten Einrichtungen für IP-TV ausgegangen, die mit dem NGN lediglich separate Glasfasern auf gleichen Kabelabschnitten in Anspruch nehmen und im Anschlussnetz ggf. über separate Farben mit zum Endkunden transportiert werden (RFoG, Radio Frequency over Glas). Die zweite Realisierungsform, als „Inband“ bezeichnet, beinhaltet eine Realisierung von IP-TV mit gemeinsamer Nutzung von Netzelementen auf den Schichten 0 bis 3, d.h. einer vollständigen Integration von den Gräben (Layer 0) bis hin zu den IP-Routern (Layer 3).

3.4.1 IP-TV – Outband

Bei der Outband-Implementierung von IP-TV im Modell wurde unterstellt, dass in jedem physikalischen Ring, in dem ein MPoP mit IP-TV versorgt wird, ein zusätzliches Faserpaar benötigt wird. Die Vorgehensweise – eine Kostenteilung lediglich auf Layer 0 des Netzes zu berücksichtigen – ist mit Blick auf die Bestimmung von Kosten für Sprachzusammenschaltung als konservativ einzustufen, da auf eine Integration von IP-TV auf Layer 1 bis Layer 3 verzichtet wird. Diese Einrichtungen müssten zwar im Fall einer Integration deutlich größer dimensioniert werden, allerdings würden auch hier economies of scale greifen und die Durchschnittskosten reduzieren.

Die Berechnung der Kosteneinsparungen infolge von IP-TV Outband erfolgt im Anschluss an die Netzplanung im Kostenmodul und setzt auf den abgeleiteten Mengengerüsten auf.

Um die Kosteneinsparungen auf Layer 0 infolge des zusätzlich beschalteten Faserpaares zu bestimmen, sind Informationen notwendig, welche MPoP mit IP-TV versorgt werden. Darüber hinaus sind auf Grundlage der vom Netzplanungsmodul abgeleiteten netzstrukturellen Daten folgende Informationen bereitzustellen:

- Identifikation der von IP-TV betroffenen Ringe sowie
- durchschnittliche Anzahl Faserpaare pro Ring je Ebene (d.h. 0-1/0-2 1-2, 3-4/3-5 4-5, 5-5).

Auf dieser Basis lässt sich der Anteil von IP-TV an den Gesamtkosten innerhalb eines Ringes (differenziert nach Netzsegmenten) abschätzen. Die Kosten für Layer 0 (Gräben, Rohre und Kabel) werden dann für die sonstigen Breitbanddienste um diesen Faktor je Ebene (d.h. individuell für die Ebenen 0-1, ..., 5-5) reduziert.

Das Netzplanungsmodul generiert Ergebnisse in der folgenden Struktur, die sich aus dem Verhältnis der benötigten Fasern für IP-TV zu den von den für Layer 3, Layer 2 und Layer 1 Dienste benötigten Fasern zuzüglich der IP-TV Fasern ergeben:

Tabelle 3-8: Durchschnittlicher Kostenanteil von IP-TV je betroffenen Ring

Ebene 0-1/0-2	Ebene 1-2	Ebene 3-4/3-5	Ebene 4-5	Ebene 5-5
xy %	xy %	xy %	xy %	xy %

Da nicht an allen Standorten ein IP-TV Angebot unterbreitet wird, darf der Reduktionsfaktor lediglich auf die betroffenen Ringe angewandt werden.

Auf Basis der Informationen über die mit IP-TV versorgten MPoP generiert das Netzplanungsmodul die Information über den Anteil der Ringe mit IP-TV, differenziert nach Netzsegmenten. Dieser Modelloutput hat die in Tabelle 3-9 dargestellte Struktur:

Tabelle 3-9: Anteil der Ringe mit IP-TV je Netzsegment

Ebene 0-1/0-2	Ebene 1-2	Ebene 3-4/3-5	Ebene 4-5	Ebene 5-5
xy %	xy %	xy %	xy %	xy %

Mit Hilfe dieser Informationen können die Reduktionsfaktoren für die Kosten der Kabel und Infrastruktur bei Berücksichtigung von IP-TV berechnet werden (multiplikative Verknüpfung der Kostenreduktion mit der Häufigkeit), auch wieder differenziert nach Netzsegmenten:

Tabelle 3-10: Reduktionsfaktoren für die Layer 0 Kosten bei Berücksichtigung von IP-TV

Ebene 0-1/0-2	Ebene 1-2	Ebene 3-4/3-5	Ebene 4-5	Ebene 5-5
xy %	xy %	xy %	xy %	xy %

Die so reduzierten Kosten werden dann für die Berechnung der Kosten der höheren Dienste (Layer 0 - Layer 3) herangezogen.

3.4.2 IP-TV – Inband

Im Unterschied zur Outband-Lösung werden bei der Inband-Lösung die TV-Signale gemeinsam mit anderen Breitbanddiensten im selben Übertragungskanal übertragen und die gemeinsam genutzten Netzelemente ausreichend dimensioniert. Entsprechend werden im Modell folgende Aspekte berücksichtigt:

- maximale Anzahl der gleichzeitig angebotenen Programmen (differenziert nach HDTV und STV).
- MPoP-spezifische IP-TV Nachfrage
- Multicast Charakter des Verkehrsstroms
- Zahl der übertragenen Programme als eine Funktion der Zahl der IP-TV Nachfrager (MPoP spezifisch)
- Beschreibung der Dienste spezifischen Verkehrseigenschaften (Bandbreite, Paketlänge, maximale Verzögerungszeit, etc.) unter Berücksichtigung sowohl von HDTV als auch STV

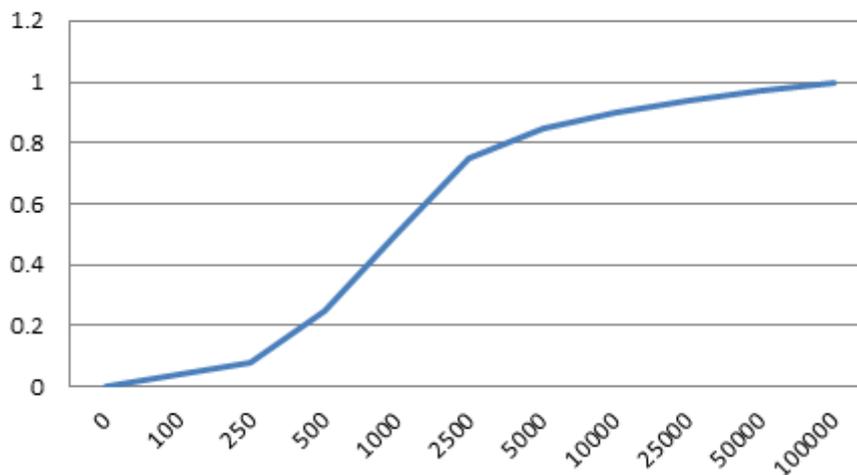
Obwohl IP-TV aufgrund seiner Multicast Eigenschaften einer anderen Bestimmung der Verkehrsnachfrage an Knoten und Kanten bedarf als die sonstigen Breitbanddienste, da der IP-TV Multicast Strom auf einer logischen Kante jeweils nur einmal übertragen werden muss, richtet sich die Modellimplementierung nach dem gleichen Schema wie die Nachfragemodellierung nach sonstigen Breitbanddiensten, und zwar aus der Perspektive des Nachfragers (Breitbandanschlusses). Entsprechend wird für die mit IP-TV versorgten Anschlusstypen⁴⁷ eine Busy Hour Erlang Nachfrage unterstellt, die – um den Eigenschaften des Multicast zu entsprechen – von einem Anschluss-spezifischen Verkehr in einen dimensionierungsrelevanten Netzverkehr umgewandelt werden muss. Dabei geht das Kostenmodell von einem dynamischen Multicast als effiziente Übertragungsform aus, bei der nur die Programme downstream übertragen werden, die dort auch nachgefragt werden.

Die Umwandlung von Anschluss-spezifischem Verkehr in einen dimensionierungsrelevanten Netzverkehr erfolgt im Modell unter Rückgriff auf eine Stufenfunktion, die – der Hierarchie des logischen Netzes Rechnung tragend - aus der Zahl der in einem Netzknoten aggregierten Teilnehmer die Zahl der während der Busy Hour gleichzeitig aktiven Anschlüsse und den daraus resultierenden Netzverkehr bestimmt. Die Stufenfunktion erlaubt dabei über Inputparameter zu steuern, wie sich mit zunehmenden aktiven IP-TV-Anschlüssen die Zahl der gleichzeitig zu übertragenden Programme verän-

⁴⁷ vgl. Fußnote 23, auch andere Nachfragedifferenzierungen, z.B. nach Produktgruppen möglich

dert. Dies erlaubt zu berücksichtigen, dass typischerweise viele Nutzer zu einer Zeit dieselben Programme anschauen, die damit nur einmal übertragen werden müssen.. Die nachfolgende Abbildung 3-5 soll den Zusammenhang zwischen Anschluss-spezifischem Verkehr und Netzverkehr, dargestellt durch die Traffic Transformation Function, illustrieren. An der Ordinate ist dabei der Koeffizient dargestellt, welcher auf die maximale Bandbreite für IP-TV im Falle der Übertragung aller Programme angewendet wird und diese entsprechend der Anzahl der downstream angeschlossenen Nutzer reduziert. Dabei muss berücksichtigt werden, dass ein Anschluss mehrere Programme gleichzeitig abrufen kann⁴⁸. Auf der Abszisse findet sich die Zahl der in einem Netzknoten aggregierten gleichzeitig aktiven Anschlüsse des IP-TV Dienstes (einschließlich der Anschlüsse der nachgeordneten Knoten).

Abbildung 3-5: Traffic Transformation Function

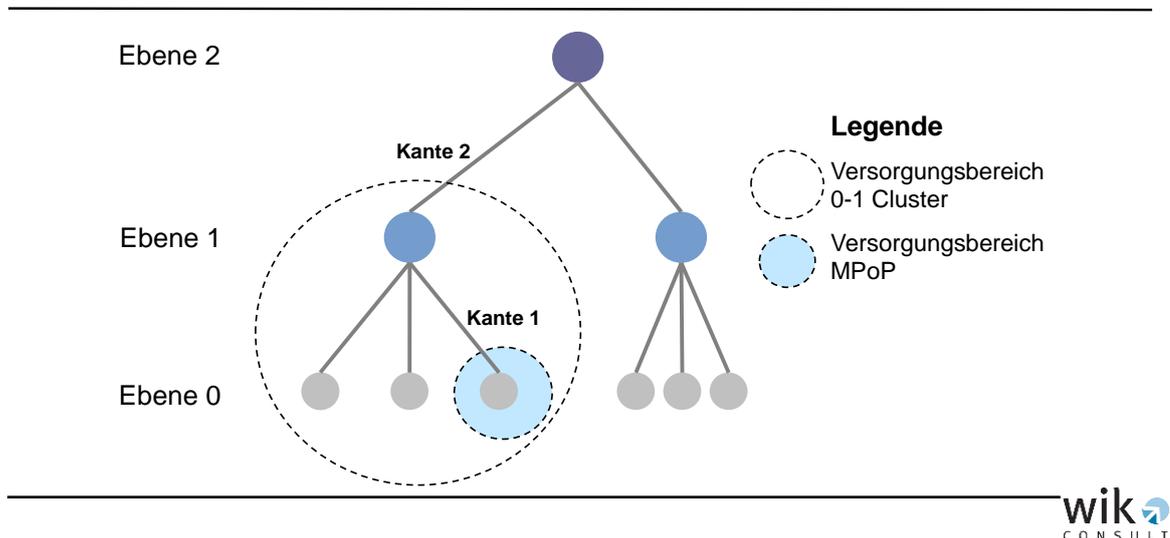


Bei der Verkehrsführung von IP-TV wird bei der Dimensionierung hierarchisch vorgegangen, wobei auf den Knoten in der Ebene 0 und auf den Kanten 0-1 bzw. 0-2 lediglich die IP-TV Nachfrage des jeweiligen Ebene 0 Standorts berücksichtigt wird. Entsprechend ist auf der Kante 1 in Abbildung 3-6 die Größe des Multicaststroms ausschließlich durch die IPTV Nachfrage der Anschlüsse in dem hellblau umrandeten MPoP zu führen. Für die Versorgung des gesamten 0-1 Clusters, welche netzseitig über die Kante 2 realisiert wird, ist die IPTV Nachfrage aller Anschlüsse dieses Clusters auf Ebene 0 als auch die standortinterne Nachfrage am Ebene 1 Standort zu Grunde zu legen. Diese Vorgehensweise setzt sich hierarchisch nach oben fort. Die in Abbildung

⁴⁸ Dies gilt z.B. für Haushalte mit mehreren Personen und TV-Geräten, aber auch für gleichzeitiges Sehen und Aufzeichnen verschiedener Programme. Auch wird die Funktion davon abhängen, welcher Art das angebotene Programmportfolio ist. So werden ausgefallene Spartenprogramme vermutlich eher selten zur Busy Hour abgerufen.

3-5 dargestellte Stufenfunktion erlaubt dabei eine Parameter gestützte Steuerung, in welchem Umfang die Teilnehmer gleichzeitig dieselben Programme anschauen.

Abbildung 3-6: Illustration der Multicastströme im logischen Netz



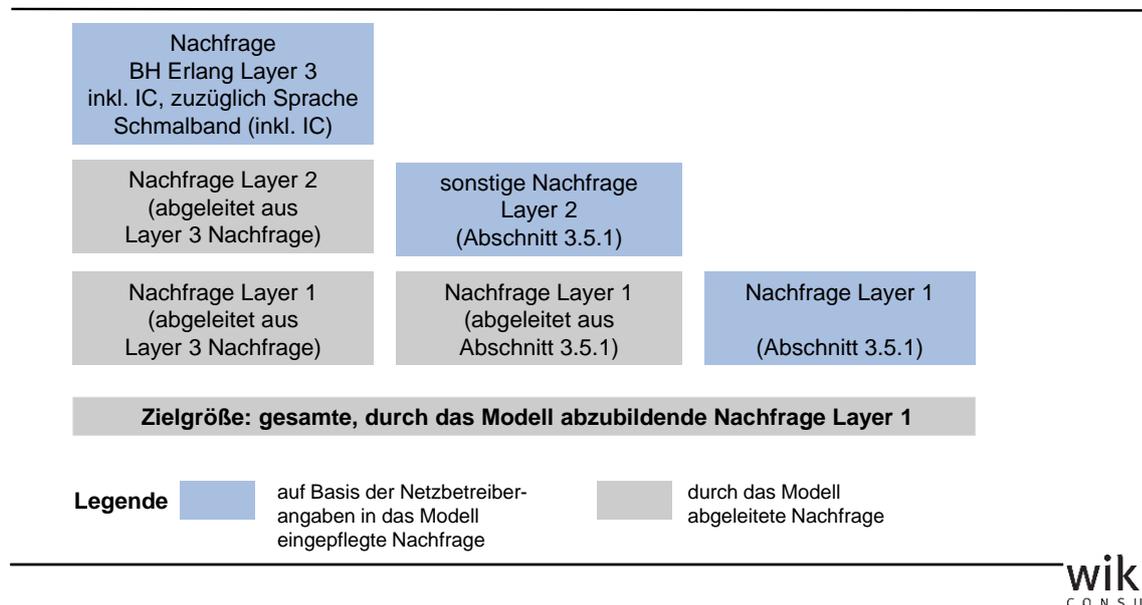
Die IP-TV Server sind im Kernnetz installiert. Ihre Anzahl ist parametergesteuert vorzugeben. Dabei wird der Multicast Baum vom Modell quasi von unten nach oben von einem IP-PoP Standort zum nächstgelegenen IP-TV Server geführt und die Netzelemente auf dem Weg dorthin entsprechend dimensioniert.

3.5 Spezifische Layer 2, Layer 1 und Layer 0 Nachfrage

Wie bereits in Abschnitt 2.4 ausgeführt, sind sämtliche Nachfragen im Netz für die Dimensionierung zu berücksichtigen. In den Abschnitten 3.1 bis 3.3 wird die Bandbreitenanfrage beschrieben, die sich aus den IP-basierten Anschlüssen ergibt und entsprechend in eine abgeleitete Nachfrage nach Layer 2, Layer 1 und Layer 0 Kapazitäten resultiert. Diese Nachfrage ist in Abbildung 3-7 in der linken Säule dargestellt. Die Parametrisierung erfolgt bei diesen Diensten anhand einer Busy Hour Nachfrage.

Zusätzlich sind spezifische Layer 2, Layer 1 und Layer 0 Kapazitätsnachfragen zu berücksichtigen, die sich aus dem Angebot entsprechender Retail- oder Wholesale Dienste ergeben. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass nach Maßgabe des Total Element Ansatzes die Größen- und Verbundvorteile im Netz auch unter Berücksichtigung dieser Dienste adäquat abgeschätzt werden. Die in Abbildung 3-7 in der mittleren und rechten Säule dargestellten Nachfragen (Layer 2 und Layer 1) sind nachfolgend in Abschnitt 3.5.1 beschrieben, die Nachfrage nach den hier nicht dargestellten Layer 0 Diensten in Abschnitt 3.5.2.

Abbildung 3-7: Kapazitätsnachfrage auf Layer 1 und abgeleitete Kapazitätsnachfrage aus Layer 2 und Layer 3



3.5.1 Kapazitätsnachfrage auf Layer 2 und Layer 1

Für die Nachfragen auf Layer 2 und Layer 1 (Ethernet Festverbindungen und klassische Mietleitungen), die eine Aggregation und ein Multiplexen erlauben, erfolgt die Modellierung auf Basis der standortbezogenen Nachfrage an den MPoPs.

In Analogie zu den Teilnehmerzahlen ist pro MPoP die Nachfrage nach Übertragungskapazität, differenziert nach Schicht 2 und 1 anzugeben. Zu diesem Zweck stehen jeweils zwei Parameter zur Verfügung:

- die Festlegung der Einheit der Übertragungskapazität, diese gilt für alle Nachfragen
- die Festlegung der Anzahl der Nachfrager der zuvor genannten Übertragungskapazität.

Bezüglich der spezifischen Layer 1 Nachfrage (die sich nicht aus der in Abschnitt 3.3 dargestellten (abgeleiteten) Nachfrage ergibt) abstrahiert der Modellierungsansatz von der Vielzahl der existierenden Angebote an Übertragungskapazitäten (E1, E3, STM-n, 1Gbit/s etc.) und geht von der Annahme aus, dass die Realisierung und Steuerung dieser Transportdienste auf Basis von sogenannten Channel Banks realisiert wird. Dies impliziert, dass die hier betrachteten Nachfragen auf Layer 1 vorgeschaltete inkrementelle Einrichtungen benutzen, bevor diese Kapazitäten über eine weitere Schnittstelle mit den Layer 1 ADM oder CCX Einrichtungen des IP- und Ethernet basierten Breit-

bandnetzes integriert werden.⁴⁹ – Diese Vorgehensweise erlaubt es, die Nachfrage je Standort zu aggregieren. Über die Steuerung des Inputparameters „Anzahl der Nachfrager“ ist es dann möglich, die an dem jeweiligen MPoP vorzusehende Übertragungskapazität zu skalieren. Die bei der Layer 1 Nachfrage vorzugebende Bandbreite ist daher als ein Bandbreitenäquivalent zu interpretieren, welches unter Rückgriff auf die MPoP spezifischen Gewichte multipliziert und unter Anwendung der Routingfaktoren geführt wird.

Demgegenüber wird die Nachfrage nach Layer 2 Kapazität in den dienstespezifischen Inputparametern auch hinsichtlich der durchschnittlichen Paketlänge spezifiziert, da diese Nachfrage über die Einrichtungen der logischen Netzschicht realisiert und somit in Paketen geswitched bzw. geroutet wird.

3.5.2 Nachfrage nach unbeschalteter Glasfaser (Layer 0)

Da die Nachfrage nach unbeschalteter Glasfaser qualitativ anderer Natur ist und keine Aggregation auf Basis von Multiplexen zulässt, müssen diese Layer 0 Kapazitäten im Modell anders abgebildet werden. Dabei wird im Kostenmodul auf einen allgemeinen Beilauffaktor zurückgegriffen, wobei dieser für jedes Netzsegment individuell einstellbar ist. Auf diese Weise kann die Nachfrage nach unbeschalteter Glasfaser zwar nicht bei der Netzdimensionierung, jedoch bei der Kostenbestimmung berücksichtigt werden.

Zudem kann die gemeinsame Nutzung von Gräben mit anderen Infrastrukturbetreibern (Gas, Wasser, Strom, Verkehrsbetriebe, Verkehrssteuerungssysteme, öffentliche Beleuchtung, ...) durch einen Mitbenutzungsfaktor für die Gräben kostenmindernd berücksichtigt werden.

3.5.3 Berücksichtigung der Kapazitätsnachfrage aus dem Mobilfunknetz

State of the Art Mobilfunknetze und ihr hybrider Aufbau aus 2G und 3G Komponenten sowie aus Komponenten für LTE erlauben derzeit noch keine vollständige Integration von Mobilfunknetzen in Next Generation Networks (NGNs). Gleichermaßen sind die Kontrollkomponenten der All-IP Festnetze noch nicht in der Lage, einen mobilen Funk-Access neben dem festen Zugang zu steuern. Die hierfür benötigten IMS Systeme sind noch nicht marktverfügbar.

⁴⁹ Eine solche Realisierungsform ist immer dann sinnvoll, wenn die Anzahl der nachgefragten Kapazitäten hinreichend groß ist und daher ein separates Management dieser Einrichtungen auch für die Steuerung und/ oder Entstörung nahelegen.

Dennoch, die Mobilfunknetze können Funktionen eines Breitbandnetzes (ALL-IP, auch NGN, aber noch ohne IMS) nutzen. So kann der IP-Daten- und Internetverkehr an den Core-Standorten des Mobilfunknetzes in das Breitbandnetz übergeben werden und von dort zum Ziel weitergeleitet werden. Im Sinne des Festnetzes ist dies entweder terminierender IP-Verkehr im eigenen Netz (z.B. bei Endkunden im Festnetz, auf Servern, ...) oder auf Netzübergabepunkten (z.B. Peering) oder es sind Layer 3 Festverbindungen/ Transitverkehr für den Fall, dass der Verkehr das Netz an anderen Stellen wieder verlässt (z.B. IP-Verkehr zwischen den Core-Standorten des Mobilfunknetzes). Insofern kann bei der Nachfrageparametrierung das aus Zusammenschaltungsstandorten mit dem Mobilfunknetz entstehende Verkehrsvolumen berücksichtigt werden.⁵⁰ Generell können die Core-Layer Standorte des Mobilfunknetzes an den nächstgelegenen MPoP des Festnetzes angeschlossen werden und die Verkehre des Mobilfunknetzes über Layer 1 oder Layer 2/3 Verbindungen des Festnetzes transportiert werden.

Für den Fall, dass die Zahl der Core-Layer Standorte des Festnetzes der des Mobilfunknetzes gleicht oder diese übersteigt, ist die Vermutung naheliegend, dass die Core-Layer Standorte des Mobilfunknetzes eine Teilmenge der Core-Layer Standorte des Festnetzes sein werden, weil in beiden Netzen die Zugehörigkeit zum Core Layer über die Verkehrsstärke der Knoten bestimmt wird. In diesem Fall können die beiden Standorttypen sinnvoller- und effizienter Weise kolloziert angenommen werden, so dass die Zusammenschaltung der Netze zur Übergabe des Verkehrs über einfache Inhaus Verbindungen zu lösen wäre.

Das Breitbandkostenmodell erlaubt generell, auch Mietleitungsverkehre auf Layer 1 (SDH/OTN) oder auf Layer 2 (Ethernet Leased Lines, VPN, Pseudowire) an allen MPoP-Standorten zu übernehmen, so wie es im voranstehenden Abschnitt 3.5.1 beschrieben wurde. Zudem kann der Internetverkehr, der im Mobilfunknetz entsteht, an jedem Knotenstandort des Breitbandfestnetzes an diesen übergeben werden. Es lässt sich also aller Verkehr zwischen den festen Standorten des Mobilfunknetzes und dem Festnetz abbilden.

⁵⁰ Die flexible Definition von Anschlusstypen in der Matrix der MPoP Liste erlaubt beispielsweise die Zuweisung einer Zelle für diesen IC-Mobilfunkverkehr.

3.6 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sämtliche Dienste zu berücksichtigen sind, d.h., es ist die Nachfrage auf allen Schichten des OSI-Modells von Layer 0 bis Layer 3 in die Nachfragemodellierung mit einzubeziehen.

Das Kostenmodell Breitbandnetz geht von folgenden Grundlagen aus:

- Das Modell ist nachfragegetrieben, d.h. die von dem Nutzer ausgehenden bzw. bei ihm ankommenden Verkehre sind aus entsprechenden Eingangsdaten zu bestimmen und auf die Standorte der untersten Netzebene zu projizieren.
- Wichtige Netzparameter zur Dimensionierung und zu Fragen der Zuverlässigkeit sind durch Eingangsparameter vorzugeben. Sie können durch Sensitivitätsanalysen optimiert werden.
- Die Vielzahl verschiedener Dienste werden auf eine begrenzte Anzahl von Dienstekategorien zusammengefasst, die ihrerseits durch den Modellanwender spezifiziert werden können.
- Die Verkehre, die aus den Dienstekategorien resultieren, können in eine begrenzte, aber vorgebbare Menge von Verkehrsklassen (max. 8 Verkehrsklassen) abgebildet werden (sofern eine Qualitätsdifferenzierung abgebildet werden soll).
- Für jede Verkehrsklasse können QoS-Parameter festgelegt werden, die in die Netzdimensionierung Eingang finden.
- Es wird eine generische Netzarchitektur unterstellt, deren Abbildung auf konkret zum Einsatz kommende Systeme im Rahmen von Kostenparametern vorgenommen wird.
- Nicht jede Schicht (Layer) der Schichten 0-3 muss zwangsläufig gefüllt sein, soweit deren Funktion durch andere, meist übergeordnete Schichten mit ausreichender Qualität erfüllt werden kann. Schicht 0 und Schicht 3 sind in jedem Fall erforderlich.

4 Netzgestaltung und Dimensionierung

Die im letzten Kapitel dargestellte Bestimmung der Verkehrsnachfrage bildet die Grundlage für die Netzgestaltung und Dimensionierung. Bei der Netzgestaltung ist zwischen der logischen- und der physikalischen Netzschicht zu unterscheiden.⁵¹

Die logische Netzschicht eines integrierten Breitbandnetzes beschreibt die Hierarchie des Netzes und die Verkehrsflüsse in und zwischen den OSI Schicht 2 Konzentrations- und Switching-Einrichtungen sowie in und zwischen den Schicht 3 Router-Einrichtungen. Zu diesem Zweck ist die Menge der Ausgangsstandorte (MPoP-Knoten) entsprechend aufzuteilen und eine zugehörige Netzhierarchie zu berechnen. Diese unterteilt sich grob in Konzentrationsnetze, welche durch Einrichtungen der OSI-Schicht 2 realisiert werden, und ein darüberliegendes Kernnetz, das Einrichtungen zur OSI Schicht 3 implementiert. Jedes dieser beiden Netzsegmente kann dann ggf. weiter unterteilt werden, wie dies bereits in Abschnitt 2.3 anhand von Abbildung 2-2 illustriert wurde. Auf der Grundlage dieser Netzhierarchie ist die Verkehrsnachfrage, beschrieben durch eine Verkehrsmatrix, von ihrem Ursprung zu ihren Zielen aufzuteilen und über die Netzebenen und Netzelemente zu verteilen.

Die Verkehrsflüsse aus der Verkehrsmatrix sind auf der Grundlage der logischen Netzschicht über die Struktur der Netzhierarchie zu führen. Dies ist für die Verkehre jeder Dienstkategorie individuell vorzunehmen. Dabei sind neben Kostengesichtspunkten auch Aspekte der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Netzes zu betrachten. Nach Abschluss sind die Verkehrsflüsse und ihre zugehörigen Bandbreitenanforderungen für jeden Netzknoten und jede Netzkante der logischen Netzschicht berechnet. Diese Größen bilden dann die Grundlage zur Netzgestaltung und Dimensionierung der physikalischen Netzschicht. Ggf. sind sie zu ergänzen um spezifische Layer 1 und Layer 0 Nachfragen (Mietleitungen und dark fibre), die bei der Dimensionierung des physikalischen Netzes zu berücksichtigen sind.

In diesem Kapitel werden die Netzgestaltung und Dimensionierung der logischen Netzschicht beschrieben und entsprechende Modelle für das Kostenmodell Breitbandnetz entworfen. Dazu wird dieses Kapitel in drei Abschnitte gegliedert. Der erste Abschnitt behandelt Modelle zum Entwurf der Netzhierarchie sowohl für das Konzentrations- als auch das Kernnetz, der zweite Abschnitt betrachtet Modelle zur Festlegung der logischen Netzstruktur und Verkehrsführung und der dritte Abschnitt gibt Modelle zur Netzdimensionierung der logischen Netzschicht an.

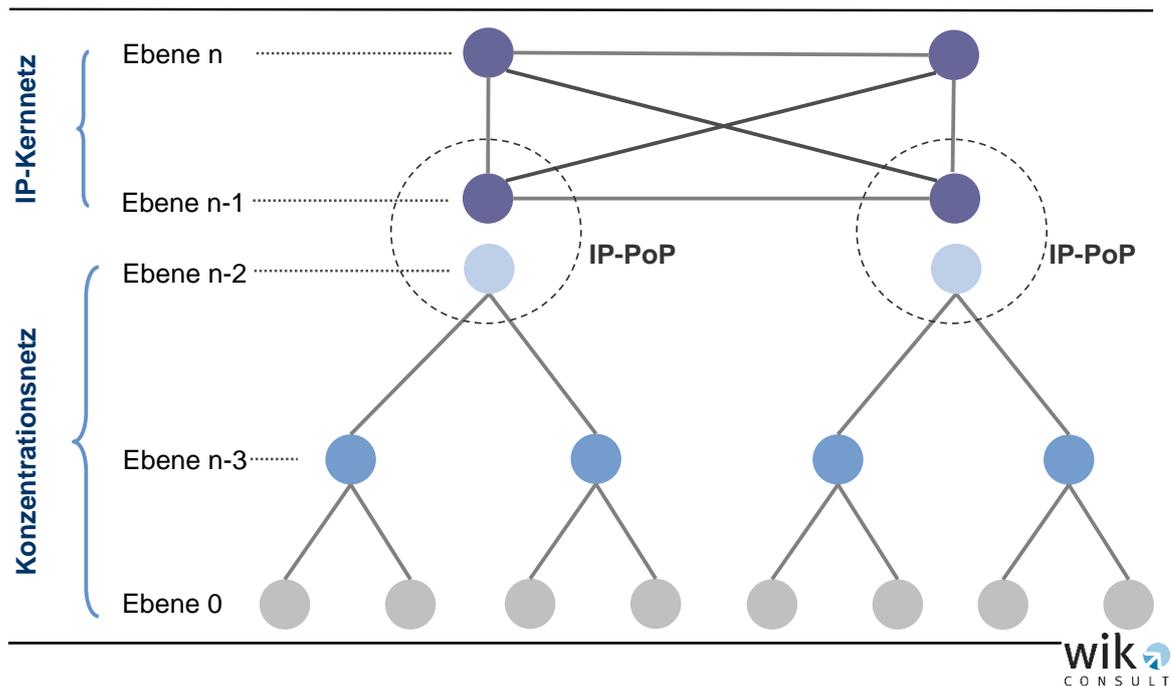
⁵¹ Auf die Kontrollschicht wird in Kapitel 6 eingegangen.

4.1 Entwurf der Netzhierarchie

Der Modellierungsrahmen für das Kostenmodell Breitbandnetz sieht die Vorgabe einer maximalen Anzahl von Netzebenen vor, innerhalb derer verschiedene Netzstrukturen mit unterschiedlicher Anzahl von Netzebenen spezifiziert und entsprechende Kosten berechnet werden können. Diese obere Grenze an Netzebenen wurde bei der Modellimplementierung so gewählt, dass alle zukünftig für realistisch erachteten Szenarien innerhalb dieses Rahmens abgebildet werden können, um auf Basis komparativ-statischer Analysen unter anderem kostenminimale, effiziente Netzstrukturen ermitteln zu können.

In der nachfolgenden Abbildung – die bereits in Abschnitt 2.3 eingeführt wurde – ist eine Netzhierarchie mit n Ebenen schematisch dargestellt. Bezug nehmend auf die Abbildung 4-1 ist $(n+1)$ die maximale **Anzahl** an Netzebenen, wobei die unterste Netzebene als Ebene 0 bezeichnet wird.

Abbildung 4-1: Modellierungsrahmen Netzstruktur



Ferner ist das Modell so ausgestaltet, dass bei einer Modellanwendung Vorgaben zu den Netzknoten gemacht werden müssen. D.h., die Gesamtheit der Netzknoten stellt einen prinzipiell veränderbaren, aber für die Modellanwendung dann festen Modellinput dar. Die Gesamtheit der Netzknoten ist die Gesamtheit der MPoP, bzw. die Gesamtheit der Ebene 0 Knoten. Diese Standorte werden als Geo-Koordinaten über eine zu Grunde liegende Datenbank in das Modell eingelesen.

Mit dieser Vorgehensweise wird zum einen die Umsetzung eines scorched node Ansatzes gewährleistet, zum anderen lässt sie die Möglichkeit offen, auf alternativen Wegen bestimmte Knotenstandorte in das Modell einpflegen bzw. bestehende verändern zu können. Grundsätzlich hat jeder Netzknoten Funktionen der untersten Netzebene⁵² (Modellimplementierung), unabhängig davon, wie viele Netzebenen für eine Modellanwendung parametrisiert werden. Die Anzahl der Netzebenen und die Anzahl der Netzknoten je Netzebene in den höheren Netzebenen ist ebenfalls Modellinput. Welche Netzknoten neben ihrer Funktion auf der untersten Netzebene auch eine Funktion höherer Netzebenen zugewiesen bekommen, wird modellendogen schrittweise bestimmt (vgl. Abschnitt 2.3).

Wesentliches Entscheidungskriterium für die Zuweisung von Funktionen höherer Netzebenen ist die Verkehrsstärke eines Knotens, d.h. die Menge Verkehr, die in diesem Knoten aggregiert wird. Die nächst höhere Ebene wird aus den verkehrsstärksten Knoten der darunterliegenden Ebene bestimmt. Anschließend wird ein Cluster aus einem Knoten der oberen Netzebene mit Knoten der darunterliegenden Ebene gebildet, indem die Knoten der unteren Ebene den nächstgelegenen Knoten der oberen Ebene (Straßenentfernung) zugeordnet werden⁵³. Diese Vorgehensweise wiederholt sich im Grundsatz Ebene für Ebene. Eine Ausnahme bilden die Ebenen, bei denen Konzentrations- und Kernnetz zusammenstoßen. Hier sind die obere Ebene des Konzentrationsnetzes mit der unteren Ebene des Kernnetzes standortidentisch (vgl. Abbildung 2-2 in Abschnitt 2.3). Damit eine Verteilung der Funktionen höherer Netzebenen auf die verkehrsstärksten Netzknoten möglich und gleichzeitig eine Akkumulation der Knoten der höheren Ebenen in einigen dicht besiedelten Gebieten vermieden werden kann wird je Ebene über einen Mindestdistanzparameter vorgegeben, wie groß der Abstand von Knoten gleicher Ebene mindestens sein muss. Für die Bestimmung der effizienten Netzstruktur kann dieser Satz an Parametern optimiert werden.

Alternativ ist im Modell die Option vorgesehen, für die Funktionen höherer Netzebenen die Standorte über eine externe Datenbank vorzugeben und auf die modellendogene Bestimmung der Netzhierarchie zu verzichten. Eine solche Vorgehensweise erlaubt die Abbildung existierender Netzstrukturen und eine entsprechende Kostenbestimmung, modelliert aber etwa bestehende Ineffizienzen mit.⁵⁴

Die Knotenstärke wird im Modell über die zugehörige Verkehrsnachfrage aller an den Standort angeschlossenen Nutzer bestimmt (siehe Abschnitt 3.3.3). Diese ergibt sich

⁵² Dabei handelt es sich um das teilnehmeranschließende Equipment im MPoP.

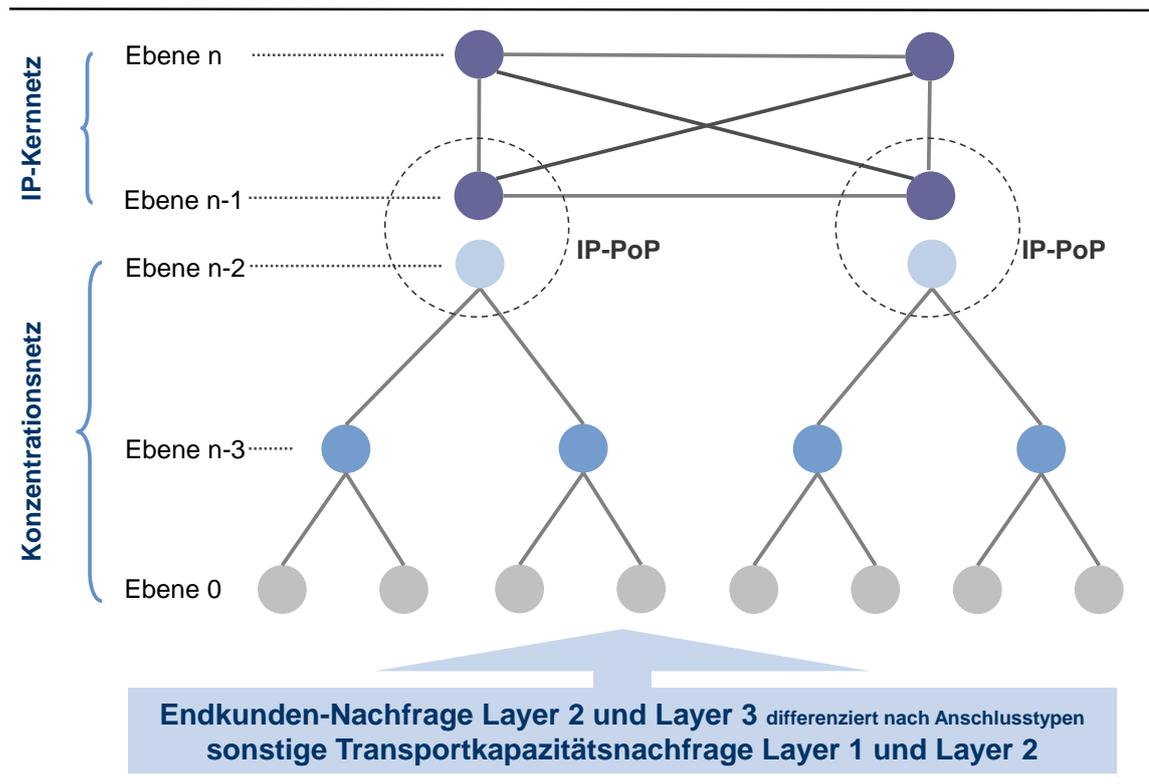
⁵³ Diese Auswahlkriterien nehmen bereits eine erste Optimierung des physikalischen Netzes vorweg, als dass darauf abgestellt wird, dass Verkehre aus verkehrsstarken Knoten nicht über weite Entfernungen durch ein Konzentrationsnetz zum Kernnetz geführt werden müssen.

⁵⁴ Zudem besteht die Option, bei der Bestimmung der Pure LRIC die endogen bestimmte Netzhierarchie des verkehrsstärkeren Netzes mit Terminierungsverkehr für die Bestimmung der Kosten ohne Terminierungsverkehr einzufrieren bzw. beizubehalten. Auf diese Weise können Veränderungen in der Netzhierarchie aus der Bestimmung der Pure LRIC ausgeklammert werden.

über das Datenvolumen, welches von den Endkunden generiert wird, deren Verkehr über diesen Netzknoten aggregiert und zum Kernnetz weitergeleitet wird. Darüber hinaus wird auch die an den jeweiligen MPoP vorherrschende Nachfrage nach Layer 1 und Layer 2 basierten Mietleitungen für das Gewicht der Knotenstärke berücksichtigt.

Die Verkehrsnachfrage wird – unter Rückgriff auf dienstspezifische Verkehrsverteilungsfunktionen sowie auf im Modell implementierte Regeln der Verkehrsführung – herangezogen, um sowohl die Netzhierarchie zu bestimmen als auch die Netzdimensionierung nach Maßgabe des Total-Element-Ansatzes⁵⁵ vorzunehmen. Zu den Dienste spezifischen Routingvorgaben sind entsprechende Inputparameter vorgehalten, siehe hierzu die Darstellung in Abschnitt 3.3, 3.4 und 3.5.1. Abbildung 4-2 stellt dies schematisch für ein Netz mit drei Ebenen im Konzentrationsnetz und zwei Ebenen im NGN-Kernnetz dar, wobei die oberste Ebene des Konzentrationsnetzes mit den Standorten der untersten Ebene des NGN Kernnetz übereinstimmt.

Abbildung 4-2: Nachfragegetriebene Netzmodellierung



⁵⁵ Der Total-Element-Ansatz stellt darauf ab, dass bei der Netzdimensionierung sämtliche Dienste, die die Netzelemente des betrachteten Inkrementes in Anspruch nehmen, bei der Dimensionierung Berücksichtigung finden.

Diese skizzierte Vorgehensweise zur Modellierung der Netzhierarchie und der Parameter gesteuerten Veränderbarkeit der Anzahl der Netzebenen sowie der Knotenanzahl je Netzebene hat sich bereits in der Vergangenheit im Kostenmodell für ein nationales PSTN/ ISDN Verbindungsnetz bewährt.

Aufgrund deutlich gefallener Kosten für den Transport höherer Bandbreiten über größere Entfernungen einerseits und deutlich gesteigener Vermittlungskapazitäten moderner NGN Netzknoten andererseits steht zu erwarten, dass sich die Zahl der Knoten mit Kernnetzfunktionen und ggf. auch die Zahl der Ebenen gegenüber der Situation mit einem herkömmlichen PSTN/ ISDN Verbindungsnetz deutlich verkleinert⁵⁶.

Dies ist aus Sicht der verschiedenen Dienste unterschiedlich zu bewerten.

- So sind klassische Sprachdienste, vor allem VoIP, die zwischen den Endgeräten der Nutzer zu führen sind, bei einem kleinen Kernnetz über lange Wege zu führen (hoch bis ins vermittelnde Kernnetz und wieder zurück). D. h., klassische Sprachdienste werden tendenziell besser durch eine größere Anzahl von Kernnetz-Standorten – und damit stärker regional – abgewickelt.
- Auf der anderen Seite sind die Verkehre aus den Transaktions-Retrieval- und Distributions-Diensten vor allem zwischen dem Endgerät eines Nutzers und einem entsprechenden Diensteserver zu führen. Die Diensteserver sind i.d.R. an den Netzknoten der höchsten Ebene angebunden, was eine Konzentration der Verkehre an einer begrenzten Anzahl von Standorten begünstigt. (Eine Ausnahme sind P2P-Dienste, deren Verkehr sich in Form von Punkt-Multipunkt über die Endeinrichtungen der Nutzer verteilt, sowohl innerhalb eines NGN, aber auch NGN-übergreifend. Für diese gilt dasselbe wie für das Sprachnetz.) Verkehre aus VPN resultieren in der Regel vornehmlich aus den Standorten des Kernnetzes.⁵⁷

Um das Netzmodell ausreichend flexibel zu gestalten, wird im Breitband Kostenmodell eine Trennung in zwei separate Segmente vorgenommen:

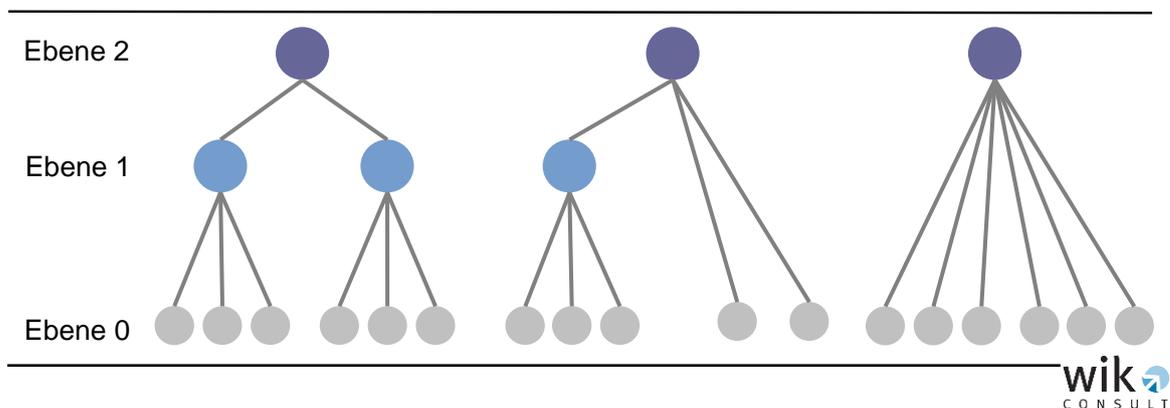
- Konzentrationsnetz und
- IP-Kernnetz.

⁵⁶ Dies belegt auch eine Studie für Deutschland [Hackbarth-06]

⁵⁷ Dem liegt die Annahme zu Grunde, dass große Geschäftskunden (die die hauptsächlichen Nachfrager von VPN sind) ihre Standorte in den urbanen Regionen haben, die i.d.R. auch Standorte des Kernnetzes bilden.

Für jedes der Segmente ist eine **maximale Anzahl von drei Hierarchieebenen** implementiert.⁵⁸ Dabei ist hervorzuheben, dass die Anzahl der als Modellinput vorzugebenden Netzebenen landesweit einheitlich gilt. Modellendogen können daraus dennoch Strukturen entstehen, die mit IP-PoP Standorten verbunden sind, denen in einem 3-Ebenen Konzentrationsnetz lediglich Standorte der Ebene 0 zugeordnet sind⁵⁹ (und somit letztlich die mittlere Ebene für diesen IP-PoP nicht besetzt ist). Auch sind gemischte Strukturen innerhalb eines Clusters möglich. Die resultierenden Strukturen sind letztlich Ergebnis der Strukturparameter für die Netzhierarchie, die auf die MPoP-Liste mit den zugehörigen Teilnehmern wirken. Das Modell generiert daher regional unterschiedliche und dem Verkehrsbedarf angepasste Strukturen. Die möglichen Formen sind in der nachfolgenden Abbildung 4-3 dargestellt.

Abbildung 4-3: Modellendogene Netzstrukturen im Konzentrationsnetz: Mischformen bei der Clusterbildung

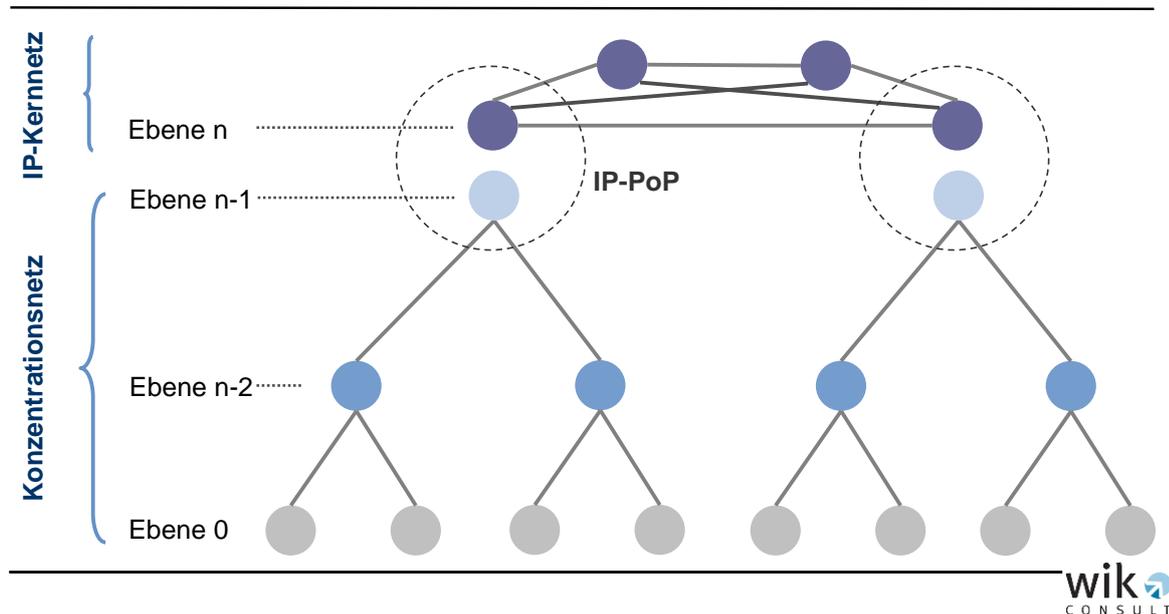


Eine besondere Form des Kernnetzes bildet das sogenannte flache Netz (flat core), bei dem alle Funktionen des Kernnetzes an allen Standorten jeweils in den IP-PoP Standorten zusammenfallen (vgl. Abbildung 4-4). Dort finden sich die Ebene 3 und Ebene 5 Funktionen des Kernnetzes (LER bzw. LSR) sowie die Übergabe zum Konzentrationsnetz (Ebene 2). Die zwischenvermittelnde Ebene 4 Funktion entfällt (oder fällt mit der Ebene 5 Funktion im selben System zusammen).

⁵⁸ Man beachte, dass die Anzahl der Hierarchieebenen aus Sicht der Einrichtungen vorgenommen wird. Aus Sicht der Standorte ergibt sich eine Ebene weniger, da die Einrichtungen in der obersten Ebene des Konzentrationsnetzes mit denen der untersten Ebene des Kernnetzes kolloziert sind.

⁵⁹ Unabhängig davon gilt, dass jedem Ebene 2/3 Standort auch ein standortinterner MPoP (Einrichtungen der Netzebene 0) zugeordnet ist.

Abbildung 4-4: Flaches Kernnetz



4.2 Logische Netzstruktur und Verkehrsführung

Nach Festlegung der Anzahl der Hierarchieebenen sowohl für das Konzentrationsnetz als auch für das Kernnetz sowie die Auswahl der Standorte in jeder Ebene und die Zuweisung von unteren Standorten zu den jeweils nächst höheren, ist die Netzhierarchie vollständig bestimmt. Als nächster Schritt sind die „logischen“ Netzstrukturen festzulegen, die jeweils aus Netzknoten und Netzkanten bestehen. Generell beschreibt eine Netzkante eine logische Direktverbindung zwischen den Einrichtungen zweier Netzknoten in der gleichen Ebene oder aber von einem Netzknoten der unteren zu einem Netzknoten der oberen Ebene. Aus Sicht der Einrichtungen stellt diese Netzkante eine Verbindung zwischen zwei Ports her.

Dieser Abschnitt unterteilt sich in drei Unterabschnitte. Im Ersten wird die Hierarchie für die Konzentrationsnetze betrachtet und im Zweiten die Hierarchie für das Kernnetz. Da für jedes Netzsegment eine maximale Anzahl von 3 Netzebenen implementiert ist, wird anhand der umfangreichsten Zahl von Netzebenen der Modellierungsansatz beschrieben und auf die Relevanz und Besonderheiten von Netzen mit weniger Netzebenen eingegangen. Der dritte Unterabschnitt betrachtet Szenarien für die Verkehrsführung von und zu Zusammenschaltungspunkten.

4.2.1 Konzentrationsnetz

Im Kostenmodell für das Konzentrationsnetz sind bis zu drei Hierarchieebenen vorgesehen. Der Randfall eines Ein-Ebenen-Netzes für das Konzentrationsnetz ist auszuschließen, da dieser mit keiner Konzentration einherginge, sondern lediglich den Verkehr im IP-PoP (der gleich dem MPoP wäre) von Ethernet auf IP übergeben würde.⁶⁰ Entsprechend werden nachfolgend nur die logischen Strukturen für ein 2- und ein 3-Ebenen Konzentrationsnetz dargestellt.

Unabhängig davon, ob ein 2- oder 3-Ebenen-Netz modelliert werden soll,

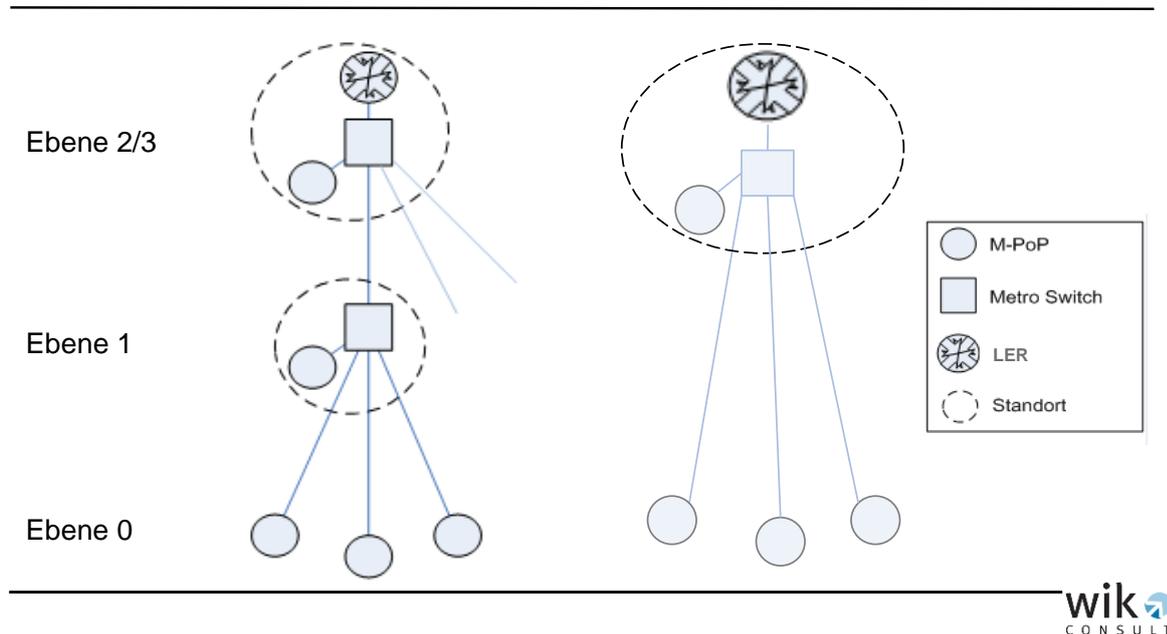
- wurden für das Konzentrationsnetz aus heutiger Sicht logische Sternstrukturen implementiert. Diese Sternstrukturen ergeben sich dabei bereits implizit aus der Berechnung der Netzhierarchie, welche – wie oben beschrieben – unter Berücksichtigung von Verkehrsstärke und Abstandskriterien erfolgt.
- Die aggregierten Verkehre am MPoP und deren zugehöriger Bandbreitenbedarf⁶¹ bilden den Ausgangspunkt für den Entwurf der Hierarchie des logischen Netzes.
- An den MPoP-Standorten befindet sich das teilnehmeranschließende Equipment. Wie bereits in Abschnitt 2.5 dargestellt, werden die Teilnehmer in Abhängigkeit der zu Grunde liegenden FTTx-Strategie direkt oder bereits vorkonzentriert am MPoP angeschlossen. Da die Modellierung des Konzentrationsnetzes neutral gegenüber der NGA-Architektur sein soll, wird nachfolgend nur die netzseitige Schnittstelle der Einrichtung auf der untersten Netzebene (MPoP) betrachtet, die kernnetzseitig von Bedeutung ist. – Es sei noch einmal betont, dass letztlich jeder Standort – egal welcher Netzebene er zugeordnet ist – auch einen MPoP repräsentiert und dort Teilnehmer an das (Konzentrations-)Netz angebunden werden. Dieses Teilnehmer anschließende Equipment wird wiederum an die an ausgewählten Standorten vorgesehenen Einrichtungen (der Ebene 1 oder 2) angebunden.

Das Modell ist in der Lage, bis zu 3 Konzentrationsnetzebenen abzubilden. Grafisch stellt sich dies wie in Abbildung 4-5 gezeigt dar. Die oberste Netzebene ist dabei als Ebene 2/3 bezeichnet, da sich die Ebenen spezifischen Einrichtungen von Ebene 2 und Ebene 3 (unterste Ebene des Kernnetzes) am selben Standort befinden und daher zusammenfallen (IP-PoP).

⁶⁰ Letztlich erlauben auch Ethernet Switches im MPoP eine Vorkonzentration (wenn sie unmittelbar auf die LER aufgeschaltet werden), da diese Systeme die Mengen der Kunden verwalten.

⁶¹ Beim Kernnetz analog die aggregierten Verkehre am IP-PoP

Abbildung 4-5: Sternstruktur im 3- und 2-Ebenen Konzentrationsnetz



Auf der linken Seite ist ein 3-Ebenen, auf der rechten Seite ein 2-Ebenen Konzentrationsnetz dargestellt. Aus der grafischen Darstellung geht hervor, dass auf allen Netzebenen teilnehmeranschließendes Equipment angesiedelt ist (dargestellt durch den MPoP, realisiert i.d.R. über einen Ethernet-Konzentrator). Selbst auf Ebene 2/3 werden die Teilnehmer über das Konzentrationsnetz spezifische Equipment indirekt an das IP-Kernnetz (LER) angeschlossen.

Ferner ist das Ethernet-Equipment auf den Netzebenen 1 sowie 2 in beiden Fällen als „Metro Switch“ gekennzeichnet. Hierbei handelt es sich um Einrichtungen gleicher Funktionalität im Netz, jedoch ggf. mit unterschiedlichen Kapazitäten (aufgrund unterschiedlich aggregierter Verkehrsmengen). Welche Kapazitäten die Einrichtungen auf Ebene 1 tatsächlich aufweisen müssen, wird jedoch durch das Modell im Rahmen der Systemzuweisung für jeden Standort individuell modellendogen ermittelt.

Die Mehrheit der Verkehre (alle IP-Verkehre) wird aus heutiger Sicht im Konzentrationsnetz vom MPoP hierarchisch bis zum entsprechenden IP-PoP geführt. D.h., die entsprechende Verkehrsmatrix bildet – wie hier dargestellt – ein Sternnetz zwischen den MPoPs und den zugeordneten IP-PoPs ab. Davon ausgenommen sind die Verkehre aus u.U. angebotenen virtuellen LAN-Diensten (VLAN),⁶² in denen Ursprung und das

⁶² Die derzeit wichtigsten VLAN- Dienste sind Ethernet Virtual Private Line (EVPL) und Ethernet Virtual Private LAN (EVPLAN), vgl. [Caballero-05]

Ziel des Verkehres im gleichen IP-PoP Cluster⁶³ liegen, und die Verkehre, die ggf. an Zusammenschaltungspunkten des Konzentrationsnetzes abgeführt werden.^{64 65} Diese Verkehre werden innerhalb des Konzentrationsnetzes separat geführt⁶⁶.

Im Unterschied zum IP-Verkehr wird für den VLAN-Verkehr im Konzentrationsnetz die Möglichkeit von Direktverbindungen berücksichtigt. D.h., für diese Verkehre wird von der Sternstruktur abgewichen und eine Vermaschung innerhalb des jeweiligen Clusters bei der Erreichung definierter Schwellwerte berücksichtigt. Die logischen Netzstrukturen sind in der nachfolgenden Abbildung 4-6 dargestellt, wobei links die reine Sternstruktur des IP-Verkehrs mit den zugehörigen (illustrativen) Verkehrswerten dargestellt ist und rechts die durch den VLAN-Verkehr ergänzte Verkehrsmatrix – dargestellt durch die dünnen Verbindungen mit beispielhaft angegebenen Verkehrswerten –, welche eine Vermaschung im ursprünglichen Stern bewirkt. Die Vermaschung ist hier illustrativ für ein 2-Ebenen-Netz dargestellt. In einem 3-Ebenen Kernnetz würde diese Darstellung die Anbindung von Ebene 0 auf Ebene 1 bzw. Ebene 1 auf Ebene 2 darstellen. Prinzipiell ist für die Verkehrsführung der Layer-2-Dienste (VLAN) auf der unteren Ebene keine Direktverbindung zwischen den MPoPs zu erwarten.⁶⁷ Die logische Struktur der oberen Ebenen (Ebene 1 und 2) entspricht der im 2-Ebenen-Konzentrationsnetz: Auch hier werden die VLAN-Verkehre prinzipiell hierarchisch über die obere Ebene geführt, es sei denn, dass die Verkehre für Querverbindungen auf der Ebene 1 die vorgegebenen Schwellwerte erreichen.

63 Ein IP-PoP Cluster wird durch sämtliche MPoP-Standorte definiert, die ein und demselben IP-PoP Standort zugeordnet sind.

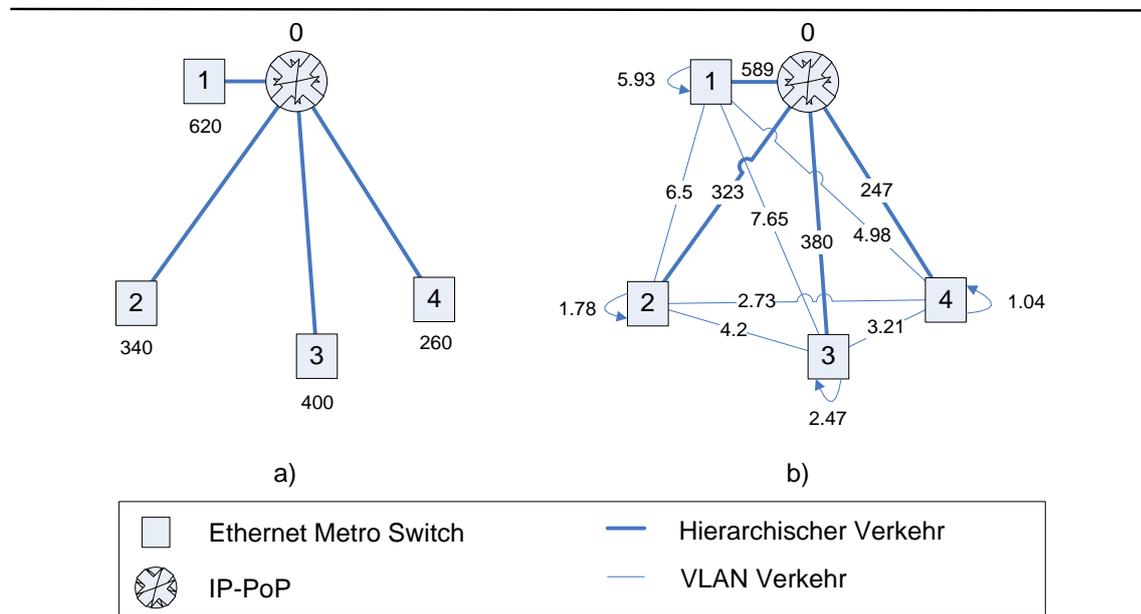
64 Szenarien für die Zusammenschaltung werden im Unterabschnitt 4.2.3 behandelt.

65 Diese VLAN Verkehre sind bei einer Verkehrsklassendifferenzierung vermutlich der Dienstkategorie „Premium Business-Dienste“ zuzuordnen.

66 mittels TAG-Switching

67 Aus Gründen der Flexibilität werden im Modell dennoch Querwege vorgesehen, die im Bedarfsfall parametrisiert werden können.

Abbildung 4-6: Sternstruktur und Schwellwert abhängige Vermaschung: 2-Ebenen-Konzentrationsnetz und Verkehrsmatrix



Wie aus Abbildung 4-6 b) hervorgeht, wird bei der Verkehrsverteilung sowohl die standortinterne Nachfrage (sog. *interner Verkehr* zwischen zwei Anschlüssen an einem MPoP) als auch die standortübergreifende Nachfrage (zwischen zwei Anschlüssen verschiedener MPoPs) berücksichtigt.

Für das Konzentrationsnetz wird ein 3-Ebenen-Netz dann als sinnvoll erachtet,

- wenn in den MPoPs lediglich kleine bis mittelgroße Verkehrswerte (etwa weniger als 2 Gbps) realisiert werden oder
- sofern die geografische Erstreckung des Konzentrationsnetzes hoch ist (d.h., geringe Anzahl von Standorten im NGN-Kernnetz und große Anzahl von MPoPs, die an einen gemeinsamen Kernnetz-Standort angeschlossen werden [Aggregation-Cluster]); die Einrichtung der 3. Ebene erlaubt es dann, die Anzahl der Metro-Switches nicht zu groß werden zu lassen.

Die Einrichtungen des 3-Ebenen-Netzes sehen auf der untersten Ebene eine Einrichtung vor, die aufgrund der (i.d.R.) geringeren Kapazität und der Tatsache, dass keine Querwege vorgesehen werden, als (Ethernet-)Konzentrator bezeichnet wird.

Demgegenüber wird ein 2-Ebenen-Konzentrationsnetz dann als sinnvoll erachtet, wenn die Verkehre auf der untersten Netzebene (reine MPoPs) bereits so stark sind⁶⁸ (d.h., im Bereich von mehreren Gbps), dass eine intermediäre Konzentrationsstufe im logischen Netz keine weiteren Vorteile bringt.

4.2.2 Kernnetz

Die eigentliche Verkehrswegelenkung erfolgt im Kernnetz, wobei in klassischen leitungsvermittelnden Netzen die Zuordnung von Vermittlungseinrichtungen zu den Ebenen eine strenge Netzhierarchie bildet, die zugleich die Verkehrsführung bestimmt⁶⁹. Im Gegensatz dazu bildet in IP-Netzen die Zuordnung der Router zu den Ebenen in der Regel keine strenge Netzhierarchie mit zugehörigen Überlaufverkehren, sondern gestattet eine flexible, von der jeweiligen Auslastung der Netzelemente abhängige Verkehrsführung, wobei die Verkehrsströme in flacher, nicht streng hierarchischer Weise über die verschiedenen Wege geführt werden können.

Welche Wege für die Paketübermittlung genutzt werden, hängt davon ab, wie das Traffic Engineering im Netz ausgestaltet ist. Zwei grundlegende Eigenschaften der IP-Technologie sind, dass Pakete dem „Best-Effort“-Prinzip folgend gleichberechtigt übertragen werden und dabei (nur) entsprechend der Zieladresse, möglichst den kürzesten Pfad im Netz nutzen.

Unabhängig von intelligenten Technologien der Paketdifferenzierungen wird die Anzahl möglicher Wege auch durch die entsprechende **Struktur der Verbindungsleitungen zwischen den verschiedenen Routerstandorten** determiniert. Damit kann indirekt durch die Struktur dieser Verbindungsleitungen ein **hierarchisches Netz** abgebildet werden. Hierarchisch bezieht sich dabei darauf, dass Pakete grundsätzlich über zugehörige Core Router geführt werden. Dabei ist davon auszugehen, dass die Größe des betrachteten Netzes ebenfalls die Netzstruktur beeinflusst, so dass sich die Ausprägung der Netzhierarchie zwischen verschiedenen großen Netzbetreibern unterscheidet.

Die Modellimplementierung sieht ein hierarchisches Kernnetz von bis zu 3 Ebenen vor, so dass die Möglichkeit der Abbildung hierarchischer Strukturen für die Kostenberechnung erlaubt wird, wobei davon ausgegangen wird, dass die Verkehrsmengen in einer höheren Ebene größer sind, als in der jeweils darunter liegenden Ebene.

⁶⁸ Dabei handelt es sich um die Bandbreitennachfrage der Nutzer, die im MPoP aggregiert wird.

⁶⁹ [WIK-05; 30ff.].

Damit ergeben sich folgende Strukturen im logischen Netz:

- rein flaches Ein-Ebenen-Netz
- hierarchisches Zwei-Ebenen-Netz
- hierarchisches Drei-Ebenen-Netz

Im Modell werden im hierarchischen Fall keine direkten Verbindungen zwischen unteren Standorten im logischen Netz betrachtet. Gleiches gilt für „Überlaufverbindungen“ von einem unterem Standort zu einem oberen Standort, der dem unterem nicht zugeordnet ist. Bei der hierarchischen Führung werden somit keine Querwege eingesetzt. Wenn Direkt- bzw. Querwege eingesetzt würden, ergäbe sich unter MPLS/IP zwangsläufig ein flaches Netz weil dann auch in der unteren Ebene ein LSR zu installieren wäre und damit kein Unterschied zwischen den unteren und oberen Knoten entstünde. Die für das Modell zugrunde gelegte hierarchische Netzstruktur reflektiert damit letztlich die Bedeutung des hierarchisch geführten IP-Verkehrs.

Um die Struktur des logischen Kernnetzes festzulegen, sind die Funktionen zu betrachten, die von den Standorten in jedem dieser Fälle wahrgenommen werden. In IP-Transportnetzen wird in der Regel nicht mehr die Paketführung mittels des Datagramm-Protokolls vorgenommen, bei dem die Adresse jeden einzelnen IP-Paketes analysiert und das Paket dann in die richtige Richtung weitergeleitet wird⁷⁰. Vielmehr werden derzeit Router verwendet, die über das sog. MPLS-Protokoll virtuelle Verbindungen von einem Eingangs- zu einem Ausgangsrouter aufbauen, vgl. [Black-02]. D.h. es werden feste Pfade durch das Netz definiert, die über sogenannte Label identifiziert werden können. Die Eingangs- und Ausgangs-Router werden als „Label Edge Router“ (LER) bezeichnet. Sie „kleben“ vor ein IP-Paket ein Label, das den direkten Weg zum Ziel beschreibt. Die Router in den Zwischenknoten der Verbindung werden demgegenüber als „Label Switch Router LSR“ bezeichnet.⁷¹ Sie interpretieren das Label unmittelbar während des Eintreffens des IP-Paketes bereits auf der Schnittstellenkarte und sorgen für seine Weiterleitung, ohne das Paket zunächst zwischenspeichern. Dies beschleunigt die Datenübertragung erheblich, weil auf das zeitaufwändige Zwischenspeichern verzichtet werden kann, vgl. [Mannie-04].

70 Das IP-Paket wird zunächst empfangen und zwischengespeichert, bevor der Zieladresse des Paket aus der im Knoten gespeicherten Routing Tabelle der nächste auf dem Weg zum Ziel liegende Knoten zugeordnet wird und das Paket dann über den entsprechend Link dorthin weitergeleitet wird (sogenanntes Store and Forward).

71 Die LER nehmen im Ursprung die IP-Pakete aus den Konzentrationsnetzen auf und sind für das Einfügen des MPLS Labels zuständig und im Ziel wird vom LER u.a. das Label entfernt. Die LSR führen dann die Pakete von einem Eingangsport zu einem Ausgangsport nicht mehr auf der Basis der IP Adresse, sondern nur auf der Basis des MPLS Label vor, wodurch ein wesentlich erhöhter Durchsatz bei gleichzeitigem verringertem Delay und Jitter erreicht wird.

Die Aufgabe der Label Switch Router besteht darin, große Datenmengen anhand des MPLS zu transferieren. Dazu sind die Core Router Standorte normalerweise stark bzw. vollvermascht. Vielfach sind an diese Netzknoten auch Server-Farmen für verschiedene Internet Dienste angeschlossen (E-Mail Server, Web Server, Radius, DNS etc.), wobei an diesen Standorten dann auch LER vorgehalten werden, über die die Verkehre von und zu den Servern ausgeführt werden. Zudem sind die Standorte der LSR zugleich oft auch zentrale Punkte für Verbindungen zu anderen IP-Netzen bzw. zu den so genannten Internet Exchange Points IxP bzw. öffentliche NAPs.

Unter Berücksichtigung von maximal drei Ebenen im Kernnetz ergeben sich folgende Strukturen im Modell für die logische Struktur des Kernnetzes:

Tabelle 4-1: Optionen für die logische Struktur eines 3-Ebenen Netzes

	Vermascht	Hierarchisch vermascht	Ring	Stern/ bzw. Doppelsternanbindung
Obere Ebene	x		x	
Mittlere Ebene				x
Untere Ebene				x

Im Falle eines

- rein flachen Ein-Ebenen-Netzes existiert nur die in Tabelle 4-1 dargestellte obere Ebene (vgl. auch Abbildung 4-4 in Abschnitt 4.1)
- hierarchischen Zwei-Ebenen-Netzes existieren die in Tabelle 4-1 dargestellte obere sowie die untere Ebene

4.2.2.1 Vorgabe von Serverstandorten im Kernnetz

Wie bei der Nachfragemodellierung gezeigt, sind alle Nutzer an MPoP-Standorte angeschlossen. Die Server für Konferenz-, IPTV-, VoD- und best effort-Dienste sowie die Interconnection-Einrichtungen zur Abführung und Aufnahme von Verkehren aus anderen Netzen sind dagegen jeweils an einer Untermenge der Standorte des Kernnetzes direkt angeschlossen.

Für jeden der Nutzer-Server-Dienste ist die Anzahl der Server im Modell individuell vorzugeben (Inputparameter). Nach Maßgabe der vom Modellanwender vorgegebenen Anzahl an (Server- bzw. IC-) Standorten greift im Modell eine endogene Auswahlroutine, die diese Standorte zunächst auf der obersten Netzebene ansiedelt und innerhalb dieser Ebene zunächst diejenigen mit größtem Verkehrs-Gewicht auswählt. Im Fall einer überschießenden Zahl von Server- bzw. IC-Standorten wird diese Verteilung auf der

nächst niedrigeren Netzebene entsprechend der dort vorliegenden Verkehrswerte in absteigender Rangfolge fortgeführt.

Prinzipiell kann argumentiert werden, dass lediglich je betrachtetem Dienst nur ein Server erforderlich ist, der die gesamte Nachfrage bedienen kann, wobei eine redundante Einrichtung aus Verfügbarkeitsgründen vorzuhalten ist (idealerweise an einem anderen Standort). Dem steht gegenüber, dass die Konzentration von Server oder IC-Einrichtungen an einen Standort mit deutlich höheren Transportkapazitäten verbunden ist, als im Fall einer dezentralen Serverstruktur. – Vor diesem Hintergrund ist im Modell die Inputparameter gesteuerte Vorgabe von Serverstandorten bei dem hierarchischen Routing innerhalb des Kernnetzes berücksichtigt.

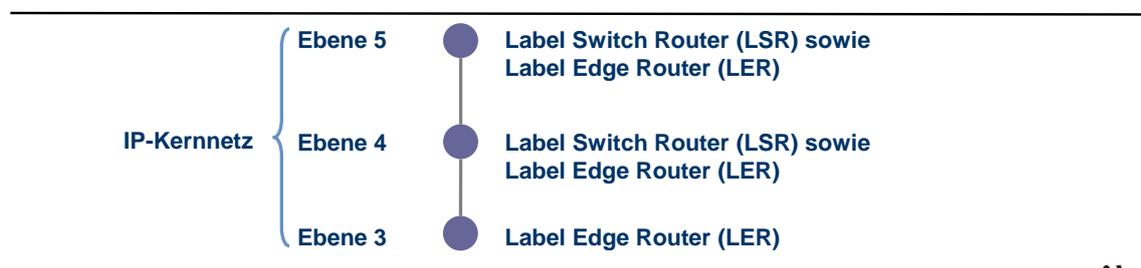
4.2.2.2 Hierarchisches Kernnetz

Der Fall eines hierarchischen Kernnetzes soll am Beispiel mit drei Ebenen illustriert werden, da dieses – unter Vernachlässigung der mittleren Ebene – dem 2-Ebenen Netz entspricht.

Den Funktionen eines jeden Kernnetzstandortes entsprechend sind auf der untersten Kernnetzebene LER vorzuhalten, die – in Zusammenarbeit mit dem BRAS (Broadband Remote Access Server), der im Rahmen der Kontrollschicht behandelt wird – den Eingang in das IP-Kernnetz steuern.

In den beiden Standorten der oberen Ebenen (mittlere und obere) sind sowohl LER- als auch LSR-Einrichtungen installiert, in den Standorten der unteren Ebene des hierarchischen Kernnetzes lediglich LER. Die LER werden durch interne Verbindungen innerhalb des Standortes an die LSR angebunden.

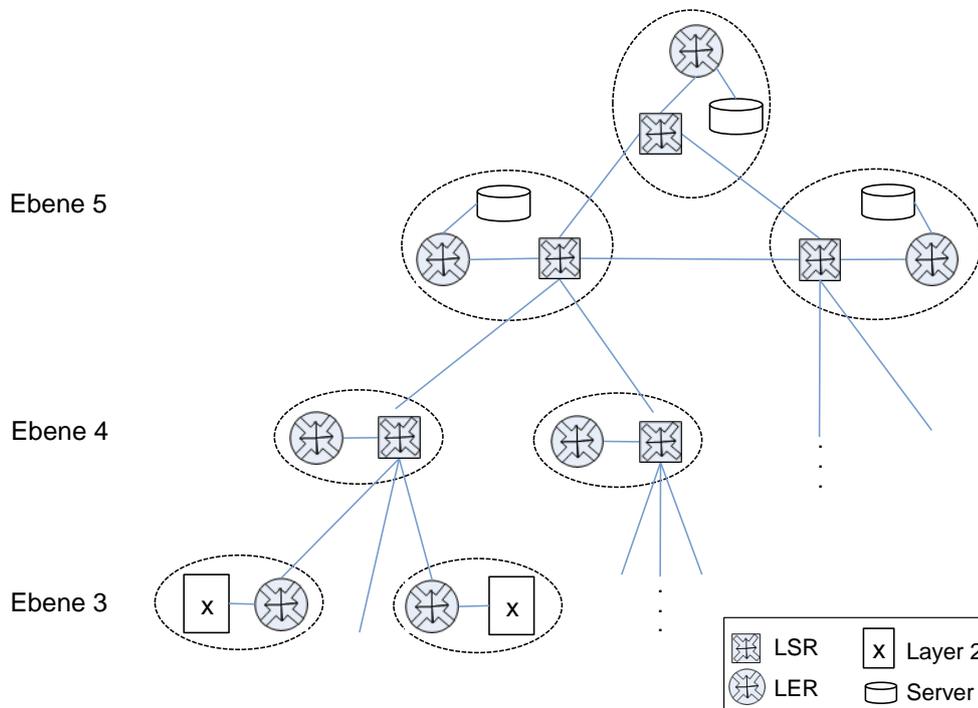
Abbildung 4-7: Einrichtungen im 3-Ebenen-Kernnetz (IP-Kernnetz)



Die Standorte der untersten Ebene werden an jeweils einen Standort der mittleren oder der obersten Ebene angebunden.⁷² Im Falle eines 2-Ebenen Kernnetzes entfällt im Modell die mittlere Kernnetzebene.

Wegen der stark verminderten Anzahl von Knoten der obersten Ebene und der sich daraus ergebenden hohen Verkehrsströme wird im Modell eine Vollvermaschung der Standorte dieser Ebene abgebildet. Somit ist im flachen Kernnetz sowohl die Anzahl der Hops minimiert als auch sind redundante Wegeführungen gewährleistet. Die Anbindung der unteren sowie der mittleren Ebene erfolgt im Modell sternförmig.

Abbildung 4-8: Logische Netzstruktur eines hierarchischen 3-Ebenen Kernnetzes



Die vorgenannten Netzstrukturen, die auf der Basis von LER- und LSR-Einrichtungen beschrieben wurden, bleiben auch gültig, wenn Routereinrichtungen wegen des hohen Verkehrsstroms im Kernnetz nicht mehr auf der Basis des MPLS, sondern auf Basis neuer Protokolle (so z.B. dem GMPLS) die Lenkung der Paketströme vornehmen. Letztlich können diese Protokolle als „technikneutral“ hinsichtlich der Netzstrukturen bezeichnet werden.

⁷² I.d.R. wird diese Anbindung an den geografisch nächstliegenden oberen Standort vorgenommen, wobei Abweichungen möglich sind, um die Standorte gleichmäßiger zu verteilen.

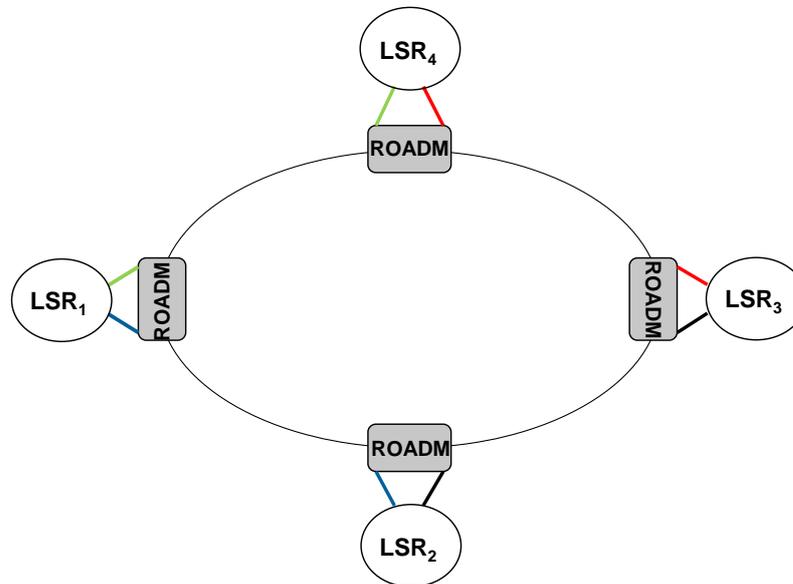
4.2.2.3 Vermaschtes Kernnetz auf der obersten Netzebene bzw. im 1-Ebenen-Kernnetz

Im Modell werden die logischen Netzstrukturen im 1-Ebenen Kernnetz (flaches Kernnetz) durch die Strukturen in der oberen Ebene des hierarchischen Kernnetzes abgebildet. Daraus ergibt sich für das 1-Ebenen Kernnetz die Besonderheit, dass an allen Standorten nicht nur LER, sondern zusätzlich auch LSR vorgehalten werden.⁷³

Die LSR erlauben ein sogenanntes Multi-Protokoll-Label-Switching (MPLS) anhand der von den LER verteilten Label für vordefinierte Wege durch das Kernnetz. In den LSR erfolgt kein Routing, sondern lediglich ein schnelles Weiterleiten anhand des vor die Datenpakete gestellten Labels, das den Weiterleitungspfad eindeutig beschreibt. Das Label-Switching fungiert vergleichbar zu einer Layer 1 Einrichtung, die den Verkehr, der nicht für den jeweiligen Standort bestimmt ist, einfach durchleitet. Das MPLS erlaubt, den physikalischen Grad der Vermaschung zwischen den Routern (auf Ebene der logischen Ports) durch den Einsatz der LSR zu reduzieren. So könnte z.B. die logische vollständige Vermaschung von Knoten einer Ebene durch einen physikalischen Stern abgebildet werden. Weil ein Sternpunkt als Single Point of Failure zu Redundanzproblemen führen würde, ist die nächst einfachste Form der Realisierung der Netzebene 5-5 ein logischer Ring, bestehend aus LSR-Einrichtungen, der eine redundante Zwei-Wege-Führung erlaubt.

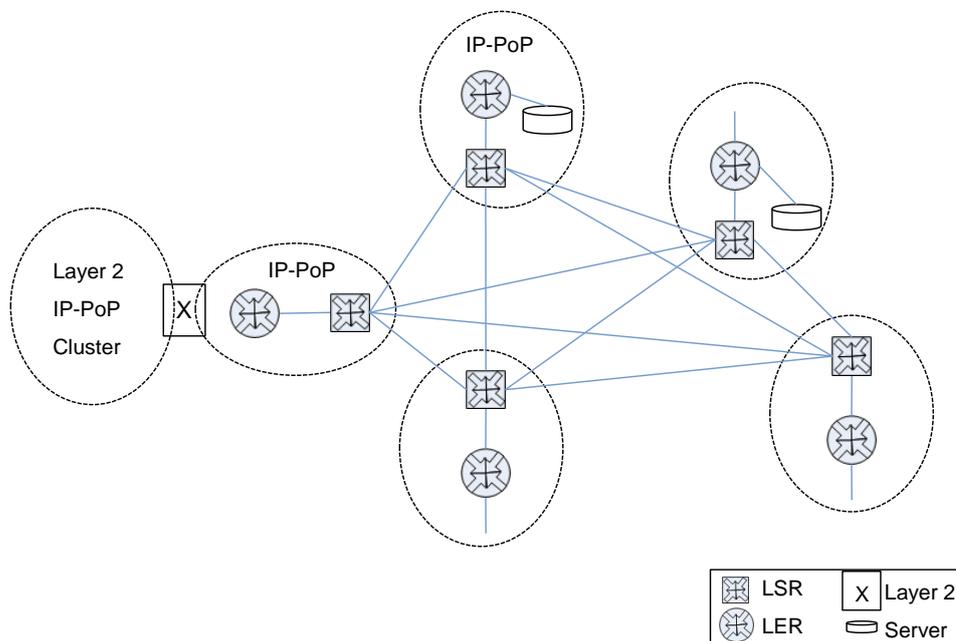
⁷³ Im hierarchischen Kernnetz aus mehreren Ebenen gab es IP-PoP (Ebene 3), die keine LSR beheimateten. Diese gab es nur an den Standorten, die zusätzliche Funktionen (Ebene 4 und/ oder 5) erfüllten.

Abbildung 4-9: Einsatz von LSR im Ring



Ebenso kann aber auch im 1-Ebenen Kernnetz eine explizite Berücksichtigung einer Vermaschung erfolgen. Hierbei wird von einer vollständigen Vermaschung der Netzknoten über dedizierte Schnittstellen ausgegangen. Es wird dann geprüft, inwieweit einzelne Verbindungen aus diesem Verband herausgelöst werden können, ohne nachfolgend genannte Randbedingungen zu verletzen und ohne die Kosten für das Gesamtkonstrukt zu erhöhen. Die erste Randbedingung ist das Maß an Konnektivität, dass ein Knoten mindestens behalten muss, d.h. die Anzahl voneinander unabhängiger Wege, über die ein Knoten alle anderen Knoten erreichen kann. Die zweite Randbedingung ist der sogenannte Diameter, d.h. die maximale Anzahl Zwischenknoten, die es auf dem Weg von einem beliebigen Knoten des Kernnetzes zu jedem anderen Knoten des Kernnetzes geben darf. Über diese Vermaschung, die in der Regel ein höheres Maß an Redundanz als der einfache Ring bietet, kann dann ein MPLS vollständig vermaschtes logisches Netz gelegt werden.

Abbildung 4-10: Logische Netzstruktur der obersten Kernnetzebene



4.2.3 Verkehrsführung von und zu Zusammenschaltungspunkten

Wie schon in Abschnitt 3 gezeigt, werden an den MPoPs des Breitbandnetzes eines nationalen Netzbetreibers auch Nutzer angeschlossen, die vertraglich zu einem alternativen Netzbetreiber gehören. Marktbeherrschende Anbieter unterliegen regulatorischen Vorgaben zum Angebot derartiger Wholesale Vorleistungen. Deren Verkehre werden, abhängig von der Tiefe der Infrastruktur des nachfragenden alternativen Betreibers, an entsprechenden Netzzugangs- oder Zusammenschaltungspunkten ab- bzw. zugeleitet. Aus heutiger Sicht werden diese Zusammenschaltungspunkte bzw. Netzzugänge vor allem im Kernnetz realisiert. Sie sind auch im Konzentrationsnetz denkbar. Sie sind für den Bitstrom im Kostenmodell für das Breitbandnetz dort auch vorgesehen.

Für den Netzzugang im Sinne von Bitstrom sieht das Modell vor, MPoP-spezifisch die Anschlusszahlen der Teilnehmer für Bitstrom differenziert nach Netzebene anzugeben, an der das Netz wieder verlassen wird. Sofern nur globale Informationen über die Verteilung von Anschlusszahlen und ihre Zuordnung auf die Netzebenen vorliegen, kann eine prozentuale Aufteilung je Ebene vorgenommen werden, wie in der nachfolgenden Tabelle 4-2 dargestellt.

Tabelle 4-2: Beispiel für Zusammenschaltungsszenarien in einem 3-Ebenen-Konzentrations- und 2-Ebenen-Kernnetz

Zusammenschaltungsszenario	MPoP Ebene 0	Metro Switch Ebene 1	Metro Switch am IP PoP Ebene 2	IP PoP untere Ebene Ebene 3	IP POP obere Ebene Ebene 5
Nur an der obersten Ebene des Kernnetzes	0	0	0	0	1
An allen IP-PoPs	0	0	0	0,3	0,7
An allen IP-PoPs und oberste Ebene im Konzentrationsnetz	0	0	0,2	0,3	0,5
An allen IP-PoPs und Metro Switch	0	0,1	0,2	0,3	0,4
An allen Knoten	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3

Der Bitstrom am MPoP beschreibt die Situation, bei der ein alternativer Netzbetreiber nur das Anschlussnetz des anbietenden Netzbetreibers nutzt. Dies kann dann sinnvoll sein, wenn im MPoP nicht unmittelbar auf entbündelte Vorleistungen zurückgegriffen werden kann, sondern dort bedingt durch NGA-Netze nur ein Bitstrom als Vorleistung offeriert werden kann. Derartige Vorleistungen werden in einzelnen Ländern daher auch als virtuelle Entbündelung bezeichnet.

Neben den Verkehrsströmen einzelner Anschlüsse, die den Netzen alternativer Netzbetreiber zugeführt werden, sind insbesondere noch die Zusammenschaltungspunkte für die

- dienstespezifische Zusammenschaltung, wie bspw. VoIP oder TDM-basierte Zusammenschaltung für Sprache oder
- Internetkonnektivität (auch Peering genannt)

von Bedeutung.

Der Anteil von Interconnection-Verkehr ist vor allem Ausdruck der Marktstruktur und insbesondere in einem regulierten Markt nicht in der Kontrolle des nationalen Netzbetreibers. Der Umfang des Interconnection-Verkehrs wird durch den Modellanwender über Inputparameter als Anteile an der Verkehrsnachfrage gesteuert.

Im Übergang von PSTN/ ISDN zu NGN Netzen muss der Sprachverkehr derzeit noch auf beide Arten übergeben werden können, in der bisherigen Form als TDM Verkehr oder in der neuen VoIP Form. Das Modell erlaubt eine individuelle Parametrisierung für IC-Sprachverkehr einerseits über TDM und andererseits über IP. Diese Differenzierung auf der Nachfrageseite ist verbunden mit einer entsprechenden Differenzierung der

Standortwahl (TDM- bzw. IP-Zusammenschaltungsstandorte können sich unterscheiden).

Da sich die Inputparameter gesteuerte Vorgabe von Zusammenschaltungspunkten auf die Anzahl beschränkt, wird im Modell eine Zuordnungsregel umgesetzt, wonach die Rangfolge der Verkehrsstärke der Knoten als Auswahlkriterium herangezogen wird, wobei mit der Zuordnung in der obersten Netzebene bei den verkehrsstärksten Knoten begonnen wird.

Ein zentraler Aspekt der Modellierung von Interconnection-Verkehren ist die Differenzierung nach Wertschöpfungsstufen bzw. unterschiedlichen Tarifstufen. So werden für die Zusammenschaltung von Sprache die herkömmlichen Tarifstufen local, single und double tandem unterschieden. Die Unterscheidung erfolgt im Modell dabei auf Basis der Verkehrsanteile für die verschiedenen Tarifstufen, so dass letztlich der Voice-IC Verkehr eines jeden Anschlusses nach Maßgabe der durch den Modellanwender angegebenen Anteile geroutet wird. – Auf diese Weise ist es möglich, die bisherigen Zusammenschaltungsstrukturen für Sprache im Breitbandmodell abzubilden. Dabei ist es auch möglich, im Modell die Bestimmung der Netzstruktur von der Festlegung der Zusammenschaltungsstandorte zu trennen.

Bei der Art der Zusammenschaltung (TDM oder IP basiert) ist ferner das erforderliche spezifische Equipment⁷⁴ zu beachten und entsprechend zu dimensionieren. Dies erfolgt im Rahmen des Kostenmoduls im Zuge der Systemzuweisung.

Bezüglich des allgemeinen IP-Interconnection-Verkehrs ist mit Blick auf die Modellparametrierung zu konstatieren, dass die Internetkonnektivität und insbesondere das über die zugehörigen Zusammenschaltungspunkte abgewickelte Datenvolumen einer Vielzahl von Einflussfaktoren unterliegt, die begrenzt vom betrachteten Netzbetreiber gesteuert werden können. So ist die Verfügbarkeit von attraktiven Dienste- oder Inhalte-Servern im eigenen Netz oder in den Netzen anderer Betreiber (ON- oder OFF-Net) von zentraler Bedeutung für den Umfang sowohl des aus- als auch des eingehenden Verkehrs.

Welche empirische Bedeutung dieser theoretisch bedeutenden Volatilität der Interconnection-Verkehre zukommt, kann von uns nicht abschließend beurteilt werden und mag sich von Netzbetreiber zu Netzbetreiber unterscheiden. Eine modellendogene Berücksichtigung von Handlungsparametern, die den Netzbetreibern zur Verfügung stehen, um auf etwaige Veränderungen zu reagieren (z.B. zusätzliches Hosting von Dienste- und Inhalte-Servern, die umfangreiche Verkehre generieren), übersteigt den Rahmen des Kostenmodells, da es die Freiheitsgrade zur Ableitung effizienter Netz-

⁷⁴ Z.B. Mediagateway (MGW) im Fall von TDM bzw. Session Border Controller (SBC) bei VoIP.

und Zusammenschaltungsstrukturen unverhältnismäßig vergrößert und keine größere Ergebnisgenauigkeit garantiert.

Das Modell arbeitet daher mit einer Inputparameter gesteuerten Festlegung des ein- und ausgehenden Interconnection-Verkehrs. Implikationen einer ggf. relevanten Volatilität dieser Verkehre müssen über Sensitivitätsrechnungen abgeschätzt werden. Diese Vorgehensweise belässt die Schwierigkeit der Festlegung angemessener Werte bei dem Modellanwender, der verlässliche Daten aus dem Markt beschaffen muss. Letztlich gilt auch hier, dass die Qualität der vom Modell generierten Ergebnisse ein Reflex der Qualität der Eingabedaten ist.

4.3 Redundanzen in logischer und physikalischer Netzstruktur

Elektronische Übertragungssysteme und ihre Komponenten unterliegen gelegentlich Fehlern - sie können z.B. ausfallen -, Telekommunikationslinien werden gelegentlich unterbrochen (z.B. durch Bagger bei Baumaßnahmen) oder Standorte können ausfallen (z.B. durch Brand, Naturkatastrophen, ...). Diese Fehler können durch absichtliche Fremdeinwirkungen verstärkt werden. Dies gilt auch, wenn alle Systeme und Elemente Carrier Class ausgelegt werden. Telekommunikationsnetze sind zudem die wichtigsten Nervenbahnen unserer heutigen Welt und für eine funktionierende Volkswirtschaft essentiell. Um die Verfügbarkeit des Netzes zu erhöhen und gegen die aufgeführten Fehler unempfindlicher zu machen, können verschiedenste Maßnahmen ergriffen werden. Dazu zählen

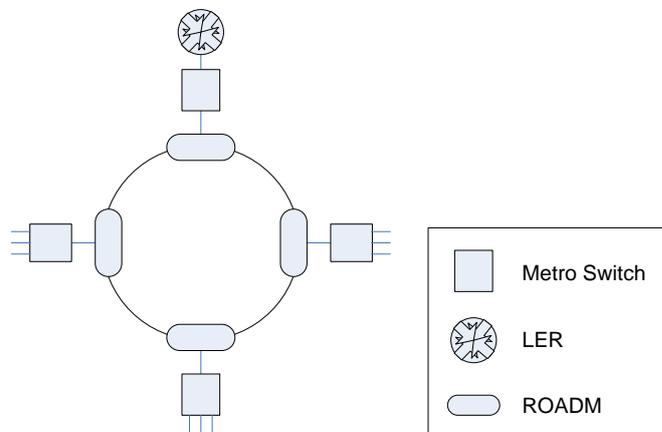
- (1) Mehrwegeführung im Ring oder in vermaschten Netzen und angepasste Dimensionierung der bereitgestellten Übertragungswege
- (2) Redundanzen in der Bereitstellung technischer Einrichtungen sowohl der logischen als auch der physikalischen Schicht (z.B. Doppelung von Plug-in-Units und zugehörigen Ports)
- (3) Standortabsicherung im Sinne der Anbindung eines Standortes an zwei geografisch verschiedene Standorte. Dies ermöglicht eine Absicherung der Verkehre aus unteren Netzebenen infolge eines vollständigen Standortausfalls.

Letztendlich wird eine angemessene Bewertung der Fehler, ihrer Störwirkbreite und die Kosten für Vorsorge und Redundanz für eine angemessene Auslegung der Telekommunikationsnetze sorgen, ggf. unterstützt durch regulatorische Auflagen. Die Kosten hierfür müssen in den regulierten Entgelten entsprechend berücksichtigt werden. Daher erlaubt unser Kostenmodell, die gängigen und dem Stand der Technik entsprechenden Maßnahmen angemessen abzubilden. Nicht jede Zwischenstufe kann modelliert werden, aber durch ein Spektrum von keiner bzw. wenig Redundanz kann über angemess-

sene Zwischenstufen auch ein sehr hohes Maß an Redundanz abgebildet werden, so dass ein Rahmen für angemessene Abschätzungen aufgespannt werden kann.

Eine Mehrwegeführung wird im Modell grundsätzlich berücksichtigt. Diese wird dabei über die physikalischen Topologie realisiert (physikalische Netz“struktur“), siehe hierzu auch Kapitel 5. Der physikalische Ring bildet dabei die Basistopologie in hierarchischen Netzen (mit einer logischen Sternstruktur) und erlaubt bei einem Ausfall von Knoten oder Kanten im Ring eine Verkehrsführung über die zweite Ringhälfte.⁷⁵

Abbildung 4-11: Ring als Grundform der Mehrwegeführung am Beispiel des 2-Ebenen Konzentrationsnetzes



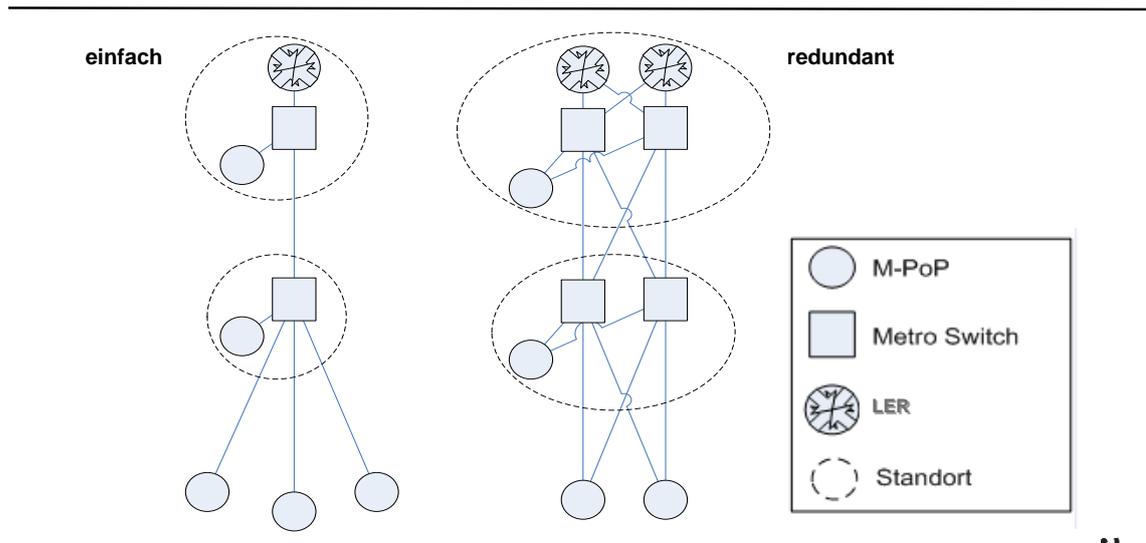
Neben der standardmäßig vorgehaltenen 2-Wege-Führung wird im Modell ein Steuerungsparameter für die im Ring vorgehaltene Kapazität bereit gestellt (ring protection). Diese kann den Wert 50% oder 100% annehmen. Bei 50% kann im Falle einer Ringunterbrechung lediglich 50% des Verkehrs geführt werden, bei 100% ring protection stehen die benötigten und ausgefallenen Kapazitäten der defekten Ringhälfte auf dem zweiten Ast zur Verfügung.

Im Fall eines vermaschten Netzes, wie es auf der obersten Kernnetzebene zur Anwendung kommt, werden – wie bereits ausgeführt (siehe Abschnitt 4.2.2.3) – mindestens zwei unabhängige Pfade von einem LSR ausgehen, über die der jeweilige Zielknoten erreicht werden kann. Neben der Berücksichtigung von zwei unabhängigen Ports (2-Wege) kann entweder jeweils 50% oder 100% der Verkehrsnachfrage zur Dimensionierung der Ports vorgesehen werden.

⁷⁵ Siehe hierzu auch Abbildung 5-2, anhand der die physikalische Realisierung einer logischen Sternstruktur durch eine Ringtopologie illustriert wird.

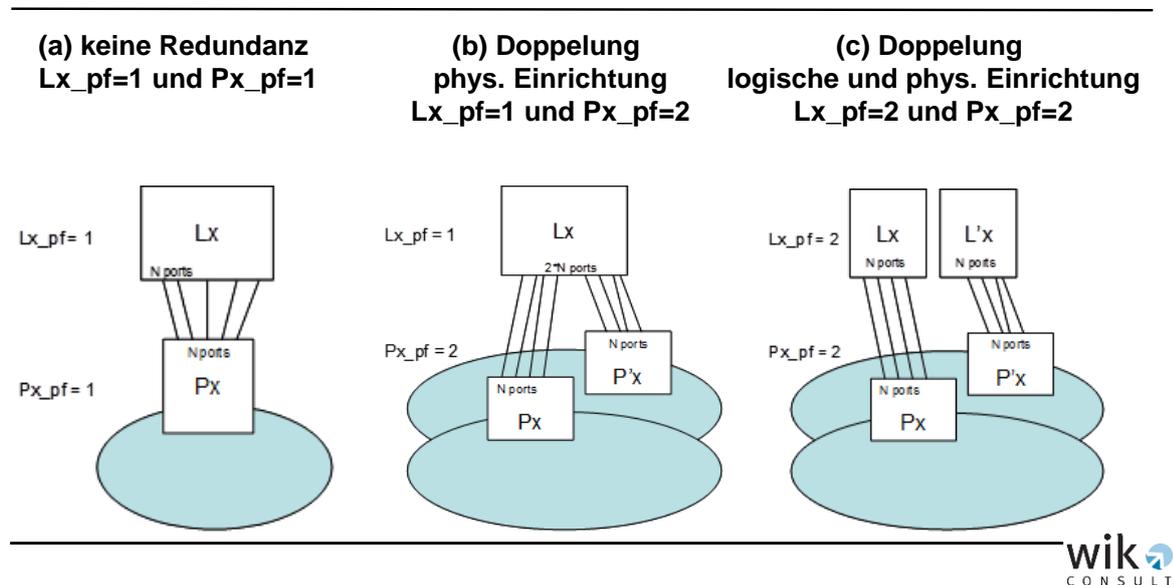
Die Bereitstellung von Redundanzen bei technischen Einrichtungen stellt eine weitere Absicherungsstrategie dar. Die Doppelung von logischen Einrichtungen im 3-Ebenen-Konzentrationsnetz auf Ebene 1 und 2 wird anhand der nachfolgenden Abbildung 4-12 illustriert.

Abbildung 4-12: Doppelung von logischen Einrichtungen im 3-Ebenen-Konzentrationsnetz auf Ebene 1 und 2



Ebenso können Redundanzen auf Ebene der technischen Einrichtungen des physikalischen Netzes vorgesehen werden. In der nachfolgenden Abbildung 4-13 ist dies am Beispiel eines Ringstandortes illustriert, wobei auch die Redundanz der logischen Systeme Berücksichtigung findet. Lx_{pf} bezeichnet dabei den Absicherungsfaktor (protection factor, pf) für die Einrichtung des logischen (L) Netzes, demgegenüber Px_{pf} für die Einrichtung des physikalischen Netzes. Die Doppelung der Einrichtung des physikalischen Netzes führt dabei zu der Errichtung eines Doppelrings.

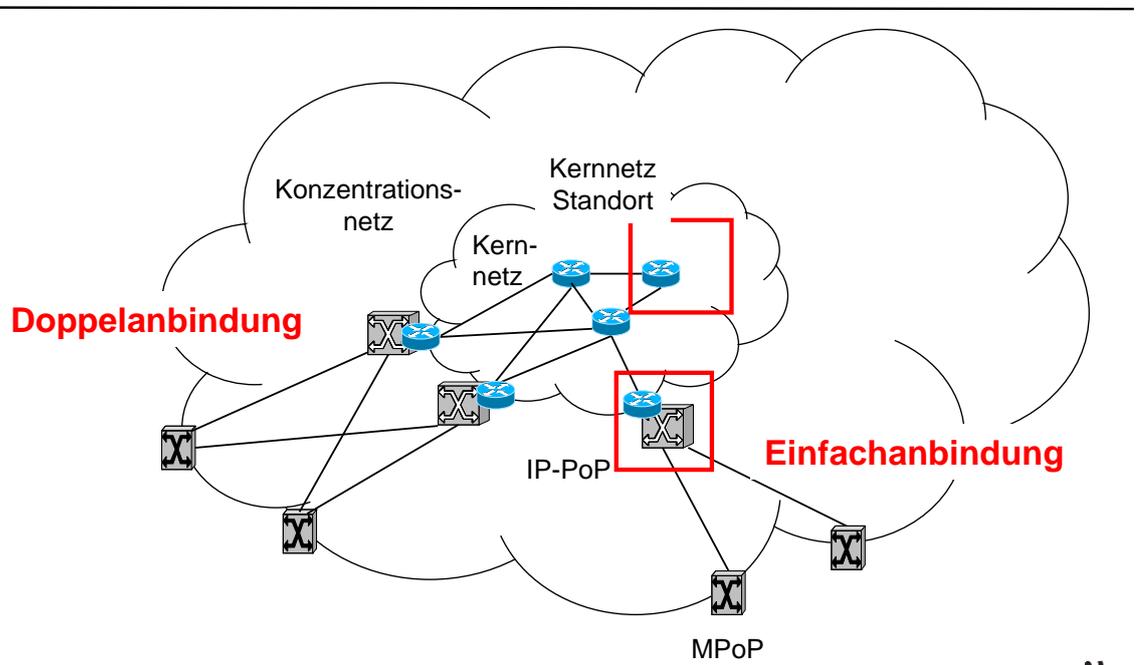
Abbildung 4-13: Doppelung von technischen Einrichtungen des physikalischen Netzes (Px)



Aufgrund der Vielzahl von Absicherungsmöglichkeiten und den damit verbundenen Kombinationen ist im Modell lediglich eine Auswahl der möglichen Absicherungsformen der technischen Einrichtungen des logischen und physikalischen Netzes vorgesehen. Die im Modell implementierten Varianten sind dabei in Abbildung 4-13 dargestellt. Die Absicherung der Einrichtungen des logischen Netzes wird in Zusammenhang mit dem nachfolgend darzustellenden Aspekt der Standortabsicherung dargestellt.

Der Fall der Standortabsicherung ist im Fall eines hierarchischen Netzes von Bedeutung und soll sicherstellen, dass bei Ausfall eines intermediären Knotens nicht der komplette Verkehr des darunter liegenden Clusters ausfällt. Diese Form der Absicherung wird auch Doppelanbindung/ Doppelabstützung (double assignment) genannt. Im Modell wird eine Doppelanbindung dadurch erzeugt, dass einem Standort der unteren Netzebene zwei Standorte der höheren Netzebene zugeordnet werden (unter Beibehaltung der bestehenden Zuordnungskriterien bei der Hierarchiebildung). Es entstehen dadurch veränderte Cluster (Aggregation von Standorten) gegenüber der Einfachanbindung. Die nachfolgende Abbildung illustriert sowohl die Einfachanbindung (single assignment) als auch die Doppelanbindung (double assignment).

Abbildung 4-14: Standortabsicherung: Clusterbildung bei Einfach- und Doppelanbindung am Beispiel eines zwei Ebenen Konzentrations- und Kernnetzes



Die Implikationen, wenn standortbezogene Redundanzen vorgesehen werden, sollen nachfolgend anhand eines Beispiels illustriert werden. Prinzipiell ist es möglich, dass der Verkehr aus der unteren Ebene auch an geografisch verschiedene Standorte geführt wird und dort die Absicherungsoption besteht, die logischen Einrichtungen wieder zu doppeln (wie dies in Abbildung 4-12 rechts dargestellt ist). In der nachfolgenden Tabelle ist für ein Beispiel-Szenario gezeigt, welche Auswirkungen diese Redundanzen mit Blick auf Einrichtungen und Standorte auf die Verkehrsanteile und damit letztlich auf die Auslastung der Einrichtungen haben.

Tabelle 4-3: Relative Werte für die Verkehrsverteilung bei Doppelanbindung an einem bzw. zwei Standorten (Auslastung)

Anbindung	1 Standort	1 Standort	2 Standorte	2 Standorte
Doppelung der Einrichtungen	nein	ja	nein	ja
Anteilige Verteilung des Verkehrs auf die Standorte der unteren Ebene	1	0,5	1	0,5
Anteilige Verteilung des Verkehrs auf die Standorte oberen Ebene	1	0,5	0,5	0,25

Die Doppelung der Einrichtungen ist sicherlich mit zunehmender Verkehrsstärke – und damit Netzebene – sinnvoll, da somit der Ausfall für umfangreiche Verkehre vermieden werden kann (an diesen Standorten wird der Verkehr von einer großen Anzahl von Nutzern aggregiert).

Aufgrund der schwerwiegenden Folgen eines Standortausfalls ist im Modell eine Standortabsicherung vorgesehen. Die Berücksichtigung der Standortabsicherung (Wahl zwischen Einfach- und Doppelanbindung) erfolgt parametergesteuert und ist mit einer Aufteilung der Verkehre auf die beiden logischen Kanten verbunden, und zwar zu 50% bzw. 100%; d.h. die Kapazitäten werden hier ebenfalls auf das halbe oder gesamte Verkehrsvolumen des betrachteten Standorts ausgelegt (Absicherung logischer Einrichtungen im Fall der Doppelanbindung). Die Doppelabstützung sorgt aber nicht nur für eine höhere Verfügbarkeit des Netzes, sondern dient im Nebeneffekt auch zu einer gleichmäßigeren Verteilung des Verkehrs im Netz, so dass u.U. die Gesamtkosten gegenüber einer Einzelanbindung sinken.

4.4 Netzdimensionierung

Nach Festlegung der Hierarchie sowohl für das Konzentrations- als auch für das Kernnetz und der Berechnung der Verkehrswerte aus der in den MPoP aggregierten Verkehrsnachfrage (gehend und kommend) sind die Verkehrsnachfragen entsprechend ihres Ursprungs und ihrer Ziele zu führen. Anschließend sind die entsprechenden Verkehrswerte in Form von Bandbreitennachfragen sowohl in den Netzknoten (Standorten) als auch auf den Netzkanten (logische Direktverbindungen zwischen zwei Standorten) bekannt und es können die entsprechenden Bandbreitennachfragen in Form von standardisierten elektrischen bzw. optischen Verbindungen berechnet werden.

4.4.1 Dimensionierung und QoS-Realisierungsform

Die Verkehrsführung wird i.d.R. auf dem kürzestem Weg in der logischen Netzstruktur erfolgen, um die Anzahl der Zwischenknoten und damit auch die Anzahl der Schnittstellen in den LSR, die zu durchlaufen sind, zu minimieren. Die Führung hat zunächst getrennt für jeden Dienst (n Dienste) und wegen der Asymmetrie getrennt für jede Richtung zu erfolgen. Damit ergibt sich für jede logische Direktverbindung ein Flussvektor mit zwei mal n Komponenten, der die benötigte Bandbreite je Dienstkategorie (insgesamt n Kategorien) und je Flussrichtung beschreibt. Dabei werden die Bandbreitennachfragen für die Netzdimensionierung durch reine Busy Hour Mittelwerte beschrieben.

In welchem Umfang Dienste aggregiert und gemeinsam geführt werden können, hängt letztlich von der gewählten Strategie zur Realisierung von QoS ab (vgl. Abschnitt 3.1).⁷⁶

- Einerseits mag eine vollständige Separierung der Dienste auf eigene Ports (Kapazitäten) in solchen Fällen wünschenswert sein, bei denen die QoS-Aspekte dienste-individuell gestaltet und deren Werte nicht nur statistisch, sondern permanent eingehalten werden sollen. Derartige Anforderungen sind zum Beispiel für Premium-Businessdienste mit entsprechendem Service Level Agreement (SLA) zu erwarten.⁷⁷
- Eine hohe Aggregation führt andererseits dazu, dass große Bandbreitenwerte erreicht werden, die eine Minimierung der Portkarten und eine gute Auslastung der Einrichtungen ermöglichen. Daraus entstehen Größen- und Verbundvorteile. Eine solche Vorgehensweise erfordert die Berücksichtigung der statistischen Eigenschaften der Verkehre und zugehöriger Warteschlangenmodelle.

Im Modell wird für die Realisierung von QoS die zweitgenannte Strategie zugrunde gelegt, die unter Anwendung entsprechender Warteschlangenmodelle eine Verkehrsaggregation erlaubt.

4.4.2 Dimensionierung von Knoten und Kanten

Bei dem Kostenmodell handelt es sich um ein nachfragegetriebenes Modell, bei dem sich die Dimensionierung von Knoten und Kanten nach der Nachfrage sämtlicher Dienste richtet, die in diesem Netz realisiert werden. Zu diesem Zweck wurde in Abschnitt 3.1 die Verkehrsnachfrage bestimmt sowie in Abschnitt 4.2 die Verkehrsführung auf Basis der logischen Netzstruktur erläutert. Die auf dieser Basis ableitbaren Verkehrsmatrizen reflektieren die Werte aus der mittleren Bandbreite der nachgefragten Dienste. u.a. differenziert nach Verkehrsklassen.

Die Netzdimensionierung muss dabei von einem festen Bandbreitenwert als oberer Grenze der bereitzustellenden Kapazität ausgehen, um die Netzkapazitäten festlegen

⁷⁶ Wenn mehrere Dienstekategorien einer Verkehrsklasse zugeordnet werden, kann innerhalb dieser Verkehrsklasse auch eine Priorisierung der Pakete je Dienstklasse vorgenommen werden. Dazu sind im Kostenmodell ggf. entsprechende Differenzierungen vorzunehmen, vgl. [Garcia-10], vor allem, wenn Sprachdienste mit größerer Priorität als andere Dienstekategorien in der gleichen Verkehrsklasse integriert werden. Derartige Features sind dem Anwender nicht zugänglich und müssten erst durch Modellanpassungen implementiert werden. Ggf. können auch die Bandbreiten von mehreren Verkehrsklassen zusammengefasst und **einem Prioritätsschema** einer gemeinsamen Prioritätsstufe zugeordnet werden, z.B. best effort mit Peer-to-Peer-Verkehren.

⁷⁷ Auf der anderen Seite sind QoS-Parameterwerte für nichtkritische Dienste, vor allem bei Privatnutzern, nicht streng einzuhalten, was zur Definition von „Quality of Experience“ geführt hat. QoS- und QoE-Aspekte im Zusammenhang mit Kostenmodellen wurden in den letzten drei Jahren in der Literatur behandelt, die Ergebnisse eines Workshops zu diesem Thema wurden in einer Sondernummer des Journal of Universal Computer Science veröffentlicht, vgl. [Fielder-08].

zu können. Eine angegebene Busy Hour Nachfrage eines Netzbetreibers beschreibt aber immer nur einen statistisch ermittelten Wert, der auch überschritten wird. In Abhängigkeit der Schwankungen der Nachfrage in der Spitzenlast des Netzes kann es daher angezeigt sein, zusätzliche (Reserve-)Kapazitäten vorzuhalten, die eine Überlast vermeiden helfen sollen. Vor dem Hintergrund dieser Nachfrageschwankungen werden Netze in der Regel nicht exakt nach Maßgabe der Busy Hour Nachfrage dimensioniert, sondern es wird ein sog. Auslastungsgrad (<1) unterstellt, wobei sich die Wahl der Höhe dieses Auslastungsgrades nach dem Umfang der erwarteten Verkehrsschwankungen richtet. – Zur Berücksichtigung dieser Zusammenhänge ist im Modell ein „globaler Zuschlagsfaktor“ vorgesehen, der genau diesen Zusammenhang für die Netzdimensionierung berücksichtigt.

Ob dienstspezifische QoS-Anforderungen eingehalten werden können, hängt letztlich von charakteristischen Parameterwerten der Verkehrsnachfrage ab. Diese sind im einfachsten Fall die mittlere Paket-Ankunftsrate und die mittlere Paket-Länge und im detaillierten Fall die Varianz der Paket-Ankunftsrate und der Paket-Länge. Unter Berücksichtigung dieser statistischen Größen und der Anwendung von Modellen zur Warteschlangentheorie lassen sich die vorzusehenden Bandbreitewerte für die in den Systemen abzuwickelnden Verkehre berechnen. Daraus ergeben sich im Zusammenhang mit den QoS-Anforderungen einer Dienstklasse die tatsächlich vorzusehenden Bandbreiten auf den Übertragungssystemen. Diese liegen i.d.R. oberhalb der mittleren Bandbreite und werden auch als äquivalente Bandbreite je Dienst bezeichnet, vgl. u.a. [Tutschku-04].

Allgemein lässt sich feststellen, dass das Equipment in den Knoten andere Kostentreiber aufweist als das der Kanten. Dies legt für die Modellierung eine differenzierte QoS-Betrachtung und Netzdimensionierung nahe. So ist die Bandbreite als Kostentreiber für Kanten relevant, hingegen für Knoten die Anzahl an Paketen bzw. auch QoS-Klassen, die die Prozessorkapazität beanspruchen.

Nachfolgend werden die Möglichkeiten der Anwendung von mark-up Faktoren (Zuschlagfaktoren) zur Dimensionierung sowohl von Knoten als auch Kanten erläutert. Im Anschluss daran wird die Modellimplementierung erläutert und begründet.

Kanten

Die Basis für die Berechnung von Bandbreitenanforderungen sind die Mittelwerte aus den Verkehrswerten eines Dienstes, da diese die Mindestanforderung an die zu realisierenden Kapazitäten beschreiben. Diese Mittelwerte sind jedoch noch nicht hinreichend für die Netzdimensionierung. Die Berücksichtigung von QoS-Anforderungen, die die mittlere Verzögerung in einem Netzelement minimieren, machen Bandbreitenwerte erforderlich, die oberhalb des Mittelwertes liegen.

Diese Zuschläge auf die mittlere Bandbreite sollen im Kostenmodell ein – nach Verkehrsklassen differenzierter – Steuerungsparameter sein. Mit Hilfe dieser Zuschläge wird die mittlere Bandbreite in die sogenannte „äquivalente Bandbreite“ überführt.⁷⁸ Dabei werden die mark-up Faktoren auf Basis der zulässigen Verzögerungszeit und Paketlänge modellendogen ermittelt. Die nachfolgende Tabelle zeigt Beispiele für die Werte sowie eine Zuordnung von Diensten zu den QoS-Klassen auf der Basis einer definierten Zahl von Verkehrsklassen (k n).

Tabelle 4-4: Dienste-/Verkehrsklassen-Matrix

Verkehrsklasse k	k 1	k 2	k 3	k n
mark-up Faktor	1,25	1,2	1,15	1,1	1,05	1,0	179
Interner Verkehr aus OAM und Signalisierung ⁸⁰	x						
Premium Business Dienste							
Sprachdienste							
Konferenzdienste							
VoD-Dienste							
IPTV (STV)							
IPTV (HDTV)							
Business Data Dienste							
P2P							
Best-Effort-Dienste							

Die Zuordnung der Dienstekategorien zu den jeweiligen Verkehrsklassen wird im Kostenmodell für das Breitbandnetz flexibel, d.h. durch den Modellanwender steuerbar, gestaltet. Damit können Dienstekategorien auch weniger Verkehrsklassen als hier aufgeführt, zugewiesen werden.⁸¹

Die Werte hängen von der aggregierten Bandbreite ab. Um diese Werte bzw. ihren Funktionsverlauf genauer bestimmen zu können, kann auf entsprechende Modelle [Garcia-10] zurückgegriffen werden.⁸² Beispielhafte Werte sind in Tabelle 4-4 in der zweiten Zeile beschrieben. Bei einer entsprechenden Zuordnung kann gezeigt werden,

⁷⁸ Siehe u.a. [Rendon-09].

⁷⁹ Ein mark-up Faktor kann prinzipiell auch Werte von kleiner eins annehmen. Dies bedeutet dann, dass in der Hauptverkehrsstunde diese Verkehre gedrosselt werden und ggf. freie Kapazitäten außerhalb dieser Zeitspanne z.B. in den Nachtstunden wahrnehmen.

⁸⁰ Der Paketstrom aus dem internen Verkehr resultiert aus den Nachrichten, die im Kontrollplan abgewickelt werden, und den Nachrichten, die für das Kapazitätsmanagement, Monitoring, Alarme etc. entstehen, gemeinhin auch als „control messages“ bezeichnet.

⁸¹ Aus internen Quellen eines großen europäischen Netzbetreibers wird über die Anwendung von bis zu vier Verkehrsklassen berichtet. Ebenso viele Verkehrsklassen sind derzeit für die Modellanwendung vordefiniert. Sie müssen nicht alle genutzt werden.

⁸² Aus den bisherigen Untersuchungen ergibt sich, dass der mark-up Faktor mit steigenden Werten der aggregierten Bandbreite abnimmt und im Grenzfall gegen eins konvergiert.

dass Dienste mit zeitkritischen QoS-Parametern und limitiertem Paketverlust höhere mark-up Faktoren erfordern als „Massenkonsumdienste“.⁸³

Um sowohl die Bandbreite der Verbindungen als auch die Verkehrsmischung auf den jeweiligen Netzelementen individuell zu berücksichtigen, werden die mark-up Faktoren im Modell netzelementbezogen bestimmt. Dabei ist pro Netzebene die Verkehrsklasse anzugeben, deren jeweilige Laufzeitverzögerung am besten passt. Auf diese Weise wird den tatsächlichen Gegebenheiten mit Blick auf die Verkehrsverteilung Rechnung getragen.

Dazu kann im Modell für jede Verkehrsklasse die Aufteilung der Laufzeitverzögerungen über die in der Führung auftretenden Netzelemente angegeben werden, d.h. die maximale Laufzeitverzögerung wird auf die Zahl der Netzebenen, wie sie ebenfalls durch den Modellanwender gesteuert wird, aufgeteilt. Dies erfolgt in Form von relativen Werten, deren Summe in der Netzhierarchie vom Ebene 0 Knoten bis zum Ebene 5 Knoten eins ergeben muss. Bei dieser Aufteilung sind den Netzelementen der unteren Ebenen höhere Anteile vorzugeben, da hier auf Grund der noch relativ geringen Verkehrskonzentration die Bandbreitenwerte kleiner sind als in den Elementen des Kernnetzes.⁸⁴ Dabei wird nur ein Halbweg durch das Netz von Ebene 0 bis Ebene 5 beschrieben, die andere Hälfte ist, wenn sie denn für den On-Net Verkehr benötigt wird, symmetrisch. (Interconnection Verkehr verlässt das Netz spätestens in Ebene 5.)

Nach Bestimmung der äquivalenten Bandbreite für jede Verkehrsklasse wird die gesamte Bandbreite, die eine logische Verbindung vom physikalischen Netz anfordert, als Summe der äquivalenten Bandbreiten bestimmt.

Allerdings ist dieser Wert nochmals mit dem eingangs eingeführten „globalen Zuschlagsfaktor“ abzugleichen, der berücksichtigt, dass in paketvermittelnden Netzen die Auslastung der Einrichtungen zwischen 75-90% liegen sollte. Damit soll das Überlaufen von Wartepuffern in Routern und Switches vermieden werden und die mittleren Wartezeiten in den jeweiligen Knoten generell begrenzt werden.⁸⁵ Es soll auf diese Weise eine Obergrenze in der Auslastung implementiert werden.

Bei der Festlegung der vorzusehenden Kapazitäten wird im Modell je Netzelement endogen entschieden, ob die Dimensionierung nach Maßgabe der Verkehrsklassen bezogenen mark-up Faktoren oder des globalen Zuschlagsfaktors für die Netzdimensionierung Anwendung findet.

⁸³ Argumente für die Anwendbarkeit von M/M/1-Modellen werden in der Auswertung der Stellungnahmen zum Referenzdokument Breitbandnetz, Kommentaraufforderung 4-12, aufgeführt [WIK-10a.]

⁸⁴ Die Laufzeitverzögerung τ in einem Netzelement berechnet sich im einfachsten Fall aus der Länge des Paketes L , der Bandbreite des Netzelementes v_s und dem Auslastungsgrad ρ durch $\tau = L \cdot 8 / (v_s \cdot (1 - \rho))$. D.h. bei gleichem Auslastungsgrad, z.B. $\rho = 0.7$ gilt, je grösser die Bandbreite von v_s ist, umso geringer wird die Laufzeit.

⁸⁵ Für das Kostenmodell Breitbandnetz schlagen wir einen Steuerungsfaktor (>1 , z.B. 1,1) vor.

Einen Einfluss auf die Wahl des konkreten Parameterwertes hat letztlich auch die für das Netz zu Grunde gelegte Architektur. Wird zum Beispiel eine Softswitch-Architektur gewählt, die u.a. für vermittelte Dienste durch eine entsprechende Kontrollplattform die Anzahl der Verbindungen kontrolliert, kann eine Qualitätseinhaltung auch bei höherer Auslastung realisiert werden, da anstelle eines Überlaufs eine Blockierung erfolgen kann. Die Verbindung wird abgelehnt („Besetzt“). D. h., den NGN-Architekturen liegt ein kombiniertes Warte-Verlustsystem zu Grunde, und zwar ein Verlustsystem auf der Verbindungsebene und ein Wartesystem auf der Paketebene. Diese steht im Gegensatz zum Best-Effort-Internet, das das „Einloggen“ von Nutzern nicht limitiert und den Verkehrsfluss und die Kapazitätszuteilung in dezentralisierter Weise durch das bei den Nutzern implementierte TCP steuert⁸⁶ und im Falle von Überlastung auf der Paketebene ausgewählte Pakete eliminiert. – Für die Modellanwendung ist jedoch zu betonen, dass diese Zusammenhänge durch die Parametrisierung gesteuert werden. Es ist im Modell kein funktionaler Zusammenhang zwischen der Kontrolleinrichtung und der Netzdimensionierung implementiert. Vielmehr muss der Modellanwender darüber entscheiden, was für einen globalen Auslastungsgrad er bei gegebener Wahl der Einrichtungen der Kontrollschicht vorsehen möchte. Die Netzdimensionierung erfolgt dabei immer nach Maßgabe der Busy Hour Verkehrsnachfrage unter Berücksichtigung des globalen Auslastungsgrades bzw. der dienstspezifischen mark-up Faktoren.

Knoten

Für eine Dimensionierung der Knoten wäre – dem Kostentreiber folgend – die Berücksichtigung der Paketzahl zu Grunde zu legen, wobei auch hier eine Berücksichtigung der verschiedenen QoS-Klassen von Bedeutung ist, vgl. [Rendon-09]. Die Berechnung erfolgt dann auf der Basis der Bandbreite und der mittleren Paketlänge. Die mittlere Paketlänge je Dienstekategorie ist ein Eingabeparameter und ist auf der Basis der Schicht 2 des OSI-Modells anzugeben. Der totale Paketstrom für jede Dienstekategorie ergibt sich dann aus dem mittleren Paketstrom für eine einzelne Verbindung multipliziert mit dem totalen Verkehrswert, d.h. mit allen Verbindungen zur Busy Hour.

Auch bei der Routerdimensionierung ist zu beachten, dass entsprechende Prozessoren nicht unter Volllast betrieben werden dürfen und ihre Dimensionierung ebenfalls abhängig von den QoS Werten sind, und hier vor allem von der mittleren Warte- und Bearbeitungszeit sowie dem mittlerem Paketverlust.

Die Modellimplementierung sieht eine explizite Berücksichtigung der Zuschlagsfaktoren (global als auch QoS bezogen) auf die Verbindungen zwischen zwei Einrichtungen

⁸⁶ Dies ist derzeit nur begrenzt richtig, da zahlreiche Internet-Anwendungen nicht mehr das TCP- sondern das UDP-Protokoll in der Schicht 4 des OSI-Modells verwenden. Aus diesem Grunde haben die Router-Hersteller zusätzliche Mechanismen am Netzeingang (LER) implementiert die eine Steuerung der Paketströme vorsehen und u.a. durch „Random Early Detection“ RED und weighted RED eingehende IP-Pakete zufällig löschen.

(Kanten) vor. Aufgrund des Zusammenhangs der zu dimensionierenden Kanten und zugehörigen Ports und deren Schnittstellenkarten in den Ethernet-Einrichtungen und Routern wird dabei eine entsprechende Dimensionierung der Knoten implizit mit berücksichtigt. Letztlich sind die Routing- bzw. Switching-Einrichtungen so ausgelegt, dass die Prozessoren die über die Schnittstellenkarten zuführenden Verkehrsmengen bewältigen können und keinen Engpass darstellen. Da die Kanten entsprechend den mark-up Faktoren dimensioniert werden (wie gerade geschildert) resultiert daraus die um den mark up erhöhte Nachfrage an den Ports der Einrichtungen. Vor diesem Hintergrund wird daher auf spezifische mark-up Faktoren für die Knoten des logischen Netzes verzichtet.

5 Physikalisches Netz und seine Beziehungen zum logischen Netz

Aufgabe der physikalischen Netzschicht ist es, die aus der logischen Schicht resultierenden Leitungsnachfragen zwischen den Standorten physikalisch zu realisieren (zu der Abgrenzung von logischer und physikalischer Schicht siehe auch Abschnitt 2). Sie stellt transparente Übertragungswege mit fester Kapazität bereit, auch über mehrere Netzknoten der physikalischen Schicht hinweg, und entkoppelt dadurch die Sicht auf die konkrete physikalische Führung und Implementierung des Verbindungsnetzwerkes von den Verbindungserfordernissen der darüber liegenden logischen (konzentrierenden und vermittelnden) Systeme. Dazu stellt die physikalische Schicht folgende Funktionen durch entsprechende Einrichtungen bereit, vgl. Abbildung 5-1.

Zu unterscheiden sind die nachfolgend beschriebenen Funktionen des physikalischen Transports mittels:

- Zusammenfassung (Multiplexen) und Auflösung (Demultiplexen) von Leitungsnachfragen zu entsprechenden Leitungsgruppen mit höherer Bandbreite
- Lenkung von Leitungsnachfragen und Leitungsgruppen an Standorten zu ihrer Verteilung in verschiedene Richtungen mittels sogenannter Cross-Connector Einrichtungen⁸⁷
- Signalwandlung, typischerweise von digitalen elektrischen Signalen in optische und umgekehrt
- Anpassung der Signale der resultierenden Leitungsgruppen an die Charakteristiken des Übertragungsmediums mittels entsprechender Übertragungssysteme, die einen Übertragungsabschnitt beschreiben
- Regenerierung der Signale auf den Übertragungsabschnitten, wodurch der Übertragungsabschnitt in Regenerierungsabschnitte unterteilt wird

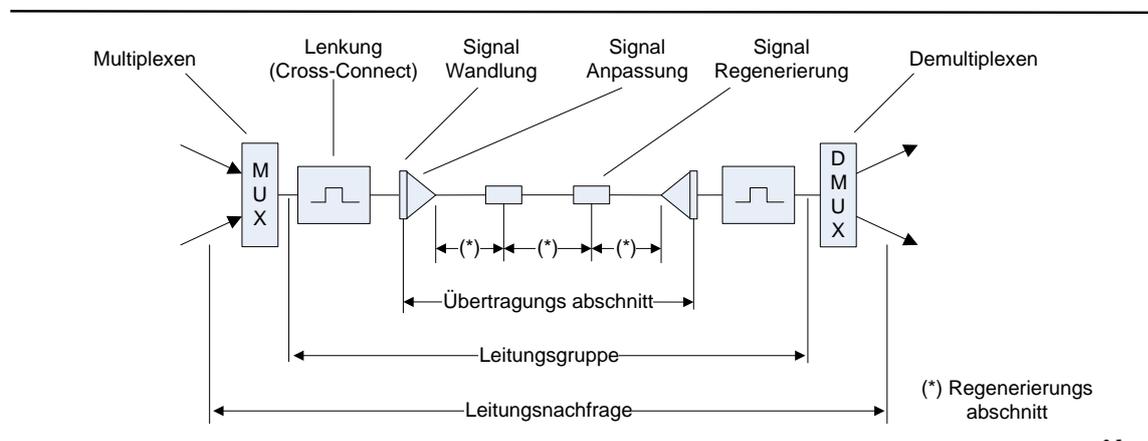
⁸⁷ Im Prinzip ist eine Cross-Connector-Einrichtung ein Switch auf elektrischer bzw. optischer Basis. Im Unterschied zur klassischen Vermittlungsstelle bzw. einem Ethernetswitch oder einem IP Router werden die Einstellungen in den Cross-Connector-Einrichtungen durch den Betreiber mittels seines Netzverwaltungsplanes in der Regel für längere Zeiträume vorgenommen, während die Vermittlung von Leitungen, Ethernet Rahmen oder IP Paketen fallweise individuell und in Echtzeit verläuft und entsprechende Verbindungen durch Netzsignalisierung vorgenommen werden. Die Definition der Pfade durch ein Layer 1 Transportnetz gleicht in etwa der Vordefinition der Pfade eines Label Switched Path im MPLS, sodass sogar verwandte Protokolle (GMPLS) Verwendung finden können.

Darüber hinaus sind Funktionen der Bereitstellung, Überwachung und Sicherung der Transportkapazitäten⁸⁸ mittels

- Bereitstellung durch Steuerung der Crossconnector-Einrichtungen
- Überwachung durch Monitoring der Signale auf allen Ebenen (Leitungsnachfragen, Leitungsgruppen, Leitungsabschnitte und Regenerierungsabschnitte)
- Sicherung durch Ersatzschaltung von gestörten Transportkapazitäten

zu unterscheiden.

Abbildung 5-1: Grundsätzliche Funktionen der physikalischen Transportschicht und ihrer zugehörigen Netzelemente



Die Leistungsmerkmale der Einrichtungen der physikalischen Netzschicht haben seit der Digitalisierung in den 80er Jahren und der Übertragung von optischen Signalen auf Glasfasern eine sehr dynamische Entwicklung genommen, die für die enormen Bandbreitenbedarfe von Internet- und Videodiensten genutzt werden und ohne die diese Mengen nicht ökonomisch und effizient transportiert werden könnten. In diesem Kapitel werden die von den Betreibern derzeit genutzten Übertragungssysteme auf elektrisch- und optischer Basis und deren Entwicklung hin zu rein optischen Systemen beschrieben.

⁸⁸ In derzeitigen Netzen werden diese Funktionen durch zentrale Einrichtungen vorgenommen, in denen die von den Einrichtungen des physikalischen Transports generierten Kontrollsignale zusammengefasst und ausgewertet werden.

Die Entwicklung der Übertragungssysteme lässt sich seit der Einführung des SDH in drei große Blöcke einteilen, die in Tabelle 5-1 zusammenfassend dargestellt sind und in den entsprechenden Abschnitten dieses Kapitels detaillierter betrachtet werden.

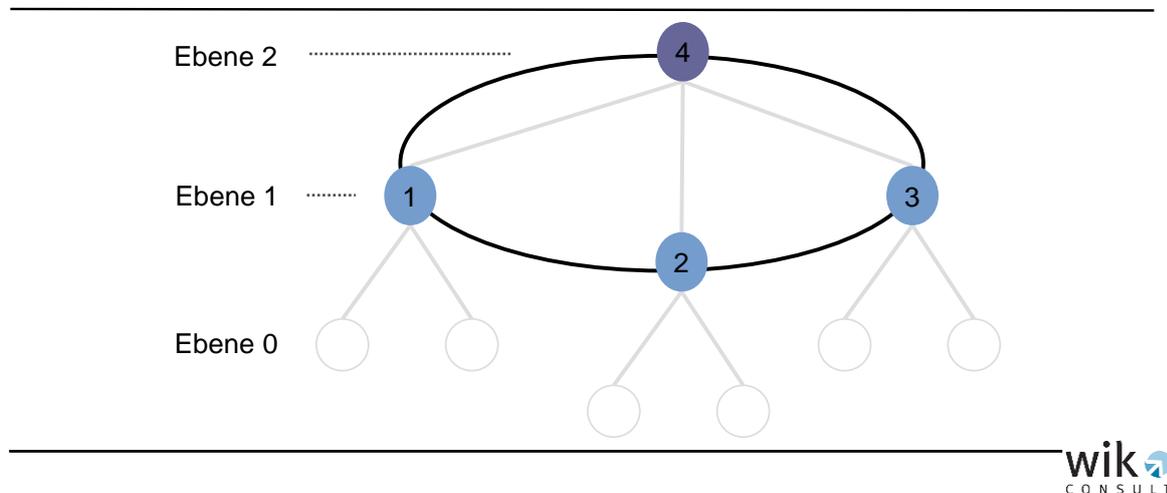
Tabelle 5-1: Entwicklung der Übertragungssysteme

Name	Multiplexen (Mx)	Crossconnecten (CC)	Signalwandlung- und Anpassung	Signal-Regenerierung
SDH/SONET über WDM (Abschnitt 5.1.1)	elektr.	Elektrisch	elektr.-optisch	Optisch-elektrisch-optisch
NG.SDH über OTN (Abschnitt 5.1.2)	elektr.	elektr./optisch	elektr.-optisch	optisch
GFP über OTN (Abschnitt 5.1.4)	elektr.	elektr./optisch	elektr.-optisch	optisch
Optisches Wellenlängen multiplexen über DWDM (Abschnitt 5.1.5)	opt.	opt.	opt.	opt.

Durch das Multiplexen von Leitungsnachfragen zu Leitungsgruppen und ggf. deren weitere Zusammenfassung vor allem auf der optischen Ebene mittels WDM bzw. DWDM wird eine hohe Konzentration von Leitungsnachfragen auf den zugehörigen Leitungsabschnitten erreicht. Daraus folgt, dass die Topologie des physikalischen Netzes von der Struktur der logischen Netzschicht verschieden und vor allem im Kernnetz wesentlich schwächer vermascht sein kann. Auf diese Weise können hohe Einsparungen erzielt werden. Der Ausdünnung des Netzes sind aber aus Gründen der Netzverfügbarkeit und der Bereitstellung von Ersatzkapazitäten bei Störungen Grenzen gesetzt, und die Topologie der physikalischen Netzschicht muss zwischen den Standorten mindestens zwei unabhängige Wege bereitstellen, was wenigstens eine Ringtopologie impliziert.

Die Leitungsnachfragen, die die Struktur der logischen Netzschicht bestimmen, werden auf die Topologie der physikalischen Netzschicht abgebildet. Abbildung 5-2 zeigt als Beispiel die Realisierung der Sternstruktur zwischen Ebene 1 und 2 aus dem logischen Konzentrationsnetz auf eine Ringtopologie.

Abbildung 5-2: Abbildung einer Sternstruktur aus der logischen Netzschicht auf eine Ringtopologie in der physikalischen Netzschicht



Man beachte, dass in traditionellen Netzen (im Gegensatz zum NGN) die logische Schicht für jede Dienstekategorie separat implementiert wird, aber die physikalische Schicht die Bandbreitenanforderungen der einzelnen logischen (Dienste-)Schichten bereits schon unter der SDH/SONET-Architektur integriert. D.h., aus den traditionellen Netzen liegt schon eine integrierte physikalische Infrastruktur vor, in die ggf. die Bandbreitenanforderungen verschiedener Netze integriert werden konnten. Allerdings zeichnet sich schon jetzt ab, dass durch steigende Verkehrsnachfragen vor allem aus Internet- und Multimediadiensten die Kapazitäten einer SDH/SONET-Infrastruktur nicht in jedem Fall ausreichen und entsprechend leistungsfähigere Technologien vorzusehen sind, was in diesem Kapitel im Unterabschnitt 5.1.1 allgemein und im Unterabschnitt 5.1.5 ausführlich behandelt wird. Die Zunahme von Verkehrsnachfragen aus Paketiendiensten, die aus der OSI-Schicht zwei dem physikalischen Transportnetz in Form von Ethernet-Rahmen übergeben werden, erfordert ebenfalls eine Anpassung im bisherigen SDH, die durch das sogenannte Next Generation SDH erfolgt und im Unterabschnitt 5.1.4 betrachtet wird.

Wie oben dargestellt, hat die Entwicklung der Dienstenachfragen vor allem aus Internet- und Multimediadiensten zu einer Weiterentwicklung des Transportnetzes geführt, die in diesem Kapitel ausgehend vom physikalischen Netz und dessen Beziehungen zum logischen Netz betrachtet wird. Dazu wird im ersten Abschnitt (5.1) dieses Kapitels die Entwicklung des physikalischen Netzes in Korrelation mit der Entwicklung des logischen Netzes betrachtet und im zweiten Abschnitt (5.2) werden die Konsequenzen für das Kostenmodell Breitbandnetz dargestellt. Im dritten Abschnitt (5.3) werden die Netztopologien für das physikalische Netz in jeder Hierarchie untersucht und deren Implementierung im Modell betrachtet.

5.1 Stand der Entwicklung der Systeme für das physikalische Netz

Dieser Abschnitt beschreibt die Entwicklung des Transportnetzes aus Sicht der physikalischen Schicht in Beziehung zu den Entwicklungen in der logischen Schicht. Der erste Unterabschnitt stellt die Eigenschaften des traditionellen SDH/SONET zusammenfassend dar, deren Grenzen, aber auch deren Einfluss auf die Entwicklung zukünftiger Netze.

Der zweite Unterabschnitt beschreibt die Weiterentwicklung des SDH/SONET sowohl aus der Sicht der logischen Ebene als auch aus der Sicht steigender Bandbreitenanforderungen und deren Integration in der optischen Ebene vom SDH/SONET.

Der dritte Unterabschnitt beschreibt die Entwicklung des Next Generation SDH/SONET (NG SDH), die durch die zunehmenden Anforderungen nach paketorientiertem Transport auf Ethernet erforderlich wurde.

Unterabschnitt 4 beschreibt die Nutzung mehrerer unterschiedlicher Wellenlängen innerhalb einer Glasfaser zum parallelen Übertragen mehrerer breitbandiger Kommunikationskanäle. Die Systeme für das Wellenlängen Multiplex Verfahren erlauben gleichfalls den Aufbau von Ringstrukturen und Vermaschungen, wie sie im Transportnetz auf Layer 1 üblich sind. Man unterscheidet zwischen C- und DWDM (Coarse und Dense Wave Division Multiplex).

Der fünfte Unterabschnitt beschreibt die Ergänzung bzw. Substitution des SDH/SONET-Konzeptes in Form eines standardisierten optischen Transportnetzes (OTN), bei dem DWDM und das Multiplexen (hier auch Grooming genannt) der SDH-Welt miteinander kombiniert werden.

Im sechsten Unterabschnitt beschreiben wir Konzepte, in denen die physikalische und die logische Schicht nicht mehr klar getrennt, sondern integriert werden. Dies findet im Konzentrationsnetz auf der Basis von Ethernet over Fibre und im Kernnetz auf der Basis von IP over Fibre statt. Eine eigenständige physikalische Transportschicht durch entsprechende Einrichtungen aus SDH/SONET bzw. OTN wird eliminiert. Es ist nur noch eine Glasfaserinfrastruktur neben den logischen Systemen erforderlich.⁸⁹

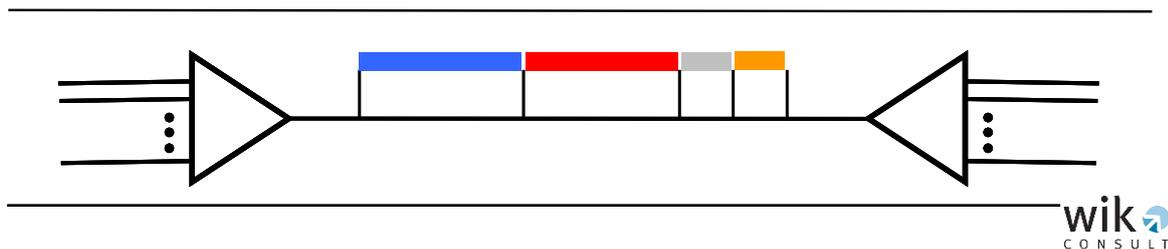
⁸⁹ Die schnellen Mechanismen zur automatischen Ersatzschaltung von Verbindungen bei Ausfall von Teilstrecken des physikalischen Netzes werden nun durch jüngst standardisierte Verfahren in der MPLS-Schicht der logischen Systeme (MPLS-TP) übernommen, die in gleicher Qualität binnen weniger Millisekunden (< 50ms) Ersatzwege zu schalten in der Lage sind und nicht mehr auf die vergleichsweise langsamen Verfahren der Routing Ebene der Layer 2 und 3 Systeme angewiesen sind. (Diese kann bei Bedarf wiederum durch eine DWDM Funktion ergänzt werden, die unmittelbar in die Schnittstellenkarten der Router integriert ist. Eine derartige Hochintegration über Verschmelzung eigentlich getrennter Systeme wird im Modell nicht nachgebildet, da sie sehr proprietär ist und (noch) keine Relevanz hat.

Einen Überblick über die im Modell verwendeten Technologien und ihre Kombination mit Systemen aus Layer 2 bzw. 3 gibt Anhang 1.

5.1.1 SDH/SONET

Glasfaserkabel auf der Basis von Monomode-Fasern sind das wichtigste Medium in Weitverkehrsnetzen. Alle großen Netzbetreiber beschalten sie traditionell mit Übertragungssystemen aus dem SDH/SONET-Standard⁹⁰. Dieser Standard erlaubt es, die unterschiedlichen Bandbreitenanforderungen (Leitungsnachfragen) aus den verschiedenen logischen Netzen (bisher z.B.: PSTN/ISDN, IP, ATM) auf eine Glasfaser bzw. ein Glasfaserpaar zu integrieren. Dazu werden die aus den logischen Netzen resultierenden Digitalisignale unterschiedlich großer fester Kapazität, E1, E3, E4, ..., in Form von virtuellen Containern (VC-n, n=1,3,4) zusammengefasst und in einem Rahmen eingeschlossen. – Die nachfolgende Abbildung illustriert diesen Zusammenhang, der auch als Zeitmultiplex bezeichnet wird.

Abbildung 5-3: Zeitmultiplex – allgemeine Darstellung



Der entsprechende ITU-Standard hat dazu eine Serie von Rahmen in Form von synchronen Transportmodulen (STM) definiert und bei gleicher synchroner Rahmenwiederholung (125µs) die entsprechenden Rahmen vergrößert, vgl. [ITU-07]. Derzeit gibt es die Rahmen STM-n (n=1, 4, 16, 64, 256). Die entsprechenden Signale aus den logischen Netzen werden durch Verkettung, im englischsprachigen Standard als concatenation bezeichnet, von VC4-nc (n=1, 4, 14, 64, 256) in den entsprechenden STM-n-Rahmen eingefügt; Tabelle 5-2 zeigt die verschiedenen Container und deren Verkettung.

⁹⁰ SONET ist der ANSI-Standard, der in den USA angewendet wird, während SDH der entsprechende ITU-T Standard ist, der in Europa zur Anwendung kommt. Durch SDH/SONET wird die Integration sowohl der europäischen Digitalisignale (E1,E3,E4) als auch der amerikanischen Signale (DS1,DS2,DS3) in einem einheitlichem Standard erreicht, vgl. [Wilde-99].

Tabelle 5-2: Virtuelle Container und ihre Verkettung im SDH

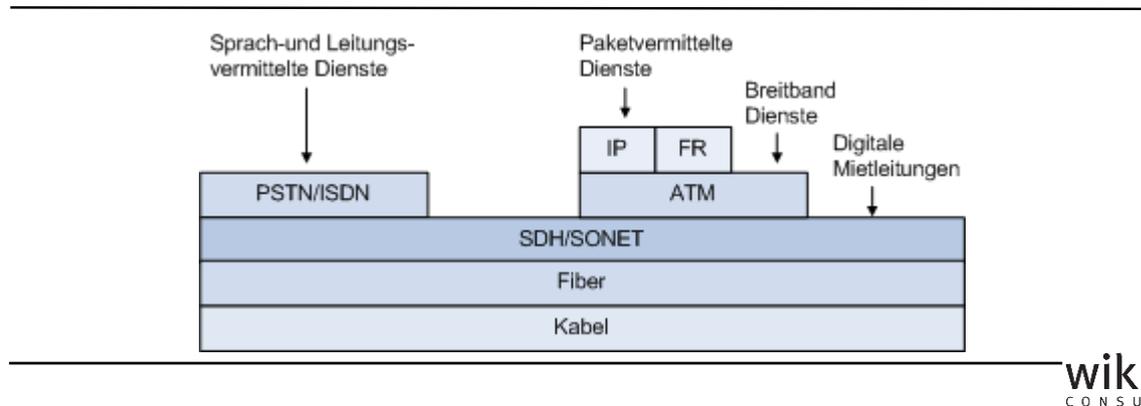
VC-Type	VC BW [Mbps]	VC Nutzlast [Mbps]	STM-n Typ
VC-4	150,336	149,760	STM-1
VC-4-4c	601,344	599,04	STM-4
VC-4-16c	2405,376	2396,160	STM-16
VC-4-64c	96221,504	9584,640	STM-64
VC-4-256c	38486,016	38338,560	STM-256

So können unterschiedliche Signale in Containern passender Größe als Festverbindungen fester Kapazität parallel nebeneinander (technisch streng genommen zeitlich hintereinander verschachtelt, daher Zeitmultiplex genannt) über eine Glasfaser transportiert werden.

Auf der Basis des SDH/SONET-Standards wurden entsprechende Multiplexer-, Cross-connector- und Übertragungssysteme entwickelt, die das Verzweigen derartiger Verbindungen und das individuelle Routen einzelner Teil-Verbindungen aus dem Gesamtbündel ermöglichen. Eine wesentliche ergänzende Eigenschaft von SDH/SONET ist die begleitende permanente Überwachung der Übertragung, die Signalisierung im Fehlerfall und das automatische und sehr schnelle Ersatzschalten einzelner Verbindungen bei Bedarf, sofern diese entsprechend qualifiziert sind. Die Ersatzschaltungen erfolgen typischerweise im Bereich weniger Millisekunden (< 50 ms) (s.u. Verfügbarkeitsaspekte).

Die Bandbreitenanforderungen aus paketvermittelnden Datennetzen sowie dem best effort Internet wurden von den meisten großen europäischen Netzbetreibern in der Vergangenheit in einem Breitbandnetz auf ATM-Technologie zusammengefasst und die daraus resultierenden asynchronen ATM-Zellflüsse in den synchronen STM-1-Rahmen über den VC-4-Container eingepasst, vgl. [Wilde-99]. Hinzu kommt eine Nachfrage von digitalen Mietleitungen von Großkunden oder alternativen Netzbetreibern, die in das SDH/SONET integriert werden müssen. D.h., das physikalische Netz auf der Basis des SDH/SONET-Standards stellte damit eine integrierte physikalische Transportplattform für alle (noch) separierten logischen Netze bereit. Abbildung 5-4 gibt diesen Sachverhalt schematisch wider. In der Zukunft soll die IP-Schicht alle Dienstenachfragen integrieren und auf die Netze mit reduzierter Schichtung und Vielfalt abbilden. Reduktion der Komplexität und das Erzielen von Skaleneffekten und weiterer Produktivitätsvorteile lassen Effizienzgewinne erwarten.

Abbildung 5-4: Traditionelles Schichtenmodell eines nationalen Netzbetreibers



Zuverlässigkeitsaspekte

Die STM-n-Rahmenstruktur enthält umfangreiche Felder für Funktionen des Netzbetriebs und seiner Überwachung (kurz auch OAM-Funktionen für Operations, Administration and Management), auf deren Basis die großen Netzbetreiber entsprechende Netzverwaltungssysteme aufgebaut haben, um Alarme, die durch Störungen in den Einrichtungen der SDH/SONET-Architektur verursacht werden, einzugrenzen, bzw. um entsprechende Maßnahmen zu ergreifen, die für gestörte Leitungsnachfragen entsprechend ihrer Bedeutung Ersatzschaltungen vorsehen (normalerweise auf der Basis der korrespondierenden VC).⁹¹ In Zusammenhang mit Verkehrslenkungsmechanismen in den dienstspezifischen Netzen und der paritätischen Mehrwegeführung der Leitungsgruppen ergeben sich sehr hohe Verfügbarkeitswerte, die in der Größenordnung von 99,999% liegen.

Da das Netzverwaltungssystem die Ersatzschaltungen im SDH/SONET innerhalb von weniger als 50 Millisekunden vornimmt, können die meisten Dienste auch im Störfall quasi unterbrechungsfrei aufrecht erhalten werden. Das bedeutet, dass Störungen der Einrichtungen im physikalischen Netz vom logischen Netz nicht wahrgenommen werden.⁹² Daraus folgt eine strikte Trennung der Netzverfügbarkeit im logischen und physi-

⁹¹ Eine Störung in einem optischen Übertragungssystem von 10G (STM-64) verursacht neben dem korrespondierenden Alarm, der die Störung des Systems anzeigt, eine Vielzahl von Alarmen für alle Bandbreitennachfragen aus den logischen Netzen, die dieses System nutzen und z.B. in Form von VC in den STM-64-Rahmen verkettet sind. Die entsprechenden Ersatzschaltungen können dann individuell auf der Basis jeder betroffenen Bandbreitennachfrage in Form von Leitungsgruppen erfolgen und zwar netzweit. Frühere Untersuchungen im SDH-Transportteil des PSTN/ISDN ergaben, dass bei Annahme der Störung eines Kabelabschnittes zu einem Zeitpunkt und unter paritätischer Mehrwegeführung der PSTN/ISDN Leitungsgruppen eine 5-10%ige Überdimensionierung in allen Systemen ausreichend ist, um Leitungsgruppen auf dem gestörten Kabelabschnitt ersatzzuschalten, vgl. [Hackbarth-92].

⁹² Auch die logischen Systeme (Ethernet Switches, IP-Router) erlauben die Ersatzschaltung von Verbindungen, benötigen für die Bestimmung alternativer Wege bei den herkömmlichen Verfahren (Spanning Tree, IGP o.ä.) aber relative hohe Zeiten im Bereich weniger Sekunden, die der Anwender in je-

kalischen Netzteil, was zwar nicht unbedingt zu kostenoptimalen Lösungen führt, aber zu sehr hohen Verfügbarkeitswerten, die vor allem bei traditionellen Nachrichtennetzen auf Basis der Leitungsvermittlung, aber auch bei ATM erreicht wurden. Diese hohen Standards setzen „Benchmarks“, die ggf. auch von zukünftigen Transportnetzen auf der Basis von IP-Paketen bzw. Ethernetrahmen – zumindest für die traditionellen, aber auch für entsprechende neue Dienste – eingehalten werden sollten. Diese Anforderungen an die Netzverfügbarkeit, wie sie im SDH erfüllt werden, wurden auch im Rahmen der Konsultation von den Marktteilnehmern weitestgehend bestätigt.

5.1.2 Next Generation-SDH (NG-SDH)

Auf Grund der verschiedenen Bandbreiten im ITU-SDH/SONET und dem IEEE-Ethernet-Standard ergibt sich aus der Benutzung des SDH/SONET-Transportnetzes eine schlechte Kapazitätsausnutzung der virtuellen Container. Um den Transport von Ethernet-Rahmen und anderer Datenformate aus Business-Datendiensten in einer SDH-Transportplattform zu verbessern, wurde von der ITU eine Erweiterung des SDH zum sog. Next Generation SDH definiert und zugehörige Protokolle standardisiert, die in Tabelle 5-3 zusammengefasst dargestellt sind. Für eine ausführliche Übersicht vgl. [Caballero-04].

Tabelle 5-3: Zusammenfassende Darstellung der Protokolle des NGN-SDH

Protokollname	Abkürzung	Zugehöriger ITU Standard	Kurzbeschreibung
Generic Frame Procedure	GFP	G.7041	Fügt beliebige Data Link Rahmen (u.a. Ethernet) in einen generischen Rahmen
Virtual Concatenation	VCAT	G.707	Teilt die aus dem GFP kommenden Rahmen optimal über verschiedene Virtuelle Container aus dem SDH/SONET auf
Link capacity adjustment scheme	LCAS	G.7042	Erlaubt eine dynamische Zuweisung von Kapazitäten aus dem VC des SDH/SONET

Der Vorteil von NG-SDH wird vor allem durch die Aufteilung der Rahmen über verschiedene virtuelle Container (VC) des SDH/SONET erreicht, was als „virtual concatenation“ bezeichnet wird und in den Kurzbezeichnungen für die „Virtuellen Container VC“ aus dem SDH mit (vc) abgekürzt wird, vgl. Tabelle 5-4. Damit wird eine Erweiterung des traditionellen SDH/SONET erreicht, welches nun eine kontinuierliche Verkettung, auf Englisch „contiguous concatenation (cc)“, gestattet. Tabelle 5-4 zeigt die Verbesserung

dem Fall bemerken wird. Mit der schnellen Ersatzschaltung im Layer 1 werden die übergeordneten, Nutzer beeinträchtigenden Verfahren aus Layer 2 und 3 nur für großräumige Fehler (z.B. Standortausfälle) verwendet.

in der Kapazitätsausnutzung von NG-SDH gegenüber dem traditionellen SDH/SONET bei Volllastung der Ethernet-Verbindungen.⁹³

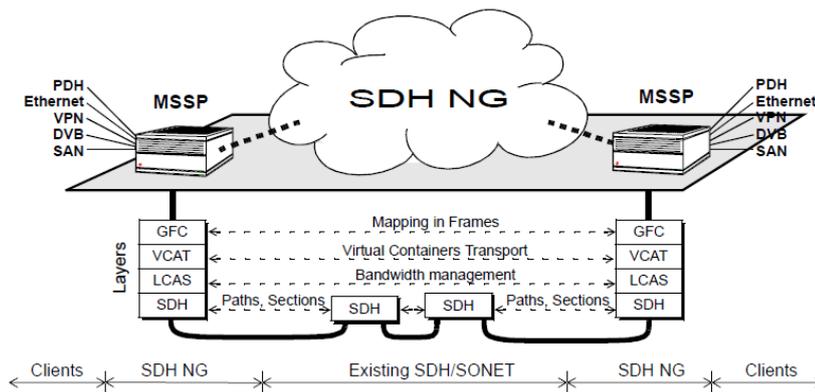
Tabelle 5-4: Vergleich der Kapazitätsausnutzung zwischen NG-SDH (vc) und SDH/SONET (cc)

Transport Dienst	Bitrate [Mbps]	VC unter cc (SDH)	Ausnutzung [%]	VC unter vc (NG-SDH)	Ausnutzung [%]
Ethernet	10	VC3	20	VC11-7vc	89
Fast Ethernet	100	VC-4	67	VC3-2vc	99
Gigabit Ethernet	1000	VC4-16c	42	VC4-12vc	90

Optional besteht im NG-SDH die Möglichkeit, Kapazitäten mittels des Link Capacity Adjustment Scheme (LCAS) dynamisch zu verändern (zuzuweisen bzw. freizuschalten), womit Datendienste mit variabler Bandbreite optimal in das NG-SDH eingefügt werden können (vgl. Abbildung 5-5).

Der große Vorteil von NG SDH liegt darin, dass entsprechende Einrichtungen,⁹⁴ welche die zugehörigen Protokolle implementieren, auf die traditionelle SDH/SONET-Transportplattform aufgesetzt werden können und damit die installierten SDH/SONET-Kapazitäten uneingeschränkt (weiter) verwendet werden können, vgl. Abbildung 5-5.

Abbildung 5-5: Protokolle des NG-SDH und deren Realisierung in Form von Multi-Service Switch Plattform (MSSP)-Einrichtungen



Quelle: [Caballero-04]

⁹³ Ursächlich ist, dass ursprünglich ein 10 Mbit/s Ethernet Signal einen 34 Mbit/s VC3 Container suboptimal auslastet, gleichfalls ein 100 Mbit/s Ethernet Signal einen 144 Mbit/s VC4 Container.

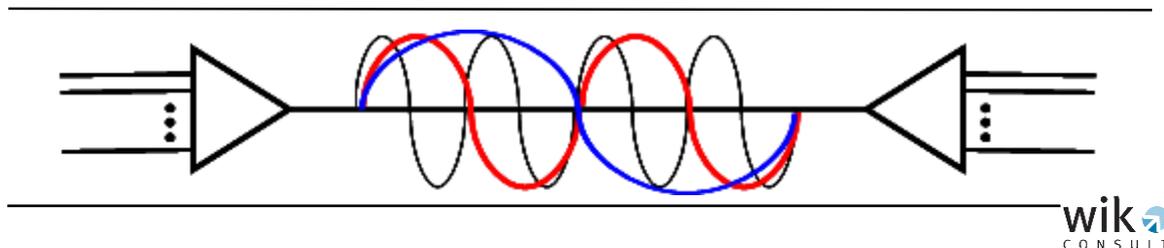
⁹⁴ Diese Einrichtungen werden in der Literatur als MultiService Switch Plattform (MSSP) oder aber auch als MultiService Provision Plattform (MSPP) bezeichnet, vgl. [Caballero-04].

Das vorliegende Kostenmodell berücksichtigt in seiner implementierten Technik ausschließlich NG-SDH als die state-of-the-art effiziente Technologie. Herkömmliche SDH-Netze mit ihrer ineffizienteren Kapazitätsausnutzung werden für ein NGN nicht mehr verwendet.

5.1.3 Wellenlängen Multiplex

Mit steigender Verkehrsnachfrage – vor allem aus dem best effort Internet – stoßen die Kapazitäten der SDH/SONET-basierten physikalischen Transportplattform und die entsprechende nur einfarbig beschaltete Glasfaser-Infrastruktur an ihre Grenzen. In einem ersten Schritt wurden mittels optischer Multiplexer (WDM/DWDM) die Kapazitäten vergrößert. Dabei werden analog zum weithin benutzten Frequenzmultiplex⁹⁵ anstelle eines breitbandigen („weißen“ oder „grauen“) Lichtsignals viele schmalbandige (farbige) Lichtsignale verwendet und über dieselbe Glasfaser übertragen. Typisch sind heute die DWDM (Dense Wave Division Multiplex) und die CWDM (Coarse WDM) Technik, wobei die erstere bis zu 160 Farben unterstützt und jede Farbe bis zu 100 Gbit/s übertragen kann, während die zweite deutlich preiswerter ist und nur ein grobes Frequenzraster mit breiteren Frequenzbändern für 18 Farben bis zu 10 Gbit/s je Farbe anbietet. Die zweite Lösung wurde insbesondere für die Fälle entwickelt, bei denen DWDM zu teuer ist, z.B. im Metro-Bereich.

Abbildung 5-6: Optisches Multiplexen (Frequenzmultiplex)



WDM Systeme können, analog zu den SDH-System- Funktionen nicht nur als Terminal-Multiplexer arbeiten, wie in Abbildung 5-6 dargestellt, sondern gleichfalls als rekonfigurierbare ADM oder Cross Connectoren, die den Verkehr (hier Farben) aus einer durchgehenden Verbindung aus- oder einleiten bzw. mehrere Verbindungen beliebig miteinander verbinden. Durch die den optischen Kanälen beigefügten Managementinformationen erlauben WDM-Systeme zudem die automatische Ersatzschaltung von Fasern in wenigen Millisekunden, sofern eine Faser oder ein Kabel unterbrochen wurde und noch genügend Farben in anderer Richtung zum Ziel verfügbar sind, z.B. in Ring-Topologien.

⁹⁵ z.B. viele parallel genutzte Frequenzen zur Funkübertragung

Systeme mit diesem Leistungsumfang sind im Modell unterstellt und als Technologie auswählbar, z.B. anstelle NG-SDH.

Im Grundsatz ist die Entscheidung zum Einsatz von WDM Systemen auch ökonomisch bedingt und liegt insbesondere immer dann nahe, wenn Faserknappheit besteht, oder wenn große Distanzen zu überbrücken sind, weil dann ggf. separate Repeater für die einzelnen Fasern paralleler SDH-Verbindungen eingespart werden können. Grundsätzlich kann aber bei einer wie hier für die Modellierung unterstellten Greenfield Annahme davon ausgegangen werden, dass die Fasern bedarfsorientiert ausgelegt sind, so dass eine Knappheit nicht besteht.

Der Problematik der Faserknappheit liegt der Sachverhalt zugrunde, dass die Kosten für zusätzliche Fasern in einem Glasfaserkabel im Vergleich mit den Kosten für Wellenlängenmultiplexer verhältnismäßig gering sind. Teuer sind hingegen die Baukosten für das Eingraben. Sofern also bei Faserknappheit neu gegraben werden muss, bietet sich WDM als Alternative, sofern die Kabel in Leerrohren verlegt sind, relativiert sich das Problem bereits, weil vergleichsweise preiswert neue Kabel eingezogen werden können. Ohne Faserknappheit reduziert sich der Vorteil von WDM im Wesentlichen auf die Ersatzschaltmöglichkeiten, die die klassischen Ethernet und IP-Systeme in dieser Qualität bisher nicht geboten haben.

5.1.4 Optisches Transportnetz (OTN)

Die weiterhin zunehmenden Bandbreiten-Anforderungen haben neben der Entwicklung von WDM auch zu weitergehenden Entwicklungen geführt, die optische Ebene zu erweitern und ggf. kapazitätserweiternde optische Transportdienste schnell zur Verfügung zu stellen. Im Rahmen der Standardisierung entsprechender Übertragungssysteme wurden von der ITU entsprechende Empfehlungen⁹⁶ entwickelt und das Optische Transportnetz (OTN) definiert. OTN ist im Grundsatz eine Kombination der Prinzipien von SDH mit seiner Ende-zu-Ende Kontrolle der über viele Netzknoten (und Verbindungsabschnitte) hinweg geschalteten Verbindungen und WDM, so dass die Verbindungen nun auch über unterschiedliche Farbabschnitte hinweg definiert und verwaltet werden können.

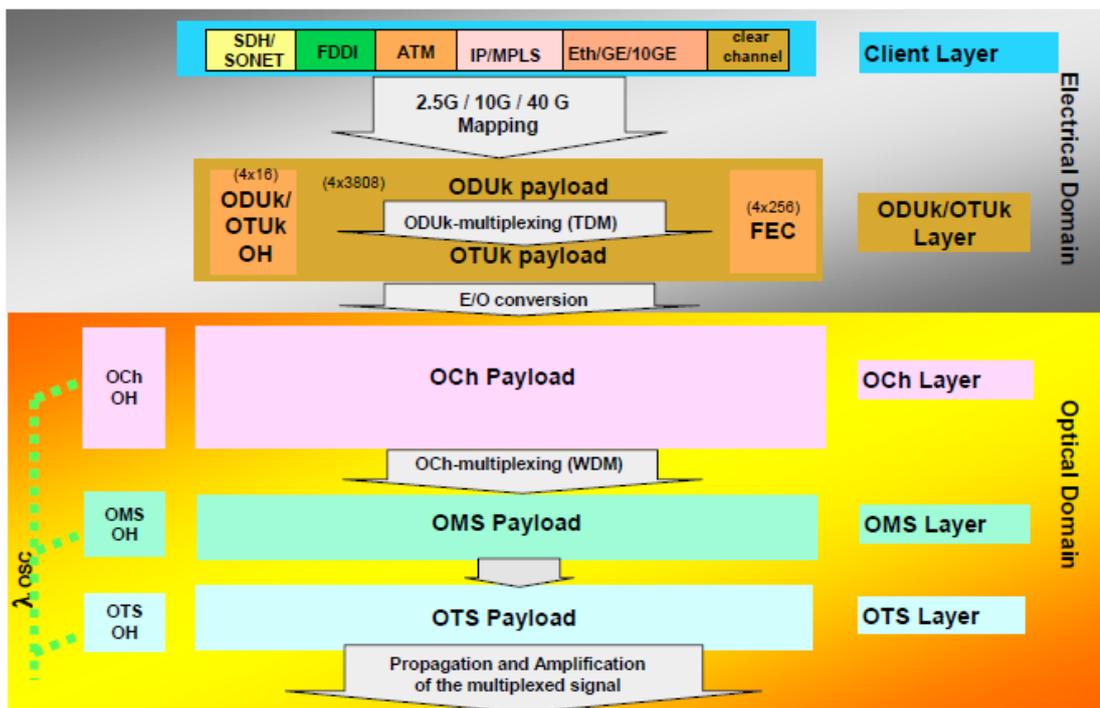
Dazu werden nach der ITU Rec. G.709 elektrische „Client-Signale“ aufbereitet und in einen standardisierten Rahmen eingefügt. Die Kombination von SDH und WDM in einem System erlaubt zudem die optimierte Ausnutzung der Kapazität der einzelnen Farben

⁹⁶ Die wichtigsten ITU-Empfehlungen sind die ITU Rec. G.709 zur Standardisierung der Schnittstellen, [ITU-03] und G.872 zur allgemeinen Beschreibung einer optischen Transportnetzarchitektur, [ITU-01]. Für eine Einführung in die OTN-Architektur vgl. [Barlow-09], und für deren derzeitigen Anwendungen [VDE-06].

des WDM. Es können nun in einem System mehrere STM-1 Signale auf eine Farbe gemultiplext werden (grooming). Neu ist zudem, dass durch „Forward Error Correction“ Bitfehler, die bei der optischen Übertragung auftreten, am Ziel korrigiert werden können, um damit größere Entfernungen ohne optisch-elektrische Regeneratoren zu überbrücken.

Die OTN-Architektur beinhaltet sechs Schichten, drei elektrische und drei optische, vgl. Abbildung 5-7. OTN erzeugt in der obersten elektrischen Schicht einen entsprechenden Rahmen, dem dann in der obersten optischen Schicht eine entsprechende Wellenlänge (λ) zugewiesen wird. Dieses elektrische Rahmensignal ODU wird in Form eines elektrischen Kanals (OCh) durch das OTN geführt. Mehrere optische Signale werden mittels Wellenmultiplex zusammengefasst und als entsprechende optische Transport Unit (OTU) über einen Übertragungsabschnitt transportiert.

Abbildung 5-7: Signalstruktur des OTN



Quelle: [VDE-06]

Das OTN definiert mittels seiner Rahmenstruktur (ODU) eine Kontrollschicht⁹⁷ für die OAM-Funktionen, die mit der Kontrollschicht des SDH/SONET vergleichbar ist und eine entsprechende Netz- und Kapazitätsverwaltung ermöglicht.

Ursprünglich für die SDH-Geschwindigkeitsklassen standardisiert, erfolgte inzwischen eine Erweiterung des Standards vor allem zur optimalen Aufnahme von 1Gb-Ethernet, 10Gb-Ethernet- und den neuen 40Gb/100Gb-Ethernet-Signalen. Das Modell berücksichtigt von daher alle aktuellen Ethernet-Schnittstellen: 1Gbps, 10Gbps, 40 Gbps und 100 Gbps. Tabelle 5-5 zeigt die charakteristischen Daten entsprechender Einrichtungen.

Tabelle 5-5: Derzeitige OTN Einrichtungen und ihre Ethernet-Schnittstellen

	OTN1	OTN2	OTN4	OTN8
1GE	x	x	x	x
10GE	x	x	x	x
40GE		x	x	x
100GE	x	x	x	x

Im Prinzip kombinieren OTN Systeme die Vorteile von NG SDH und DWDM in einem System mit durchgängiger Kontrollplattform und ermöglichen auf dieser Weise die Übertragung hoher, optimal gepackter Bandbreiten. Naturgemäß gibt es auch hier nicht nur Terminal Multiplexer, sondern auch Add-Drop-Multiplexer und Cross-Connectoren, die für das Modell spezifiziert wurden.

Aus Kostensicht ist zu überprüfen, ob die Einführung von OTN-Einrichtungen zum derzeitigen Zeitpunkt und abhängig von der Verbindungslänge und benötigten Kapazität einen Kostenvorteil gegenüber traditioneller SDH/SONET-Technik bringt. Es kann allerdings angenommen werden, dass bei genügend hoher Bandbreitennachfrage aus der Verkehrsnachfrage OTN langfristig bestehende SDH/SONET-Systeme ablöst, vor allem für lange Weitverkehrsverbindungen, da die Entwicklung neuer Telekommunikationssysteme in der Vergangenheit immer durch das Gesetz von der Wirtschaftlichkeit großer Mengen bestimmt wurde. Wir sehen daher im Modell den Einsatz von OTN vor allem auf der Transportschicht des Kernnetzes vor.

⁹⁷ Die ITU sieht eine Klassifizierung in drei Netzsichten vor und zwar Transportschicht für den Transport der Nutzer-Information, Kontrollschicht zum Transport der Signalisierung von Nachrichten aus vermittelten Diensten und Netzverwaltungsschicht zum Transport der Netzverwaltungsinformation. D.h., im engen Sinne der ITU Terminologie gibt es im physikalischen Transportnetz keine Signalisierung von Nachrichten, sondern nur von Nachrichten zur Netzverwaltung. Im Gegensatz dazu werden in den Standards der IETF und des IEEE die Nachrichten zur Netzverwaltung einem Kontrollplan bzw. Kontrollplattform zugeordnet.

5.1.5 Ethernet und IP over DWDM

Die Arbeiten der IETF zur Erweiterung von IP-Netzen hin zu einem alle Kommunikationsobjekte integrierenden NGN wurden zunächst durch Protokolle (DiffServ, RSVP/IntServ) getragen, die eine Differenzierung der IP-Ströme unter anderem nach Qualitätsklassen erlauben und damit den bisherigen „best effort“-Transport erweitern. Wesentlich ist zudem das MPLS-Protokoll, das einen verbindungsorientierten Transport der IP-Pakete ermöglicht und unterschiedliche Datenströme in verschiedene Kanäle (Pfade) zu trennen erlaubt. Dieses Protokoll wurde in das GMPLS (Generell MPLS) verallgemeinert, um eine Führung von optischen Signalen (Pfadern) über alle Transportebenen unter einer gemeinsamen Kontroll-Ebene zu ermöglichen. Auf dieser Basis können nutzerbezogene Ende-zu-Ende Transportdienste in flexibler und schneller Weise zur Verfügung gestellt werden.

Die Arbeiten zur Spezifizierung der Protokolle werden in enger Koordination mit der ITU durchgeführt, um GMPLS an die Anforderungen der ITU-Architektur für die automatische Kontrolle optischer Netze (ASON⁹⁸) anzupassen, für eine Übersicht siehe [Tomic-04].

Ethernet hat sich von seinem Ursprung eines einfach zu handhabenden lokalen Netzes, das Rechner mit peripheren Einrichtungen verbindet, zu einem Standard entwickelt, der mittlerweile in allen Netzbereichen - auch im Fernverkehr - eingesetzt wird. Dazu wurden die Bandbreiten und die Leistungsfähigkeit systematisch erhöht, und zwar in Zehnerschritten bis hin zu 10Gb Ethernet (im Gegensatz zu den Viererschritten der SDH- und OTN-Hierarchie). Auch die Arbeiten der IEEE HSSG, die sich mit der Definition von 40/100Gb-Ethernet⁹⁹ beschäftigten, sind nunmehr abgeschlossen. Das Modell berücksichtigt in seiner Ausgangsparametrisierung bereits auch Einrichtungen mit Ports von 40- bzw. 100 Gbps.

Die Anwendung von Ethernet in öffentlichen Netzen kann auf der Basis des sog. „Carrier Grade Ethernet“ vorgenommen werden, welches die klassischen Nachteile des Ethernet lindert bzw. ausgleicht. Dazu wurde Ethernet im Rahmen der Weiterentwicklung des IEEE802.1 Standard schrittweise ergänzt, um den neuen Anforderungen gerecht zu werden,.

Um die „Carrier Grade“-Leistungsmerkmale zu erfüllen, wird entweder MPLS-TP/Ethernet oder der Standard 802.1Qay, auch als „Provider Backbone Bridges Traffic

⁹⁸ ASON (Automatic Switched Optical Network) beschreibt eine von der ITU standardisierte Kontrollarchitektur zur Verwaltung von Ende-zu-Ende-Verbindungen in optischen Transportnetzen. Sie kann als Ergänzung (Kontrollschicht) zum OTN (Transportschicht) betrachtet werden. ASON beschreibt die Anforderungen an entsprechende Protokolle und ist damit unabhängig von einer konkreten Protokoll-Architektur.

⁹⁹ Die Abweichung von den 10er Schritten bei 40 Gbit/s ist der höchsten verfügbaren SDH-Geschwindigkeit (STM-256 mit 40 Gbit/s) geschuldet.

Engineered“ (PBB-TE) bezeichnet, eingesetzt. Beide Methoden gestatten es, Ethernet verbindungsorientiert einzusetzen und eine Infrastruktur bereitzustellen, die mit den Merkmalen von SDH/SONET vergleichbar ist und damit SDH/SONET ersetzen/ überflüssig machen kann, vgl. [Juniper-09]. In den Jahren 2010 und 2011 wurde die Standardisierung von MPLS-TP weitestgehend abgeschlossen,¹⁰⁰ das die schnellen Ersetzungsschaltungen (< 50 ms) auf Basis vordefinierter MPLS-Pfade bereits in der MPLS-Schicht (d.h. zwischen Layer 2 und 3) durchführt und somit für beide Layer geeignet ist.

Das vorliegende Kostenmodell erlaubt daher, auf eine Transportnetzschicht (Layer 1) zu verzichten und sieht die wesentlichen Funktionen der Fehlersicherung und Ersatzschaltung in den Systemen des Layer 2 bzw. Layer 3 integriert. Welche der beiden Techniken für Layer 2 dabei zum Einsatz kommt unterscheidet sich im Wesentlichen nur im Preis der Systeme, wobei der Markt auch hier keine großen Unterschiede aufweist. Wir gehen daher in der ersten Modellparametrierung von Einsatz des inzwischen weitgehend standardisierten und aus unserer Sicht fortschrittlicheren MPLS-TP für beide Layer aus.

Es existieren also Lösungen, die die Aspekte der physikalischen Schicht wie Ersatzschaltung, Netzverwaltung etc. direkt in die logische Schicht integrieren und damit sowohl Schicht-eins- als auch Schicht-zwei-Funktionen in integrierter Weise bereitstellen und somit die Kosten für die Implementierung von SDH/SONET bzw. OTN einsparen. Dies wird in der Literatur auch als „native packet optical transport“ bezeichnet, vgl. [Baldry-09]. Auf optischer Ebene kann bei sehr hohen Bandbreitenanforderungen optisches Multiplexen mit vereinfachten Schicht 1- Einrichtung wie DWDM Multiplexern verwendet werden, vgl. [Jenkins-06], [Cienna-08] und [Juniper-10].

Eine u.U. kostengünstigere Alternative gegenüber dem optischen Multiplexen ergibt sich, wenn vor allem bei kurzen Verbindungen Glasfasern direkt mit den entsprechenden Ethernet Einrichtungen (EoF) verbunden werden, da in diesem Falle die Multiplexerkosten die zusätzlichen Faserkosten überschreiten.

IP over DWDM ist eine weitere Entwicklung, die vor allem von Herstellern, die auf IP-Router-Einrichtungen spezialisiert sind, favorisiert wird, vgl. [CISCO-07], [Juniper-09a], Abbildung 5-8. Diese Technologie sieht eine direkte Zuweisung von IP-Paketen zu Wellenlängen für Anwendungen im Kernnetz von Breitbandnetzen vor. Diese Realisierungsform ist dadurch charakterisiert, dass, wie auch bei Ethernet over DWDM, im physikalischen Netzteil keine separierte elektrische Transportschicht existiert und damit sowohl die Verkehrlenkung als auch die Kapazitätsverwaltung vollständig in der Kontrollschicht der Router integriert ist (i.d.R. mittels GMPLS). Allerdings gehen wir davon aus, dass derzeit die Einrichtungen noch nicht den ausreichenden Reifegrad erreichen und von daher nur in Form von Pilotstudien eingesetzt werden; d.h. diese Variante wird

¹⁰⁰ Vgl. IETF RFC 5921, RFC 6372, RFC 6373, RFC 6378

vom Modell nicht in der integrierten Form berücksichtigt, sondern nur in der Kombination IP/ Ethernet mit separaten DWDM (ROADM) Systemen (vgl. Abschnitt 5.1.3).

Abbildung 5-8: Schichten bei Führung der Bandbreitenanforderungen aus den logischen Netzen direkt über optische Träger

Aggregation / Metro	Kernnetz
-	IP
MPLS bzw. E-Term	S- GMPLS
10 GB Ethernet / RPR	-
DWDM	
Fiber	
Kabel	

5.2 Anwendung der Architekturen im Breitband-Kostenmodell

Aus den vorstehenden Betrachtungen resultieren verschiedene Lösungen für den Transport auf physikalischer Ebene, die innerhalb von zwei Extrempunkten liegen: Der erste Extrempunkt ist charakterisiert durch die

- Führung aller Nachfragen über das NG-SDH, ohne Realisierung einer darunter liegenden technischen Schicht

und der zweite durch die

- Führung aller Nachfragen direkt in Wellenlängen, Ethernet bzw. IPoDWDM, vergleiche Abbildung 5-8, d.h., es wird keine NG-SDH-Transportplattform mehr verwendet und auch keine OTN-Transportplattform aufgebaut.

Zum Gegenwärtigen Zeitpunkt sehen wir als relevante, für das Kostenmodell zu berücksichtigende Lösungsansätze die folgenden Übertragungssysteme unter Berücksichtigung des optischen Frequenzmultiplex an, für die entsprechende Netzplanungs- und Kostenmodule formuliert wurden :

- NG-SDH mit dem Einsatz herkömmlicher ADM-Einrichtungen (rein elektrisches Multiplexen)¹⁰¹
- ROADM-Einrichtungen zur Realisierung eines optischen Multiplexens (DWDM)
- OTN mit dem Einsatz von integrierten ROADM, die ein zusätzliches Grooming der optischen Channel auf eine Farbe erlauben und neben Ethernet Interfaces auch die traditionelle SDH-Schnittstellen integrieren
- IP oder Ethernet direkt über Fasern, wobei die Switches bzw. Router für die schnelle Ersatzschaltung MPLS-TP nutzen.

IP over DWDM in der im Router vollständig integrierten Form schließen wir derzeit aus, da bisher noch keine Erfahrungen über die Zuverlässigkeit in großen „carrier-grade“ Netzen vorliegen. Eine Übersicht über die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten aus Layer 1 und Layer2/ 3 Technologien gibt Anhang 1.

Die Berücksichtigung einer Layer 1 basierten Kapazitätsnachfrage (zusätzlich zu den Nachfragen aus dem logischen Netz (Ethernet und IP)) kann im letzten Fall (IP/ Ethernet direkt über Faser) entweder über eine Migration dieser Nachfrage in Ethernet oder IP-basierte Mietleitungsnachbildungen (z.B. Pseudowire) erfolgen oder aber, wenn dies wegen der unvermeidbaren qualitativen Einbußen nicht im Markt akzeptiert wird, über ein separates Transportnetz (NG-SDH oder OTN), dessen Fasernutzung anteilig bei der Kostenbestimmung berücksichtigt werden muss (über Beilauf-Faktoren).

5.3 Topologische Aspekte für das physikalische Netz

Das physikalische Netz stellt die Verbindungen der Netzknoten des logischen Netzes über die Trassen des Liniennetzes und seine Netzknoten entsprechend dem Kapazitätsbedarf und übergeordneter Anforderungen an die Verfügbarkeit, Ausfallsicherheit und Störwirkbreite her.

Hinsichtlich der Topologie werden im Konzentrationsnetz Ringe unterstellt, ebenso für die hierarchischen Netzsegmente des Kernnetzes. Lediglich auf der obersten Kernnetzebene wird eine vermaschte Struktur angenommen, deren Vermaschungsgrad auf der physikalischen Schicht parametergesteuert veränderbar ist. In den folgenden Abschnitten wird auf einige besondere Aspekte der Verbindungsführung etwas detaillierter eingegangen.

101 Die Signalübergabe an die SDH-Systeme kann entweder rein optisch erfolgen (nur optische Interfaces) oder, für kurze Verbindungen innerhalb desselben Standortes zu den dort aufgestellten Switches oder Routern, auch über preiswertere elektrische Schnittstellen (bis 1 Gbit/s)

5.3.1 Topologie und Verbindungs-Führung im Konzentrationsnetz sowie in den hierarchischen Segmenten des Kernnetzes

Die Topologie auf der Basis der Glasfaser-Infrastruktur wird in den hierarchischen Netzsegmenten zwischen den Ebenen (0-1, 1-2, 3-4, 4-5) durch Ringe bestimmt. Beispielsweise werden in einem Konzentrationsnetz mit zwei Ebenen für jedes IP-PoP-Cluster normalerweise Ringtopologien gebildet, die alle Nachfragen aus den MPoPs aufnehmen und über den Metro-Switch, der am IP-PoP kolloziert ist, an den LER abgeben.¹⁰²

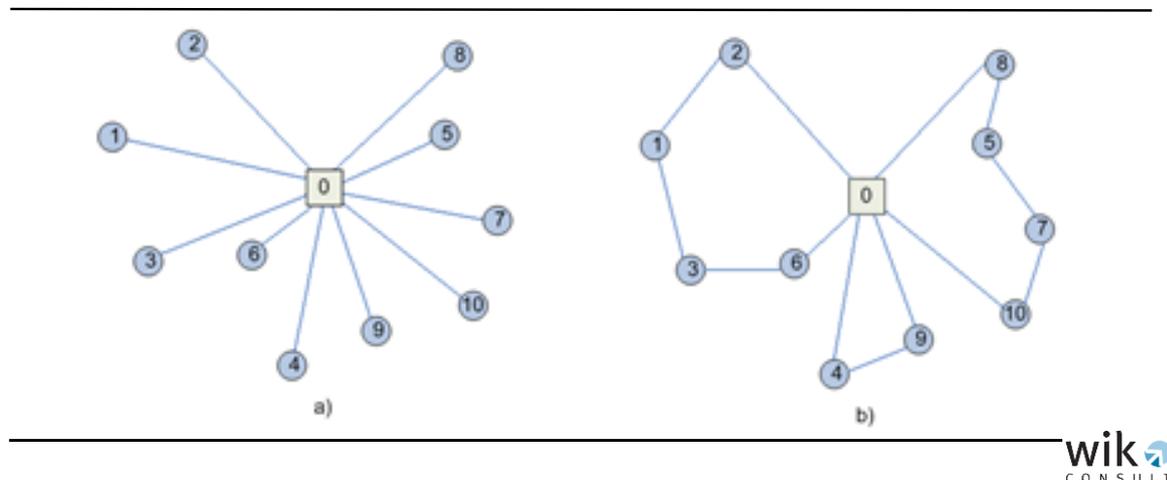
Aus Gründen der Verfügbarkeit kann die Anzahl der Standorte pro Ring in einem Cluster begrenzt werden; in diesem Fall sind mehrere Ringe zu berechnen.

Die Bandbreitenanforderungen aus der logischen Ebene werden über die Ringstrukturen zu 50% im Uhrzeigersinn und zu 50% in entgegengesetzter Richtung geführt (vgl. Abschnitt 4.3). Die Anzahl der zu realisierenden Glasfaserringe innerhalb des Kabelrings werden durch den Umfang der Bandbreitenanforderungen bestimmt. Aus Gründen der Absicherung kann über einen Inputparameter gesteuert werden, dass bei den Ringen in jeder Richtung 100% der benötigten Übertragungskapazitäten vorgehalten werden, um somit den Fehlerfall einer Ringunterbrechung an einer Stelle auch kapazitiv vollständig abzusichern.

Die Ringbildung wird im Modell endogen vorgenommen. Diese modellendogene Bestimmung basiert (bspw. im Konzentrationsnetz) auf den ebenfalls endogen abgeleiteten **Sternstrukturen des logischen Netzes**. Die Standorte der höheren Netzebene, denen eine Menge von Standorten der unteren Netzebene sternförmig zugeordnet ist, beschreiben ein Netzsegment bezogenes Cluster: beispielsweise 0-1, 1--2 oder 0-2 im Konzentrationsnetz. Prinzipiell können sämtliche Standorte eines Clusters dem jeweiligen Standort der höheren Netzebene in Form eines Ringes zugeführt werden. Um jedoch die Zahl der Knoten in einem Ring nicht zu groß werden zu lassen, kann eine Unterteilung in Sub-Cluster vorgenommen werden, die ihrerseits individuelle Ringe konstituieren. Dies ist in der nachfolgenden Abbildung 5-9 illustriert, wobei der linke Teil der Abbildung (a) das Cluster darstellt und der rechte Teil die kleeblattartige Realisierung der Ringe.

¹⁰² Davon ausgenommen sind die Verkehrsanteile aus VLAN, die an Standorten innerhalb des IP-PoP-Clusters beginnen und enden.

Abbildung 5-9: Cluster (a) und Ringbildung im Cluster auf Basis des Kleeblatt-Algorithmus (b)



Aufgrund seiner Erscheinungsform wird dieser im Modell angewendete Algorithmus „Kleeblatt“- oder „Shamrock“-Algorithmus genannt. Für seine Anwendung ist im Modell ein Parameter zur Festlegung der maximalen Anzahl von Standorten in einem Ring (Sub-Cluster) vorgesehen. Auf diese Weise kann die Standortzahl im Ring, so wie es die Positionen der Marktteilnehmer im Rahmen der Konsultation als notwendig erachtet haben, durch den Modellanwender kontrolliert werden.

Im Modell wird davon ausgegangen, dass der dominante Kostenaspekt für einen Ring durch die Infrastrukturkosten und das Glasfaserkabel bestimmt wird und damit weitestgehend von der geographischen Entfernung zwischen jeweils benachbarten Standorten im Ring abhängig ist. Daraus folgt, dass das Modell eine Ringbildung auf der Basis einer Längenminimierung vorsieht. Dies geschieht im Modell auf Basis eines Algorithmus für das Travelling Salesman Problem (TSP), siehe [Lin-73].

5.3.2 Topologie und Verbindungs-Führung im Ring sowie im vermaschten Kernnetz

Im 1-Ebenen-Kernnetz (auch flaches Kernnetz genannt) ergibt sich für die Struktur des logischen Netzes eine vollvermaschte Struktur (im Sinne der Nachfrage zwischen den LER).

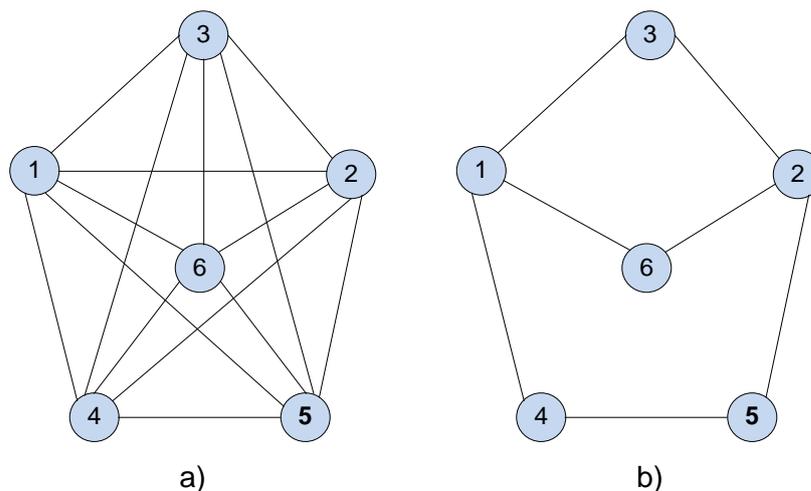
Für den Ring erfolgt eine Anbindung der LSR über die entsprechende Layer 1 Technologie (z.B. OTN), wie es bereits in Abbildung 4-9 dargestellt wurde.

Für die vermaschte physikalische Topologie wird ausgehend von dieser vollvermaschten Struktur mittels eines sogenannten „Drop-Out“ Algorithmus die physikalische Topologie herausgefiltert. Als Kriterien finden die nachfolgenden Größen Anwendung:

- Die Selektion der zu eliminierenden Netzkanten erfolgt nach Maßgabe ihrer Länge und Verkehrsstärke. Entsprechend werden Kanten mit großer Länge und schwachem Verkehrsfluss als erste gelöscht. Im Modell ist dazu ein Parameter vorgehalten, der das Gewicht dieser beiden Bestimmungsfaktoren zueinander steuert (Konvexkombination aus Entfernung und Verkehrsstärke).
- Zusätzlich wird als Nebenbedingung der sogenannte Diameter¹⁰³ beachtet, d.h. vor Löschung einer logischen Kante wird geprüft, ob das verbleibende Netz noch ausreichend zusammenhängend, d.h. i.A. bi-connex¹⁰⁴ ist und ein vorzugebender Maximalwert für den Diameter nicht unterschritten wird.

In der nachfolgenden Abbildung 5-10 sind logische Netzstruktur (a) und deren zugehörige physikalische Topologie (b) für das flache Kernnetz an einem Beispiel dargestellt, wobei die Knoten ausschließlich Standorte der oberen Kernnetzebene darstellen.

Abbildung 5-10: Beispiel für eine logische Netzstruktur (a) und deren zugehörige physikalische Topologie (b) im flachen Kernnetz



Für die Realisierung der physikalischen Topologie im flachen Kernnetz kommen ROADM bzw. OCX-Einrichtungen der ausgewählten Technologie (OTN oder DWDM) zum Einsatz¹⁰⁵, wobei in der Modellparametrierung zu gewährleisten ist, dass das an-

103 Der Diameter ist ein Konzept aus der Graphentheorie und beschreibt die maximale Anzahl der Kanten in der Längenmatrix der kürzesten Wege zwischen allen Knotenpaaren, vgl. [Berge-73]. Die Festlegung eines maximalen Diameters erlaubt daher eine Beschränkung der Anzahl der Hops.

104 Bi connex meint dass zwischen jedem Knotenpaar mindestens zwei Wege bestehen, die keine gemeinsame Kante haben.

105 oder eben auch keine Layer 1 Technologie, wenn mit IP direkt über Faser darauf verzichtet wird.

gegebene Equipment auch die Anforderungen an den Knotengrad erfüllen. Im Beispiel der Abbildung 5-10 weisen die Knoten 1 und 2 den höchsten Knotengrad auf, der jeweils 3 beträgt.

5.3.3 Schichten im physikalischen Netz

Das physikalische Netz beinhaltet mehrere Unterschichten: Schicht 1 Systeme und die Wellenlängen sowie auf Schicht 0 Glasfaser, Kabel und Rohr- und Graben-Infrastruktur. Aus Gründen der Netzverfügbarkeit kann eine partielle oder auch vollständige Trennung dieser Unterschichten im physikalischen Netz vorgenommen werden. Bei der partiellen Trennung kann:

- eine separierte Struktur auf der Ebene der Wellenlängen realisiert werden (λ -Struktur), die mit Wellenlängen aus den mittleren Netzebenen „gemultiplext“ und über gemeinsame Glasfasern geführt werden
- eine Separierung auf der Basis der Glasfasern, die in gemeinsamen Kabel geführt werden oder
- eine Separierung auf der Basis der Kabel, die in einer gemeinsamen Infrastruktur aus Leerrohren und Gräben geführt werden

Die Separierung auf Basis der Wellenlängen erfordert einen zusätzlichen Aufwand an rein optischen ROADM- bzw. OC-X-Einrichtungen (DWDM), die Separierung auf der Basis der Glasfasern vergrößert die Anzahl der passiven Glasfaserverbindungen in entsprechenden Verteilern. Demgegenüber führt die Separierung auf der Basis der Kabel bei gemeinsamer Topologie der Infrastruktur aus Leerrohren zu einer Vergrößerung der Kabellängen. Die Vor- und Nachteile sowie die entsprechenden Kosteneinsparungen hängen stark von den aggregierten Bandbreitenanforderungen in betroffenen Ebenen ab. Im Modell werden diese Varianten nicht berücksichtigt.

Das Modell implementiert hingegen die vollständige Separierung auf der Basis von getrennten Kabeln in getrennten Trassen. In diesem Bereich sind relevante Kosteneinsparungen durch die Zusammenlegung geographisch benachbarter Kabelabschnitte in einer Trasse zu erwarten und daher ist die Frage der Zusammenlegung bzw. Separierung von Kabeln auf Basis von Trassen ein wichtiger Aspekt, der im Modell Berücksichtigung findet.

Da die Separierung von Kabelabschnitten unter anderem aus Gründen der Redundanz erfolgt, sind Verfügbarkeitsaspekte im Störfall zu berücksichtigen, weil bei einer totalen Unterbrechung aller Kabel in einer Trasse, die in einem Kabelabschnitt gemeinsam geführt werden, die Ersatzkapazitäten unzureichend sein können.

Die Trassenzusammenlegung wird im Modell wie folgt berücksichtigt: Ein entsprechender Algorithmus basiert auf der Grundlage von Beziehungen aus der analytischen Geometrie und verwendet einen maximalen Umwegfaktor, der sich aus der Löschung (Wegnahme) einer Layer 0 Kante und deren Führung über andere bestehende Layer 0 Kanten ergibt, ggf. über Zubau eines Anschlussstückes. Die Kosten für die gelöschte Kante entfallen, dafür generiert der Umweg Mehrkosten für Anschlussstück und Kabel. Ein Kostenvergleich bestimmt die effiziente Zusammenlegung. Layer 0 Kanten, die eine Mehrwegeführung absichern, können nicht zusammengefasst werden, da bei einer Trassenunterbrechung beide Wege ausfallen würden.

Der Algorithmus findet in zwei Bereichen Anwendung:

- auf die Cluster der hierarchischen Netzsegmente, welche über Ringe realisiert werden, und zwar individuell für jedes Cluster, das ein eigenständiges Kleeblatt bildet. Dieser Algorithmus wird als **Intra-Cluster Trench Optimization** bezeichnet.
- auf benachbarte Cluster zwischen 2 Netzsegmenten, welche über Ringe realisiert werden, bspw. benachbarte Ringe der Netzebenen 0-1 und 1-2. Dieser Algorithmus wird als **Inter-Cluster Trench Optimization** bezeichnet.

Auf die Anwendung des Algorithmus zur Trassenzusammenlegung für die oberste Kernnetzebene 5-5 wird im Modell verzichtet, da der angewendete Drop-Out Algorithmus zur Bestimmung der physikalischen Topologie bereits den Aspekt der Trassenminimierung adressiert und daher kein bzw. nur ein geringes Potential für weitere Einsparungen erwartet wird.

6 Kontrollschicht

Die Kontrollschicht eines Telekommunikationsnetzes stellt die Infrastruktur für die Generierung, Auswertung und den Transport von Nachrichten bereit, die bei der Verwaltung, Überwachung und Kontrolle des Netzes aufkommen, u.a. auch für die Signalisierungsnachrichten beim Aufbau, der Überwachung und dem Abbau von Verbindungen aus Echtzeitdiensten oder deren Abrechnung. Die Entwicklung der Architekturen der Kontrollschicht ist eng mit der Entwicklung der Telekommunikationsnetze verbunden.

In den traditionellen Telekommunikationsnetzen wurden für jede Dienstkategorie separate Netze (PSTN/ISDN (Telefonie, Telefax, geschaltete Datenverbindungen), paketvermittelnde Datennetze, Breitbandnetze) bereitgestellt, die jeweils eine eigene Kontrollschicht und eine eigene logische Transportschicht besaßen und deren Endgeräte an den Kontrollfunktionen nur begrenzt, wenn überhaupt, beteiligt waren..

Im Gegensatz dazu werden im best effort Internet die Kontrollmechanismen in den höheren Protokollschichten innerhalb der Endgeräte bzw. in speziellen Servern, z.B. BRAS, SIP-Server, DNS, Bandwidth Broker, ... implementiert und das IP Transportnetz auf den „Datagram Transport“ der IP Pakete beschränkt. Vermittelnde Router und die dienstspezifischen Kontrollfunktionen sind entkoppelt. Damit kann das best effort Internet als ein System verteilter Intelligenz unter einem stark vereinfachten universellen (IP-)Transportnetz angesehen werden. Diese Vorgehensweise bietet ein hohes Maß an Flexibilität bzgl. der Einführung neuer Dienste, da nun nicht mehr ganze Vermittlungssysteme Netz weit ausgetauscht werden müssen, sondern einzelne Server, die zudem bedarfsorientiert dimensioniert werden können.

Bei der weiteren Entwicklung der Kontrollplattform gibt es zwei Richtungen: Zum einen werden alle verteilten Funktionen wieder zusammengefasst in eine weitgehend homogene Plattform, die die Steuerung des Gesamtverkehrs erlaubt, zum anderen wird die Entwicklung der dezentralen Kontrollfunktionen beibehalten und um neue Elemente ergänzt.

In diesem Kapitel wird im ersten Abschnitt erste Richtung, die Entwicklung der Kontrollschicht traditioneller Telekommunikationsnetze in Richtung des Next Generation Network und vor allem deren Variante in Form des IP Multimedia Subsystems (IMS) betrachtet. Im zweiten Abschnitt wird die zweite Richtung, nämlich die Entwicklung der Kontrollschicht des best effort Internet in Richtung eines „Next Generation Internet NGI“ beschrieben. Im dritten Abschnitt werden beide Konzepte verglichen und deren Anwendung im Kostenmodell dargestellt.

6.1 NGN und IMS

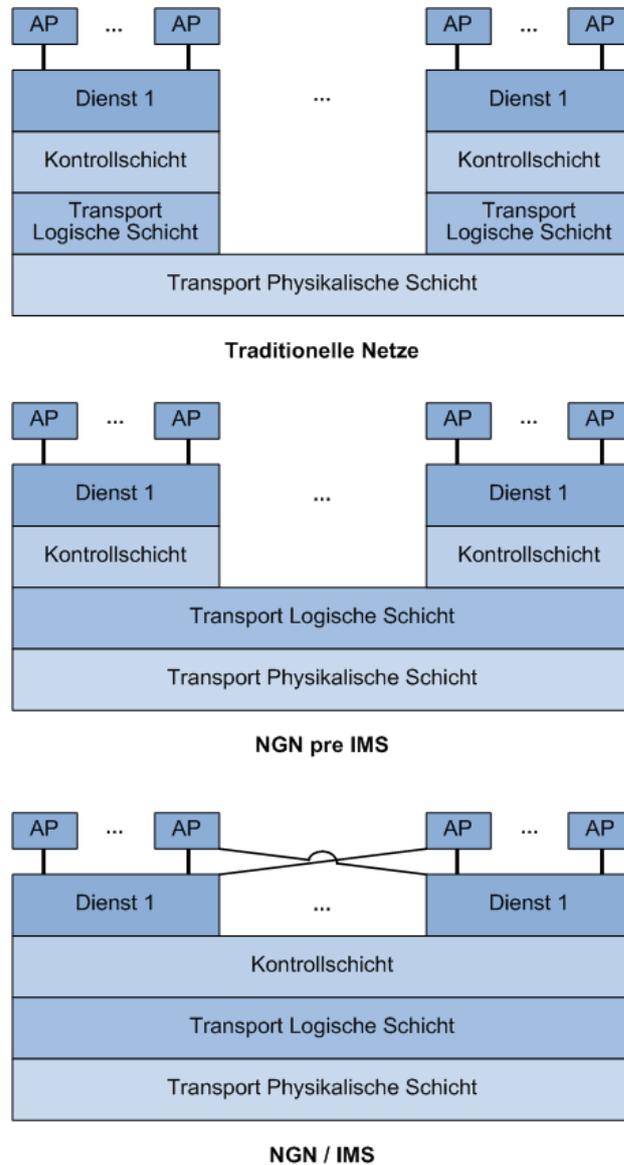
In den traditionellen Netzen ist die Implementierung der Kontrollschicht eng mit den Einrichtungen der logischen Schicht zusammengefasst und kann daher als verteiltes System angesehen werden.¹⁰⁶ In einem nächsten Schritt wurden mit der Entwicklung der Netze zunächst unter einer ATM- und danach der IP Transportplattform mehrere Dienstekategorien unter einer gemeinsamen logischen Schicht integriert und die verschiedenen Dienste durch zentralisierte Diensteserver, auch als Softswitches bezeichnet, bereitgestellt.¹⁰⁷

Als Weiterentwicklung dieses Konzepts wurde unter dem Namen IP Multimedia Subsystem (IMS) eine Architektur entwickelt, die es gestattet, unter einer gemeinsamen Kontrollschicht verschiedene Dienste anzubieten. Die zugehörigen Anwendungen können dabei aus Kombinationen standardisierter Dienste zusammengestellt werden, z.B. standortabhängige Anwendungen. Abbildung 6-1 zeigt die Entwicklung der Netze von ihrer traditionellen Separierung zu einer vollständigen Integration, wobei große öffentliche Netzbetreiber erklärt haben, ihre Netze mittelfristig in Richtung IMS entwickeln zu wollen.

106 So sind im PSTN/ISDN die Funktionen der Signalisierung aber auch die OAM Funktionen (Operation, Administration and Management) in den Vermittlungseinrichtungen integriert, aber von der logischen Transportschicht separiert, ein Beispiel ist das Signalisierungsprotokoll CCSSn⁰⁷ und dessen Implementierung in Form von "Signaling Points SP" und Signaling Transfer Points STP", vergleiche [Siegmund-01].

107 Ein Beispiel ist Ericsson ENGINE Integral solution, die sowohl unter ATM als auch IP Sprachdienste mittels eines zugehörigen Servers (Softswitch) anbietet, vgl. [Ericsson-04].

Abbildung 6-1: Entwicklung der Dienste und Kontrollschicht von traditionellen Netzen zum NGN/IMS

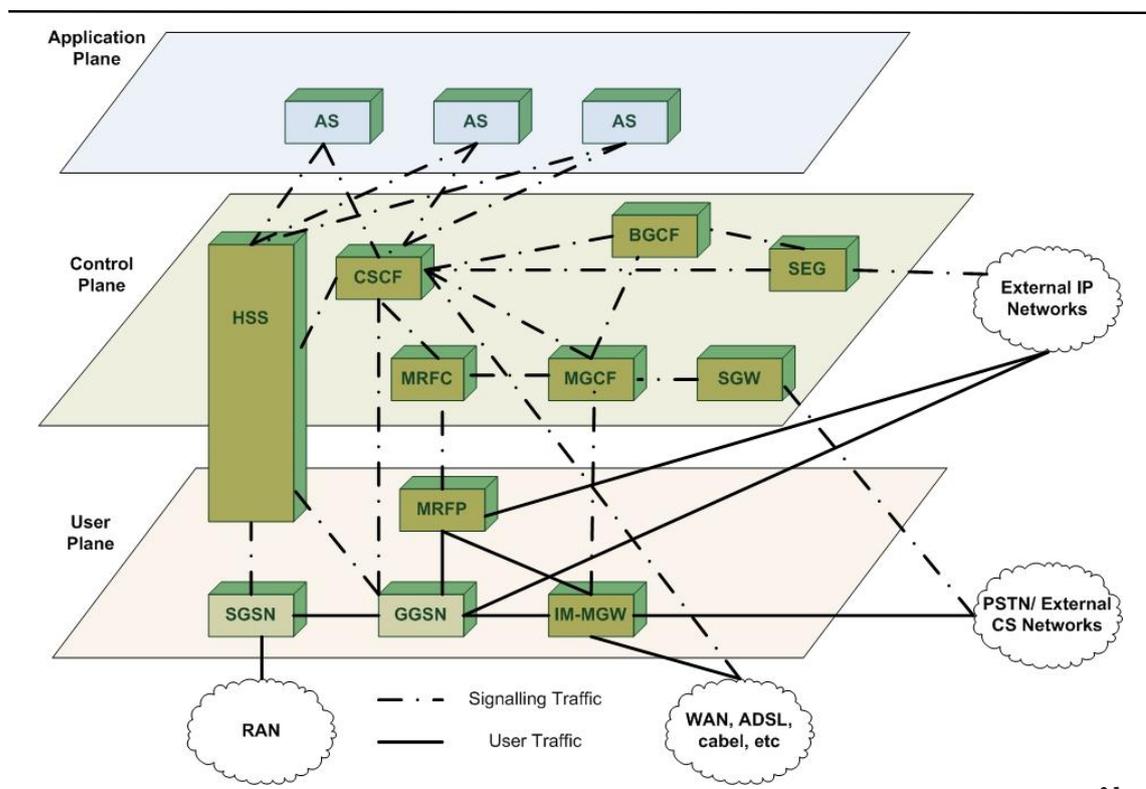


IMS wurde in einem ersten Schritt von der 3GPP-Organisation entworfen¹⁰⁸, um die Mobilfunknetze weiter zu entwickeln und eine Integration Mobil-Fest zu unterstützen. Aus der Sicht der Festnetzbetreiber wird IMS vom ETSI im Rahmen des TISPAN-Projektes standardisiert, wobei beide Organisationen eng kooperieren. IMS beschreibt im Kern eine zentrale Kontrollschicht, die von allen Diensten gemeinsam verwendet

¹⁰⁸ www.3gpp.org.

wird. Diese Kontrollschicht besteht aus verschiedenen Funktionsblöcken mit Schnittstellen sowohl zur Dienstanwendungsschicht als auch zur gemeinsamen Transportschicht. Für diese Schnittstellen werden vorwiegend bestehende Protokolle der IETF verwendet. Abbildung 6-2 zeigt die wichtigsten IMS-Funktionselemente, wobei im Kern das Call State Control Function (CSCF) -Element steht, welches einen gesicherten Aufbau von Multimediaverbindungen bereitstellt und auf dem bekannten SIP-Protokoll basiert.

Abbildung 6-2: Übersicht über die wichtigsten Funktionsblöcke des IMS und deren Verknüpfung mit den darüber- und darunterliegenden Schichten, und externen Netzen



Abkürzungen:

AS Application Server, BGCF Breakout Gateway Control Function, CSCF Call State Control Function, GGSN Gateway GPRS Support Node, HSS Home Subscriber Server, IM MGW IP Multimedia Gateway, MGCF Media Gateway Control Function, MRFC Media Resource Function Controller, MRFP Media Research Function Processor, SGW Security Gateway, SGSN Service GPRS Support Node, SGW Signaling Gateway

Dazu unterteilt sich die CSCF in drei Unterfunktionen (Proxy-, Interrogate- und Service CSCF). Die P-CSCF kommuniziert mit der Nutzer- bzw. Transport Schicht, um die Bandbreiten und QoS Anforderungen der gewünschten Verbindung sicherzustellen. Für eine kurze Übersicht von IMS vgl. [Ericsson-07] und für eine breite Darstellung [Al-Begain-09].

IMS unterstützt vor allem den Aufbau und die Überwachung von Multimedieverbindungen sowohl intern als auch mit anderen Netzen und ist damit auch von Bedeutung für die Zusammenschaltung von unterschiedlichen Netzen, z.B. für Sprachdienste von VoIP im IMS mit dem PSTN/ISDN-Netz, vgl. dazu Abbildung 6-2. Diese Bandbreiten und QoS-Anforderungen müssen allerdings in der Transportschicht selbst durch zugehörige Protokolle bereitgestellt werden, die schon im Abschnitt 5.1 behandelt wurden. Diese hängen von der Architektur der Transportschicht ab, wobei sich aus heutiger Sicht die in Tabelle 6-1 dargestellten Szenarien ergeben.

Tabelle 6-1: Kontrollschicht-Szenarien in Koordination zwischen der logischen- und physikalischen Ebene

Abkürzung	IPoSDH	IPoOTN	IPoOTN	IPoDWDM
Logische Ebene	MPLS	MPLS	GMPLS/ASON	MPLS TP S-GMPLS
Physikalische Ebene	Overhead des STM-N	TCM aus OTN	GMPLS/ASON	--
Eigenschaften	Vollständige Trennung zwischen beiden Ebenen	Vollständige Trennung zwischen beiden Ebenen	Separiert, aber unter gemeinsamer Koordinierung	Verwaltung ausschließlich aus der logischen Ebene

6.2 Next Generation Internet (NGI)

Mit der Integration von Echtzeitdiensten wie VoIP, VoD und neuen Online Diensten ist das best effort Internet an seine Grenzen gestoßen und eine garantierte minimale Dienstqualität kann nur durch eine reduzierte Auslastung der Server und Leitungsgruppen (d.h. durch Überdimensionierung) erreicht werden, wodurch die Kosten erhöht werden.

Um sowohl den Zugang zum IP Netz eines Internet Service Providers zu gewährleisten, aber auch um die Qualitätsanforderungen der Dienste zu differenzieren, wurden zusätzliche Protokolle entworfen, die das best effort Internet in Richtung eines diensteintegrierten, differenzierenden Breitbandnetzes mit einem System verteilter Intelligenz weiter entwickeln.

Daraus ergibt sich, dass die Integration von verschiedenen Diensten unter einer IP-Transportinfrastruktur nicht nur durch IMS, sondern auch durch die Weiterentwicklung des klassischen best effort Internets hin zum Next Generation- bzw. Future Generation Internet (NGI bzw. FGI) möglich ist und damit der Aufbau der u.U. teuren IMS-

Infrastruktur¹⁰⁹ vermieden werden kann. D.h., die im IMS zentralisierte Kontrollschicht wird durch entsprechende Diensteserver und Bandwidth Broker in der Kontrollschicht ersetzt, die – entsprechend dem Internet-Konzept – an die Netzperipherie als externe Elemente angeschlossen werden. Hinzu kommt, dass diese Diensteserver und Bandwidth Broker ggf. auch von anderen Marktteilnehmern im Rahmen des offenen Dienstzugangs bereitgestellt werden können.¹¹⁰

Die beiden Kontrollfunktionen Identifizierung und Autorisierung (NASS) und die Zuweisung von Netzkapazitäten (RACS)¹¹¹ sind im Internetzugang für den Massenmarkt im sog. Broadband Remote Access Server (BRAS) integriert, der mit dem Netzzugangsrouten (LER, Label Edge Router) kombiniert sein kann, oder als separates System am LER kolloziert ist. Er liegt bei beiden Varianten in der unteren Schicht des Kernnetzes. In kleineren Netzen ist ggf. eine zentrale Implementierung des BRAS effizienter, weil die Transportkosten des zu kontrollierenden Teilnehmerverkehrs geringer wiegen als die Kosten dezentraler BRAS, die bei dezentraler Aufstellung zudem nicht auszulasten wären. (Eine solche Situation liegt bei dem Netz eines Incumbent mit eingeführten Breitbanddiensten nicht mehr vor.)

Um die verschiedenen Dienste aus QoS Sicht zu differenzieren, wurden die schon erwähnten Protokolle DiffServ unter MPLS und IntServ unter RSVP durch Verkehrsverwaltungsfunktionen (Traffic Engineering, TE) erweitert und entsprechend das MPLS-TE bzw. das RSVP-TE in zugehörigen RFC definiert. Darüber hinaus wird für Echtzeitsdienste das generische SIP Protokoll verwendet, dessen konkrete Anwendung auf einen Dienst jeweils unter dem „Session Description Protokoll“ SDP beschrieben wird.¹¹²

109 Eine derartige Kontroll-Infrastruktur kann auch neue Herstellerabhängigkeiten hervorrufen und den Grad an Flexibilität verringern.

110 Ein Vergleich der Entwicklung von NGN und NGI bzw. FGI wird in [Hackbarth-06] behandelt. Vergleiche zu diesem Thema auch die kontroverse Diskussion auf dem "Vermittlungstechnischen Kolloquium" des österreichischen Verbandes für Elektrotechnik in Wien Juni 2006 im Zusammenhang mit der Netzneutralität, <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Netzneutralitaet-Vermittlungstechnik-und-die-Zukunft-des-Internet-135308.html>. Vergleiche auch die aktuelle Diskussion über Durchleitgebühren, die IP-Netzbetreiber von Portalen wie Google erheben wollen http://www.news.de/wirtschaft/855043806/telefonica-will-google-abkassieren/1/?MAILSOLUTION_LINKCATEGORY=Wirtschaft&MAILSOLUTION_LINKNAME=headline&utm_campaign=mailsolution&utm_medium=email&utm_source=newsletter.

111 NASS: Network Attachment Subsystem; RACS: Resource and Administration Control subsystem.

112 Ergänzend sei auf die Entwicklung eines neuen QoS-Konzeptes verwiesen. Dieses orientiert sich vornehmlich an der subjektiven Erwartung der Nutzer (insbesondere Privatanutzer) und wird mit Quality of Experience QoE bezeichnet, vgl. [Fielder-10], [Shaikh-10].

6.3 NGN und NGI im Kostenmodell

Ein Vergleich beider Konzepte zeigt die stark zentralisierenden Kontrollfunktionen des NGN vor allem im IMS, während im NGI Konzept die Dezentralisierung und Aufteilung der Intelligenz zwischen Einrichtungen in der Transportschicht, verteilten Servern und Endgeräten vorherrscht. Gemeinsamkeiten beider Konzepte ergeben sich aus der Tatsache, dass Protokolle aus dem NGI auch im IMS verwendet werden.

Aus dieser vergleichenden Gegenüberstellung von NGN-IMS und NGI wird deutlich, dass regulatorischen Herausforderungen mit dem Betrieb eines IMS und der damit verbundenen Kontrolle für den Zugang von externen Diensteanbietern zur Kontrollschicht verbunden sind. Das Konzept des NGI erlaubt demgegenüber einen flexibleren Zugang verschiedener Marktteilnehmer für Online- und Multimediadienste, siehe auch [Hackbarth-06].

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt stehen die in der Diskussion und Entwicklung befindlichen Systeme für die Kontrollplattformen der neuen Generation nicht vollständig zur Verfügung. Hinsichtlich der Implementierung können bisher folgende Beobachtungen gemacht werden: Die meisten Netzbetreiber realisieren ihr NGN auf Basis von Softswitches für PSTN/ISDN Dienste und greifen auf Media Gateways für die Zusammenschaltung ihres NGN mit traditionellen PSTN/ISDN Netzen zurück.¹¹³ Premium Business Dienste werden als Layer 3 VPN oder Layer 2 VLAN mittels entsprechender MPLS Tunnels bereitgestellt, zu deren Realisierung auf Bandwidth Broker zurückgegriffen wird. Der Bandwidth Broker verbindet die Transportschicht mit der Kontrollplattform über ein zugehöriges Protokoll, wie beispielsweise das Common Open Policy Server Protocol (COPS, RFC 2748). Wir unterstellen im Modell, dass die Funktion des Bandwidth Broker in den Funktionen des Element Management Systems enthalten ist. Multimedia- und Internet Dienste werden durch funktionale Einrichtungen, wie BRAS, DNS etc. unterstützt.

Aufgrund dieser Beobachtungen ist die Kontrollschicht des NGN nach Maßgabe der durch sie ausgeübten Funktionen zu modellieren. Dabei wird das dazu erforderliche Equipment (Vorgabe der zu berücksichtigenden Funktionselemente) von WIK vorgegeben und die Anzahl der zugehörigen Standorte vom Modellanwender parametrisiert. Im Modell wird dabei davon ausgegangen, dass die Inanspruchnahme der Kontrolleinrichtungen gleich verteilt ist. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass Anfragen an die Kon-

¹¹³ siehe Wojcich Michalski, Survey of NGN migration profiles deployed by selected carries in Europe, North America and Asia, Journal of Telecommunications and Information Technology, N°3 2008 . Ein Beispiel für die Migration des PSTN/ISDN zum NGN findet sich in Alshaih, Almughales, Technical plans and solutions for smooth migration of tool and tandem layers to NGN, International Journal of Computer Science and Network Security Vol. 10 June 2010. Ökonomische Aspekte der NGN Migration werden diskutiert von der Deutschen Telekom in B. Jacobs, Economics of NGN deployment scenarios. Discussion of migration strategies for voice carries, ieeexplore.ieee.org/iel5/4082388/4082389/04082392.pdf?arnumber

trolleinrichtungen standortunabhängig bedient werden können und Kapazitäten verschiedener Standorte von Kontrolleinrichtungen einander ersetzen können. Zusätzlich werden Inputparameter vorgesehen, die eine Steuerung von Redundanzen durch den Modellanwender erlauben. Diese betreffen sowohl die Standortabsicherung (zusätzliche Standorte) als auch den Umfang der über diese Redundanzen abwickelbaren Anfragen an die Kontrolleinrichtungen bei Ausfall einzelner Systeme.

In den folgenden Unterabschnitten sind die technischen Einrichtungen beschrieben, die im Rahmen der Systemspezifikation ausformuliert wurden und für die Modellanwendung verfügbar sind. Dabei wird unterteilt in allgemeine und spezifische Funktionselemente, wobei erste der Steuerung des allgemeinen Netzzugangs und zweite der Steuerung des Sprachverkehrs dienen. Wir weisen darauf hin, dass weitere Funktionselemente über vorgesehene Inputparameter (Systemparameter) eingepflegt werden können.

6.3.1 Allgemeine Funktionselemente im Breitbandnetz

Für die Steuerung des allgemeinen Netzzugangs werden verwendet:

- Broadband Remote Access Server (BRAS)
- Radius (Remote Authentication Dial-In User Server)
- DNS (Domain Name Server)

BRAS und Radius dienen der Rechteverwaltung der Nutzer und der ihnen laut Vertrag zugeordneten Bandbreite/ Qualität. Diese Server sind am Zugang zum vermittelnden (Kern-)Netz, den IP-PoP, lokierte. Wir unterstellen, dass die Radius Funktion nicht in einem separaten Server angesiedelt ist, sondern wegen der funktionalen Interdependenz im BRAS.

Der DNS dient der Wandlung von URL (z.B. aaa.bbb@yxz.at) und E.164 Adressen (Telefonnummern) in IP-Adressen und kann an zentraler Stelle angesiedelt sein. Die Anzahl der Standorte, an denen diese Einrichtungen vorgesehen werden, werden von dem Modellanwender als Modellinput vorgegeben (Vorgabe der Anzahl von Standorten).

Welche Kapazitäten der Einrichtungen (an den jeweiligen Standorten) vorzuhalten sind, ergibt sich aus der Nachfrage, die sich in der Anzahl der gleichzeitigen Verbindungswünsche (in der Busy Hour) aller Dienste ausdrückt. Sie wird im Modell gleichmäßig über die Standorte dieser Einrichtungen verteilt. Bzgl. des DNS erfolgt die Dimensionierung ausschließlich auf Basis der sprachspezifischen Aufgaben (Auflösung E.164 Adressierung, URL, ...). Zum einen ist der Umfang der Nachfrage hinreichend groß, um derartige Einrichtungen auszulasten. Zum anderen müssten zur Bestimmung der ge-

samten Nachfrage weitaus umfangreichere Informationen über die Inanspruchnahme des DNS durch andere Dienste in der Hauptverkehrsstunde herangezogen werden, von denen nicht zu erwarten ist, dass sie vorliegen. Der Ansatz sprachspezifischer DNS ist daher pragmatisch und hinreichend für die Bestimmung der Kosten der Sprachterminierung.

6.3.2 Funktionselemente für Sprache (sog. spezifische Funktionselemente)

Das hier beschriebene Modell soll die Kosten von Sprachterminierung und ggf. Originierung bestimmen. Dabei können Kosten sowohl für eine TDM-basierte Zusammenschaltung des Breitbandnetzes als auch eine IP-basierte Zusammenschaltung berechnet werden.

Sprachverkehr wird im NGN Kostenmodell in der Kontrollschicht durch einen Softswitch gesteuert, der die Sprachanforderung annimmt und kontrolliert, ob im IP basierten Transportnetz ausreichend Kapazitäten vorliegen. Er behandelt sowohl den internen Verkehr als auch den Verkehr von und zu Zusammenschaltungspunkten. D.h. als gemeinsames Netzelement wird ein durch die Call Attempts (Verbindungsaufbauwünsche) gesteuerter Softswitch benötigt, der typischerweise einen SIP Server integriert. Dabei ist der Softswitch entsprechend seiner Auslastung durch Call Attempts zur Busy Hour (BHCA) des Sprachverkehrs zu dimensionieren. Die Dimensionierung des Transportnetzes erfolgt hingegen zur Gesamt-Busy-Hour des NGN, die zeitlich nicht übereinander liegen müssen.

Da zur Realisierung der beiden Arten von Zusammenschaltung (leitungsvermittelnd zu PSTN/ISDN oder PLMN¹¹⁴ bzw. paketvermittelnd zu IP bzw. anderen NGN) unterschiedliche Netzelemente erforderlich sind, werden beide implementierten Varianten hier vorgestellt:

6.3.2.1 TDM-basierte Zusammenschaltung

Es werden folgende Netzelemente vorgesehen:

- Softswitch (mit integriertem SIP-Server)
- Mediagateway
- Mediagateway Controller

114 PLMN steht für Public Land Mobile Network.

Das Mediagateway muss an allen für TDM-basierte Zusammenschaltung vorgesehenen Standorten installiert werden. Es wandelt den VoIP Datenstrom in den klassischen TDM 64 kbit/s ISDN Sprachverkehr je Kanal und übergibt parallel die zugehörigen CSS7 Steuerinformationen, die vom Mediagateway Controller zur Interaktion der beiden Netze und zur Steuerung der einzelnen Verbindungen generiert bzw. verarbeitet werden. Neben dem Übertragungsvolumen treibt die Anzahl der IC-Ports die Kosten des Mediagateways.

Die Funktionen des Softswitches und des Mediagateway Controllers werden typischerweise remote durch zentral angesiedelte Systeme ausgeführt. Sie werden durch die spezifischen BHCA in Ihrer Kapazität dimensioniert (Softswitches: Gesamter Sprachverkehr, Media Gateway Controller: Nur TDM Interconnection Verkehr (kommend und gehend¹¹⁵)).

6.3.2.2 IP-basierte Zusammenschaltung (Sprache)

Es werden folgende Netzelemente vorgesehen:

- Softswitch (mit integriertem SIP-Server)
- Label Edge Router (am Netzübergang)
- Session Border Controller (SBC)¹¹⁶

Bei einer IP-basierten Zusammenschaltung entfällt die Notwendigkeit eines Mediagateways. Der am Standort vorgesehene Label Edge Router (LER) erfüllt die Aufgabe der Netzübergabe. Sofern die Anzahl der für Interconnection benötigten Ports nicht hinreichend ist, müssen weitere Router installiert werden.

Der Session Border Controller übernimmt diverse Verwaltungs- und Signalisierungsaufgaben und steuert die Verbindung (Session) am Netzübergang, u.a. Aufgaben für die Abrechnung und die Signalisierungsanpassung, und steht anstelle des Mediagateway Controllers. Er kann als Vorläufer einer IMS Implementierung angesehen werden, die auch die Ressourcenverwaltung und Steuerung durchführt. Diesbezüglich ist er mit der Funktion eines Bandwidth Brokers vergleichbar. Der SBC könnte wie der Mediagateway Controller zentral installiert werden. Der Session Border Controller zieht jedoch ähnlich zum BRAS den durch ihn gesteuerten Verkehr auf sich und verlängert dadurch Wege und Laufzeiten und vergrößert den Paket Loss. Wir halten daher das Konzept der

¹¹⁵ Auch wenn, wie bei einer pure LRIC Betrachtung, der Terminierungsverkehr entfällt, werden die Mediagateways und Mediagateway Controller für die andere Verkehrsrichtung (Originierung) benötigt und müssen entsprechend niedriger dimensioniert werden.

¹¹⁶ Die Funktion des SBC kann auch in der Einrichtung des Softswitches oder im LER integriert sein.

Zentralisierung des SBC für die Modellierung eines effizienten Netzes eines marktbeherrschenden Anbieters für ungeeignet. Der SBC ist daher im vorliegenden Modell an den Standorten der IP-Netzübergänge angesiedelt, als eigenständige Prozessorkarte in den LER. Er wird über die Anzahl der parallelen Sessions zur Busy Hour dimensioniert.

6.3.3 Grafische und tabellarische Darstellung der Funktionselemente und Kostentreiber im Breitbandnetz

In der nachfolgenden Abbildung 6-3 sind sowohl die allgemeinen als auch die sprachspezifischen Funktionselemente dargestellt, die im vorliegenden Kostenmodell berücksichtigt werden.

Abbildung 6-3: Einrichtung der Kontrollschicht

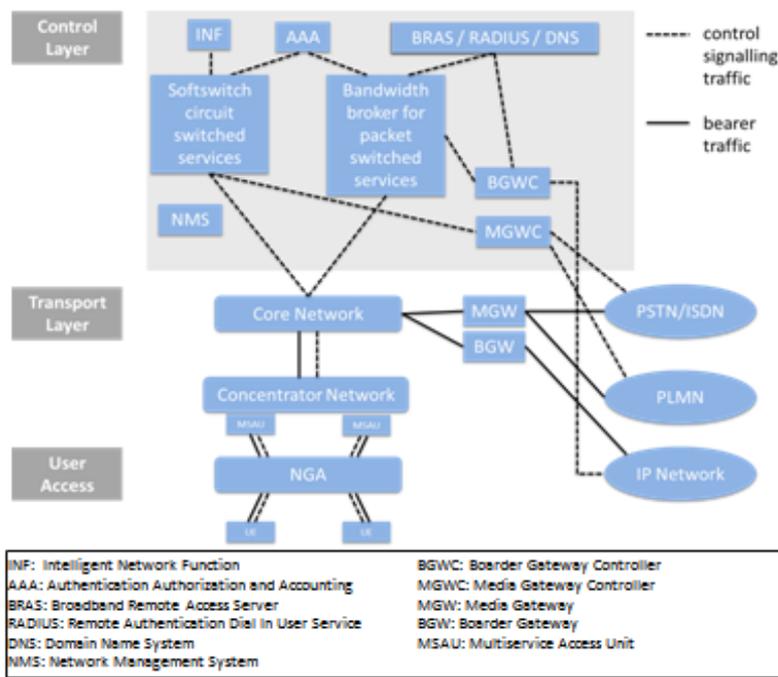


Tabelle 6-2 gibt eine zusammenfassende Übersicht der Kontrollsysteme einschließlich der Kostentreiber der Einrichtungen der Kontrollschicht. Dabei ist in der zweiten Spalte kenntlich gemacht, ob es sich um eine dezentrale Einrichtung wie das Media Gateway handelt, welches ebenso eine Transportfunktion ausübt und daher standortspezifisch zu modellieren (dimensionieren) ist.

Tabelle 6-2: Kostentreiber der Einrichtungen der Kontrollschicht

Funktionseinheit	zentral/dezentral	Standort	Kostentreiber
Softswitch	zentral	begrenzte Anzahl an Kernnetzstandorten (Input Parameter Anzahl Standorte)	BH Verbindungswünsche sämtlicher voice calls im Netz (egal ob IC oder ON Net traffic))
Media Gateway	dezentral	An allen Kernnetzstandorten, an denen IC mit Netzen alter Systeme (PSTN/ISDN, PLMN) angeboten wird	BH-Verkehr für TDM-IC und entstehende Anzahl von STM-1/E1 Ports
BRAS	zentral	An allen Kernnetzstandorten (modellendogen, an allen IP-PoPs))	BH Breitbandsitzungswünsche / parallele Sessions
IP Gateway (LER)	dezentral	An allen Standorten, an denen Interconnection zu IP-Netzwerken angeboten wird	BH IP Verkehr für IP Interconnection (Peering/Transit)
DNS server	zentral	begrenzte Anzahl an Kernnetzstandorten (Inputparameter Anzahl DNS Standorte)	BH Verbindungswünsche Voice
Session Border Controller (SBC)	dezentral	begrenzte Anzahl an Kernnetzstandorten (definiert über die Zahl der VoIP IC-Standorte)	BH Verbindungswünsche (parallel) (für VoIP IC-calls)
Mediagateway Controller	zentral	begrenzte Anzahl an Kernnetzstandorten (Input Parameter Anzahl Standorte)	BH Verbindungswünsche (voice TDM IC-calls)
Bandwidth Broker	zentral	im Element Manager enthalten	Skaliert mit den Kosten der Netzelemente

7 Systemzuweisung, Investitionswertbestimmung und Kostenberechnung

Aufgabe des Kostenmodells ist die Bestimmung effizienter Kosten eines NGN Verbindungsnetzes, indem ein dem Kommunikationsbedarf der Teilnehmer entsprechendes Netz nach effizienten Kriterien (unter Randbedingungen wie Verfügbarkeit oder Ausfallsicherheit) aus vorgegebenen Netzelementen dimensioniert und bepreist wird. Da es eine Vielzahl von Herstellern mit jeweils in ihren Eigenschaften leicht unterschiedlichen Systemen und mit unterschiedlichen Preisphilosophien gibt, haben wir aus unserer Kenntnis und aus den Ergebnissen von Marktbefragungen ein generisches Equipment abgeleitet, das den Durchschnitt des aktuell verfügbaren Angebots am oberen Rand des Spektrums (moderner, zukunftsorientierter Systeme) abbilden soll, und diese mit marktäquivalenten Preisen versehen. Dieses Equipment wird nach den beschriebenen Netzdesign-Prinzipien ausreichend dimensioniert in den verschiedenen Netzebenen eingesetzt, seine Investitionswerte werden anschließend bestimmt und die sich daraus über die Zeit ergebenden Kosten abgeleitet.

7.1 Ableitung eines generischen Equipments für Einrichtungen des logischen und physikalischen Netzes

7.1.1 Systemparameter

Im Vordergrund steht hier die netzelementbezogene Bestimmung von Investitionswerten. Gegenstand ist daher die Zuweisung von Einrichtungen zur Befriedigung der Nachfrage auf den Knoten und Kanten. Unter Rückgriff auf die zugehörigen Preisparameter der Systeme und Komponenten können dann Investitionswerte bestimmt werden. In einem weiteren Schritt ist es unter Einbeziehung von modellendogen bestimmten Routingfaktoren, die die Inanspruchnahme von Netzelementen durch bestimmte Dienste ausdrücken, möglich, erste Schritte der Kostenzurechnung zu vollziehen (hier am Beispiel der Sprachzusammenschaltung).

Insbesondere im Layer 1 steht eine Vielzahl von Möglichkeiten bei der Systemzuweisung zur Auswahl, die unterschiedliche Kosten sowohl im CAPEX als auch im OPEX, aber auch unterschiedliche Werte für die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Netzes und damit der zugehörigen Dienste verursachen. Diese Freiheitsgrade stellen ein Charakteristikum des hier spezifizierten TELRIC-Referenzmodells dar, welches nicht von einer konkreten Technologie abhängt, sondern ausreichend flexibel ist, um den Einsatz verschiedener Technologien zu vergleichen und sich auch an die technische Entwicklung anpassen zu lassen.

Zu diesem Zweck haben wir einen generischen Ansatz für die Modellierung der Systemzuweisung implementiert. Ausgangspunkt im Modell ist dabei die Auswahl der jeweiligen Technologie im Layer 1 auf Basis von Inputparametern (getrennt für Konzentrations- und Kernnetz). Auf Basis dieser vom Modellanwender getroffenen Vorauswahl greifen dann die nachfolgend darzustellenden Algorithmen für die Systemzuweisung für die Schichten 3, 2 und 1 sowie die passiven Elemente auf Schicht 0 (Layer 0). Ausgangsdaten für die Systemzuweisung bilden die

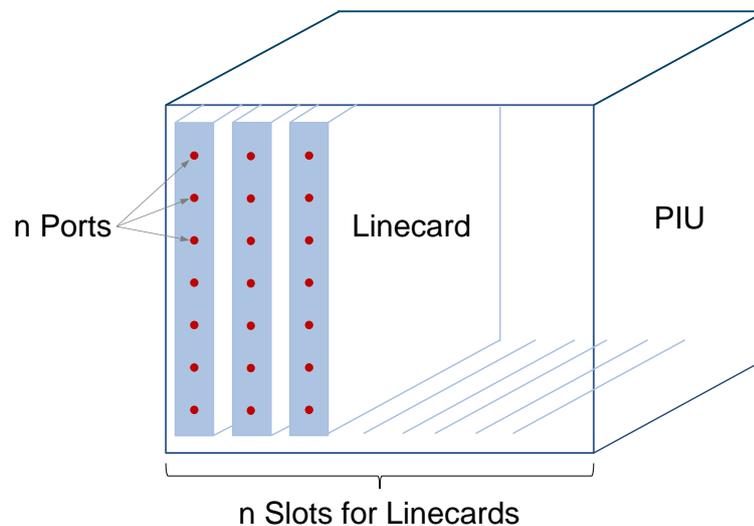
- Hierarchie und Struktur des logischen Netzes
- Hierarchie und Topologie des physikalischen Netzes
- Verkehrsnachfrage in den Knoten und Kanten
 - des logischen Netzes
 - des physikalischen Netzes

... abgeleitet aus den Verkehrsnachfragen der MPoP in Verbindung mit dem im Modell implementierten Routing der Dienste.

Für die Systemzuweisung sind im Rahmen der Modellparametrierung aus der Menge verfügbarer Einrichtungen generische Systemfamilien abzuleiten, die als Inputparameter in das Modell Eingang finden. Diese technologieabhängigen Systemfamilien werden dabei spezifiziert hinsichtlich der

- Kapazität der Einrichtung (PIU – Plug In Unit)
- Typen und maximale Anzahl von Linecards
- Type und Anzahl der Ports pro Linecard
- Platzbedarf im Rack (Anzahl PIU pro Rack)

Abbildung 7-1: Plug-In-Unit (PIU) mit Schnittstellenkarten und Ports



Das Aufbauprinzip der Einrichtungen ist im Grundsatz unabhängig davon, um was für eine Einrichtung es sich konkret handelt. Sowohl Einrichtungen des logischen Netzes (Ethernet Switches oder IP Router) als auch Einrichtungen des physikalischen Netzes (unabhängig von der Layer 1 Technologie) folgen diesem Prinzip.

Für Einrichtungen werden Linecards mit unterschiedlichen Portzahlen berücksichtigt (n Typen von Linecards). Die Portgröße (Übertragungsgeschwindigkeit je Port) ist dabei bezogen auf die jeweilige Linecard einheitlich. Für die Layer 2 und Layer 3 Einrichtungen sind die Linecards mit den PIU je Layer beliebig kombinierbar, weil es sich immer um Ethernet Schnittstellen handelt. Diese Flexibilität ist bei den Layer 1 Einrichtungen nicht gegeben. Vielmehr sind die Linecards nur für bestimmte PIUs ein und derselben Technologie verwendbar¹¹⁷. Diese Einschränkung wird im Modell bei der Systemzuweisung berücksichtigt.

Neben den Kapazitäten sind für die Systeme und ihre Komponenten auch die zugehörigen Preise, der Preisverfall p.a. und die Abschreibungsdauer über Inputparameter vorzugeben. Der erste Parameter bezieht sich auf die Investitionswertbestimmung, die beiden letzteren sind für die Kostenrechnung relevant.

¹¹⁷ NG-SDH, OTN und WDM haben jeweils technologieabhängige Schnittstellenkarten, sowohl zu den logischen Systemen als auch zur Glasfaser.

Physikalisches Netz

Bei der Ausgangsparametrierung der Komponenten des Transportnetzes (Layer 1, physikalisches Netz) ist zu berücksichtigen, dass es im Grundsatz relativ geringe Unterschiede zwischen den Systemen bzgl. ihrer Leistungsfähigkeit gibt (ein STM-4 Knoten überträgt immer dieselbe Datenmenge). Die Komponenten unterscheiden sich hinsichtlich ihres Platzbedarfes oder bzgl. der Anzahl Schnittstellen, die ein System aufnehmen kann und bzgl. der Anzahl Ports je Schnittstellenkarte. Hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der Einrichtungen ist darauf zu achten, dass – entsprechend dem Grundsatz der Effizienz, die leistungsfähigsten Systeme Anwendung finden. Methodisch kann der Preis für die Systeme über einen gemittelten Portpreis abgebildet und in marktvergleichbare Relationen gesetzt werden. Auf diese Weise lassen sich unterschiedliche, am Markt verfügbare Systeme hinsichtlich ihres Preises vergleichbar machen.

Für die Modellimplementierung wurde die Ausgangsparametrisierung auf Basis der Benchmark Datenbank der WIK-Consult GmbH über europäische Vergleichswerte vorgenommen, die aus Marktbefragungen und anderen Quellen gespeist wird. So wurden insgesamt 17 verschiedene Einrichtungen und 78 zugehörige LineCards in das Modell eingepflegt und bilden die Grundlage für die Systemzuweisung bei den Modellberechnungen. Bei den Transportsystemen sind die folgenden marktgängigen Technologien berücksichtigt, die je nach Anwendungsfall und Verkehrsmengen unterschiedlich effizient sind.

- SDH elektrisch¹¹⁸
- SDH optisch
- CWDM / DWDM
- OTN

Die Technologiewahl im Modell wird parametergesteuert vorbestimmt. Durch komparativ statische Vergleiche kann dann die effizienteste Technologie für den konkreten Anwendungsfall ermittelt werden.

Die passive Infrastruktur des physikalischen Netzes (Glasfaserkabel, Leerrohr mit Rohrzügen, Graben (Trasse)) wird durch Glasfaserkabel marktüblicher Größen (Faserzahl) und Preise sowie durch eine mit einem Leerrohr (incl. vierfach Rohrteiler) versehene Standardtrasse dargestellt. Die Tiefbaukosten je m sind ein marktüblicher Durchschnittswert. Die Trassenlänge wird durch Routing der Trassen entlang der bestehenden Straßen bestimmt und als Tabelle in das Modell eingegeben. Auf diese Weise wird

¹¹⁸ Elektrische Schnittstellenkarten kommen im Modell ausschließlich Standort intern zur Anbindung der logischen an die Layer 1 Einrichtung zur Anwendung.

man der gebirgigen Topologie Österreichs besser gerecht als bei einer Längenbestimmung über die Luftlinienentfernung verbunden mit einem Umwegfaktor¹¹⁹.

Logisches Netz

Die Vorgehensweise bei den Systemen des logischen Netzes (Layer 2: Ethernet / Layer 3: Label Edge und Label Switch Router) erfolgt im Grundsatz analog zu denen des physikalischen Netzes. Für die Ausgangsparametrierung wurden Systeme unterschiedlicher Leistungsfähigkeit ausgewählt, wie sie im Markt zu finden sind, und innerhalb ihrer Gruppen über die Leistungsfähigkeit und Hersteller gewichtete Mittelwerte gebildet. Bei der Spezifikation der Systemfamilien ist zu berücksichtigen, dass es keinen linearen Zusammenhang zwischen Leistungsfähigkeit der Systeme und dem Preis für Übertragungssysteme gibt, sondern dass sich der Preis unterproportional zur Leistungssteigerung entwickelt (etwa analog einer Wurzelfunktion). Die Systeme unterschiedlicher Leistungsfähigkeit finden, abhängig von der Nachfrage nach Bandbreite durch die Nutzer des Netzes, auf den verschiedenen Netzebenen (Ethernet Ebene 0 - 2, IP Router Ebene 3 - 5) ihren Einsatz (modellendogene Auswahl der Systeme nach Maßgabe der zu bewältigenden Bandbreiten). In der Ausgangsparametrierung sind derzeit 9 verschiedene Einrichtungen und 43 LineCards in das Modell eingepflegt und bilden die Grundlage für die Systemzuweisung in Layer 2 und 3 bei den Modellberechnungen.

Im Grundsatz gibt es derzeit auf den Ebenen des logischen Netzes eines NGN jeweils nur eine Technologie, auf Layer 2 Ethernet und auf Layer 3 IP-Router mit MPLS. Entsprechend der neueren Weiterentwicklung für die Sicherung der Transportverbindungen ist mit MPLS-TP eine Funktion entstanden, die eine ebenso schnelle Ersatzschaltung von Verbindungen erlaubt wie die gängigen Transportnetztechniken (< 50 ms). Diese Funktion kann in Systemen beider Schichten (2 und 3) eingesetzt werden. Dadurch entsteht insbesondere für Netze, bei denen alle Dienste in Layer 2 und Layer 3 transportiert werden, die Option auf die Systeme des Transportnetzes zu verzichten. Das Modell berücksichtigt dies durch eine entsprechende Option für jede der beiden Netzschichten, faktisch also jeweils für das Konzentrations- und das Kernnetz. Die Systeme (Switches und Router) bleiben grundsätzlich dieselben, die ergänzende Funktion wird durch erhöhte Kosten abgebildet¹²⁰.

Kontrollschicht

Die Kontrollschicht eines NGN erlaubt eine relativ große Wahlmöglichkeit in der Ansiedlung von Funktionen für die Steuerung des Netzes (siehe auch Abschnitt 6). So mögen

¹¹⁹ Aber auch diese zweite Variante ist über Parameter wählbar und bestimmt dann die Entfernungen endogen aus der Differenz der Geokoordinaten der Standorte.

¹²⁰ Dazu muss die Parametrierung der Investitionswerte für das Layer2/3 Equipment entsprechend angepasst werden.

die Funktionen eines BRAS in denen eines IP-Label Edge Routers integriert oder separiert sein. Der RADIUS Server für die Steuerung des Zugangs zum Netz kann separat zentral oder integriert in den BRAS angesiedelt sein. Die Funktion des Media Gateway Controllers mag in die Softswitches integriert oder separiert sein. Je mehr Funktionen in ein Gerät integriert sind, desto mehr handelt es sich erfahrungsgemäß um proprietäre Systeme, die den internationalen Standards typischerweise nur in ihren Schnittstellen nach außen genügen. Für einen generischen Modellierungsansatz wurden die Funktionen jeweils einzeln und separiert bepreist. Auf diese Weise ist es möglich, eine Dimensionierung dieser Einrichtungen unter Rückgriff auf ihren spezifischen Kostentreibern vorzunehmen. Derartige Systeme sind im Markt verfügbar, wenig proprietär und genügen den internationalen Standards. Für die Ausgangsparametrierung wurde auf die Mittelwerte der durch die Marktteilnehmer beschriebenen leistungsfähigeren Systeme zurückgegriffen, weil es hier um die Dimensionierung eines nationalen Netzes geht und nicht um das Netz eines mittelgroßen Wettbewerbers mit dessen Skalennachteilen.

Bei der Ausgangsparametrisierung wurde eine einzige Ausnahme bei der Trennung von Einrichtungen nach Funktionalitäten vorgenommen, und zwar bei den Funktionen des BRAS (Broadband Remote Access Server) und des RADIUS (Remote Authentication Dial In User Service), die beide den Zugang der Endkunden zu den gebuchten Diensten des Netzes steuern (diese Vorgehensweise wird von vielen Netzbetreibern gewählt und ist auch von der Aufgabenstellung naheliegend). Für die Zuordnung des Equipmentpreises für diese kombinierte Funktion erachten wir es als sinnvoll, einen Mittelwert aus Angaben der Marktteilnehmer für beide Funktionen für Systeme am oberen Rand des marktüblichen Leistungsspektrums zu wählen.

Generisches Equipment

Insgesamt besteht die für die Modellierung zugrunde gelegte Systemlandschaft nicht aus Komponenten des Herstellers x für die Systemfunktion y und des Herstellers a für die Funktion b – dies wäre in der Praxis voraussichtlich auch nicht lauffähig –, sondern sie besteht aus Komponenten eines hypothetischen Herstellers, der diese in dieser Form produzieren könnte, sofern er denn alle seine Systeme heute neu konzipieren, auf den Markt bringen und zu marktüblichen Preisen verkaufen würde.

Der Ansatz einer generischen Systemlandschaft stellt darauf ab, von der Systemlandschaft eines konkreten Betreibers zu abstrahieren und Ineffizienzen durch veraltete Strukturen und Komponenten zu vermeiden.

7.1.2 Preisparameter

Die in das Modell als Inputparameter einzupflegenden Preisangaben sollen nach Maßgabe des LRIC Kostenstandards auf Basis von MEA, modern equivalent assets, gemacht werden. Die Investitionswerte sollen sowohl die Planung, Beschaffung, Installati-

on und Inbetriebnahme umfassen. Ferner geht der Modellierungsansatz davon aus, dass Funktionalitäten des equipmentspezifischen Netzmanagements ebenfalls in den Einrichtungen der Schichten 1, 2 und 3 und ihren Preisen enthalten sind.

Sofern die in das Modell einfließenden Preisparameter weniger umfassend sind als hier aufgeführt, ist bei der Gesamtkostenbestimmung darauf zu achten, diese Investitionen anderweitig (außerhalb des Modells) zu berücksichtigen.

7.2 Systemzuweisung und Investitionswertbestimmung für das logische Netz

Hierarchie und Struktur des logischen Netzes sowie Hierarchie und Topologie des physikalischen Netzes sind grundlegend für die Beziehungen zwischen den Knoten und damit für die Zuweisung von Ports und sich daraus ableitenden Schnittstellenkarten und Geräteeinschüben (Plug-In-Units, PIU). Aus der Positionierung eines Knotens innerhalb der Netzhierarchie (siehe Abschnitt 4.1) kann dabei die Struktur seiner Verkehrsbeziehungen abgeleitet werden (unter Rückgriff auf die logischen Netzstrukturen und die Topologie).

Für das logische Netz können vereinfachend folgende Grundtypen bei der Systemzuweisung unterschieden werden:

- MPoP/Ebene 0 Einrichtung
- Ebene 1/Ebene 2 Einrichtung
- Ebene 3 Einrichtung
- Ebene 4/Ebene 5 Einrichtung

Für das physikalische Netz ergeben sich die Grundtypen aus der Topologie, die folgende Formen aufweisen kann:

- Ring (Netzsegmente 0-1, 1-2, 0-2, 3-4, 4-5, 3-5)
- Vermaschung (oberste Netzebene 5-5)

Da es sich bei der MPoP/ Ebene 0 Einrichtung um das Teilnehmer anschließende Equipment handelt, ist die zu Grunde liegende Anschlusstechnologie ein zentraler Bestimmungsfaktor für die Systemzuweisung. Um diese Technologieabhängigkeit herauszuarbeiten und auch die gewählte Vorgehensweise zu begründen, wird auf diesen Aspekt im ersten Unterabschnitt 7.2.1 genauer eingegangen. Daran schließen sich die

Darstellungen für die Systemzuweisungen der gerade dargestellten Grundtypen von Einrichtungen an (Abschnitt 7.2.2 bis 7.2.5).

7.2.1 Teilnehmeranschließendes Equipment im MPoP – Systemzuweisung und Abgrenzung gegenüber dem NGA

Der MPoP wurde als Standort der untersten Netzebene des Konzentrationsnetzes definiert. Wie eingangs (Abschnitt 2.5) gezeigt wurde, ist es aufgrund der Verschiedenartigkeit der NGA-Architekturen nicht möglich, die bisherige Demarkationslinie am HVt anhand des Kriteriums der dedizierten Anschlussleitung zu definieren: Je nach NGA-Architektur endet die dedizierte Anschlussleitung näher oder entfernter vom Endkunden. Darüber hinaus besteht Konsens, dass flächendeckend nicht von einer einheitlichen NGA-Architektur ausgegangen werden kann. Mit dem MPoP konnte jedoch eine Netzebene definiert werden, die auf alle NGA-Architekturen gleichermaßen anwendbar ist. Für sie gilt, dass ab diesem Punkt

- **netzseitig immer** eine Aggregation, derzeit **auf Basis von Ethernet¹²¹**, vorgenommen wird sowie
- **kundenseitig eine Dedizierung** der Anschlussleitung **vorliegen kann** (FttEx und FTTH P2P).

Hinsichtlich der Dimensionierung der Ethernet-Einrichtungen auf der untersten Netzebene ergeben sich dennoch kostenrelevante Unterschiede, die der jeweiligen NGA-Architektur und deren Grad an Vorkonzentration des Verkehrs zuzuschreiben sind.

Um das Kostenmodell für das Konzentrations- und IP-Kernnetz neutral gegenüber den zu Grunde liegenden NGA-Architekturen zu formulieren, sind entsprechende Annahmen zu treffen.¹²² Diese betreffen die Berücksichtigung der Nutzerschnittstellen auf der Eingangsseite der Ethernet-Einrichtung und wirken sich kostenseitig in folgenden Dimensionen aus:

- Die Anzahl der Nutzerschnittstellen (Ports) hängt von der zu Grunde liegenden NGA-Architektur ab (bei Dedizierung (FTTH P2P) 1 Port pro Nutzer, ansonsten technologieabhängige Konzentration). Die Kosten für die Nutzerschnittstellen entstehen pro Karte, die mehrere Ports aufweist.

¹²¹ Auch wenn hier explizit Ethernet als derzeit relevante Technologie benannt wird, soll an dieser Stelle nochmals betont werden, dass das Modell auch für andere Technologien zugänglich ist.

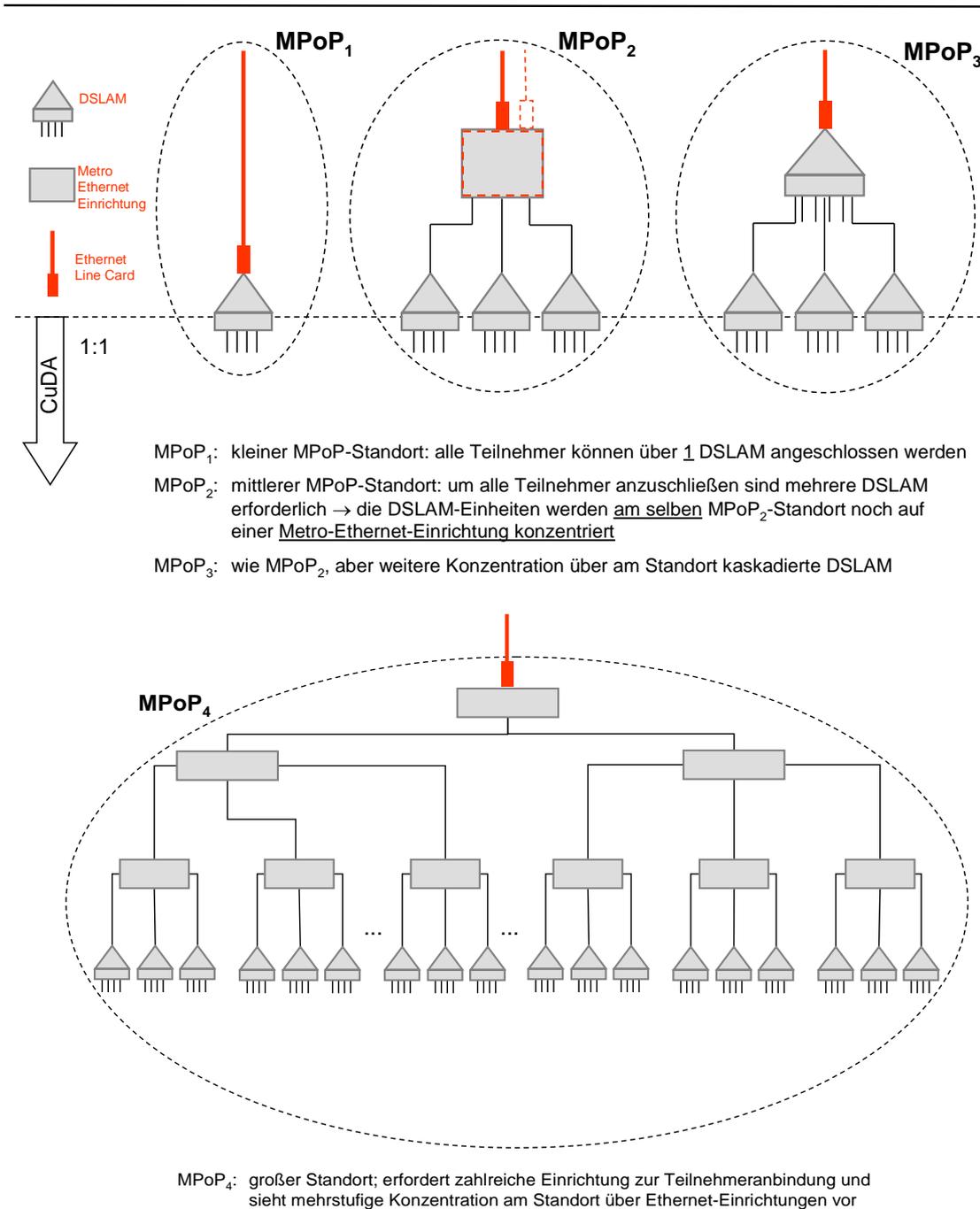
¹²² Letztlich sollen die Kosten für Konzentrationsnetze für die verschiedenen NGA Architekturen vergleichbar sein. Darauf zielt die Bezeichnung „neutral“ ab.

- Die Kapazität einer Ethernet-Einrichtung sieht eine maximale Anzahl von Schnittstellenkarten vor. Die Kosten für Ethernet-Einrichtungen an einem Standort werden daher (u.a.) von der Anzahl der Nutzerschnittstellen bestimmt. Jede Einrichtung hat ferner Kosten für die zugehörigen Schnittstellenkarten zur die Anbindung an die nächst höhere Netzebene (bzw. für Querverbindungen oder für die Anbindung an Interconnectionpunkte). Die Kosten pro Karte entstehen in Abhängigkeit von ihrer Kapazität.
- Die Ethernet-Einrichtungen werden in sogenannte Racks (Technikschränke) eingeschoben. Da die Zahl der Nutzerschnittstellen die Zahl der Ethernet-Einrichtungen treibt, treibt sie darüber hinaus auch die Anzahl der benötigten Racks (Kosten pro Rack).

Die nachfolgenden Grafiken illustrieren die Anforderungen an das teilnehmeranschließende Equipment am Beispiel der DSL-Technologie (Einsatz von DSLAM) für unterschiedlich große MPoPs. Ein analoges Bild ergibt sich bei FTTH P2P. Dort wird „lediglich“ die CuDA durch eine Glasfaser sowie der DSLAM durch den Ethernet-Konzentrator ersetzt.

Aus Abbildung 7-2 und Abbildung 2-5 wird deutlich, dass die Anzahl der anzuschließenden Teilnehmer ein zentraler Kostentreiber für das am MPoP vorzuhaltende Equipment darstellt. Bei größeren Standorten wird es – bedingt durch die begrenzten Teilnehmerzahlen, die an eine Einrichtung (DSLAM oder Ethernet Switch bei FTTH P2P) am MPoP angeschlossen werden können – notwendig, zusätzliche konzentrierende Einrichtungen an diesem Standort vorzuhalten. Dies ermöglicht eine Zusammenfassung der von den Nutzern verursachten Verkehrsnachfrage, um einen bestmöglich vorkonzentrierten Verkehrsstrom an den übergeordneten Standort zu übergeben.

Abbildung 7-2: Teilnehmeranschließendes Equipment am Beispiel der DSL-Technologie bei unterschiedlich großen MPoP-Standorten



Hinsichtlich der Kostenzurechnung wurde traditionell das Kriterium der Dedizierung herangezogen, um darüber zu entscheiden, ob die Kosten der Netzelemente dem Teilnehmeranschlussnetz oder dem Verbindungsnetz zugerechnet werden sollten. **Mit der Wahl des MPoP als unterste Netzebene sollten alle NGA-Architekturen und dar-**

aus nutzergetriebenen Kosten vernachlässigt werden, um die Kosten des Konzentrationsnetzes unabhängig von der zu Grunde liegenden NGA-Architektur auszuweisen. Für die Kostenbestimmung des Konzentrationsnetzes bedeutet dies, dass nicht die Zahl der Nutzer, sondern lediglich das von ihnen ausgelöste Verkehrsvolumen (und dessen Zusammensetzung mit Blick auf die Verkehrsklassen) Berücksichtigung finden soll. Für Kostenvergleiche über verschiedene NGA-Architekturen hinweg werden daher nur die Kosten für die ausgehenden Schnittstellenkarten und den zugehörigen Switch berücksichtigt¹²³. Weitere vorkonzentrierende Systeme, die von der jeweiligen NGA Technologie abhängen, bleiben zunächst außen vor.

Zur Bestimmung der Kosten im Rahmen des Netzplanungsmodule gehören neben den Schnittstellen in das weiterführende Konzentrationsnetz auch die Schnittstellen zur Ausleitung des Verkehrs an andere Netzbetreiber auf der untersten Netzebene, d.h. für den Bitstrom am MPoP (vULL).

Vor dem Hintergrund der Vollständigkeit und seiner Anwendung im Kostenmodul wird jedoch nachfolgend die Investitionswertbestimmung des teilnehmeranschließenden Equipments, welches aus den oben genannten Vergleichsgründen nicht dem hier definierten Konzentrationsnetz zugerechnet werden sollte, beschrieben. Dieser Wert fließt nicht in die Investitionswertbestimmung, abgeleitet aus der Netzplanung des Modells ein, sondern ggf. in die Bestimmung der Terminierungsentgelte im Kostenmodul auf Basis von LRIC. (Für die Bestimmung der pure LRIC entfällt der Wert jedoch durch Subtraktion gleich wieder, weil das Anschlussnetz typischerweise unabhängig von der Höhe des Terminierungsverkehrs und nur abhängig von seinen technischen Möglichkeiten (maximal) dimensioniert wird.)

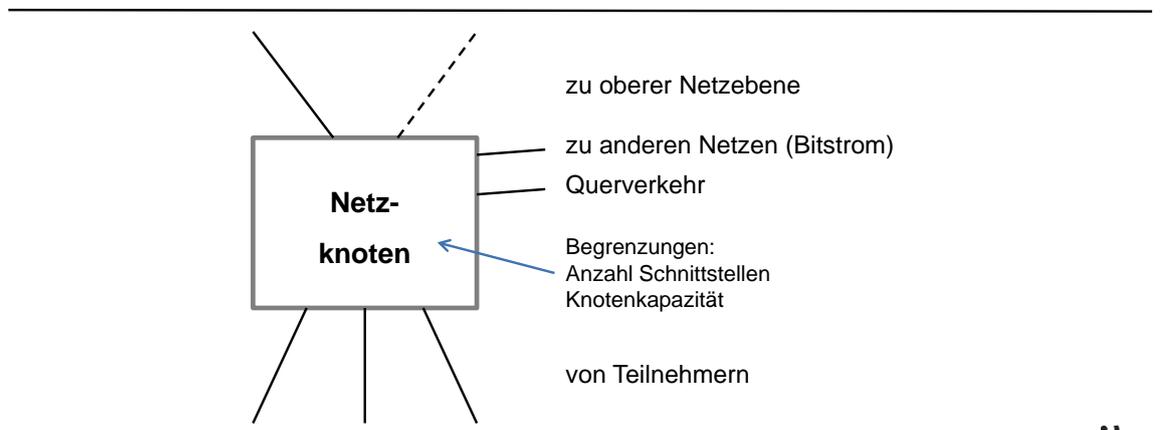
7.2.2 Ebene 0 – Systemzuweisung

Für die Vorschaltung von konzentrierender Anschlusstechnik gehen wir von einer einfachen, zukunftssicheren und effizienten Ethernet Technik aus, wie sie weitverbreitet im Markt verfügbar ist und auch im Mix über verschiedenen Hersteller sowohl im Hinblick auf die Teilnehmerseite (herstellerunabhängiges Customer Premise Equipment (CPE)) als auch das Konzentrationsnetz verwendet werden kann. Die Wahl dieser Technik unterstellt im Anschlussnetz ein effizientes NGA Netz mit einer Teilnehmerschnittstelle bis 1 Gbit/s Anschlussgeschwindigkeit, wie sie derzeit faktisch nur in wenigen Fällen vorliegt. Ineffizientere Vorformen von Anschlussnetzen lassen sich, sofern regulatorisch zum Regulierungszeitpunkt als effizienter angesehen, gleichfalls vorschalten.

¹²³ An dieser Stelle sei nochmals betont, dass hiermit keine regulatorische Empfehlung oder Festlegung verbunden ist, sondern eine pragmatische Abgrenzung, die sinnvolle Kostenvergleiche erlaubt.

Im Grundsatz wird der von den Teilnehmern kommende Verkehr über einen Port je Teilnehmeranschluss in den Systemen des MPoP aufgenommen. D.h. die Menge der Teilnehmerschnittstellen definiert zunächst die Menge der benötigten Switches über die Anzahl der Ports je Schnittstellenkarte und die maximale Zahl der Schnittstellenkarte je Switch (vgl. auch Abbildung 7-1). Nebenbedingung für die Auswahl des Switches ist der maximal zur busy hour von den aggregierten Teilnehmern entstehende Summenverkehr, der von dem Switch weitergeleitet werden muss. Ggf. muss mehr als ein Switch für die Aufnahme der Kundenschnittstellen bereitstehen, die dann auf einen übergeordneten Switch kaskadiert werden. Nur die Switches einschließlich der Schnittstellenkarten für ihre Kaskadierung, nicht jedoch die teilnehmerseitigen kundendedizierten Ports, gehen in den Investitionswert für die Bestimmung der LRIC ein.

Abbildung 7-3: Dimensionierung eines Netzknotens der Ebene 0



Zum Investitionswert gehören gleichfalls die Schnittstellen für Bitstrom am MPoP (vULL) und für den Querverkehr zu anderen Netzknoten derselben Ebene (hier 0), die ab der Überschreitung parametergesteuerter Schwellwerte unmittelbar zwischen den Knoten eingerichtet werden.

Die Verkehrsströme aus dem Breitbandanschlussnetz und die zugehörigen Karten für die Schnittstellen in den Ethernet-Einrichtungen des MPoP werden ausschließlich auf der Basis der Annahmen zu den Verkehren der angeschlossenen Nutzer modelliert.

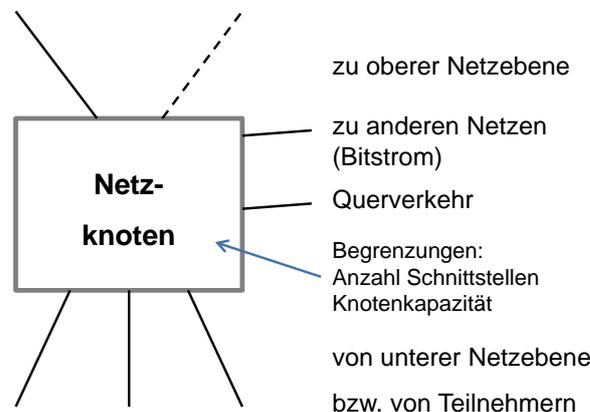
7.2.3 Ebene 1 und Ebene 2 – Systemzuweisung

Metro-Konzentratoren bzw. Metro-Switches (im folgenden Metro-Einrichtungen) werden in einem zwei- oder dreistufigen Konzentrationsnetz sowohl in Standorten der mittleren als auch der oberen Ebene installiert.

Die Berechnung der Kosten unterscheidet sich von der Kostenberechnung der MPoP-Einrichtungen der untersten Netzebene nur dadurch, dass an einer Einrichtung der Ebene 1 oder 2 keine Nutzer direkt angeschlossen werden. Die Nutzer werden entweder von den zugeordneten anderen Knoten des Clusters über das Transportnetz zugeführt oder aber im Ebene 1 oder 2 Knotenstandort auf einem separaten, vorgeschalteten Ebene 0 Knoten konzentriert¹²⁴.

In einem Ebene 2 Knotenstandort entfällt der Ebene 1 Knoten. Es wird mit dem Ebene 2 Knoten sozusagen zusammengelegt. Allerdings wird auch hier ein Ebene 0 Knoten zur Aufnahme des Teilnehmerverkehrs berücksichtigt, der unmittelbar auf den Ebene 2 Knoten geschaltet ist.

Abbildung 7-4: Dimensionierung eines Netzknotens der Ebenen 1 oder 2

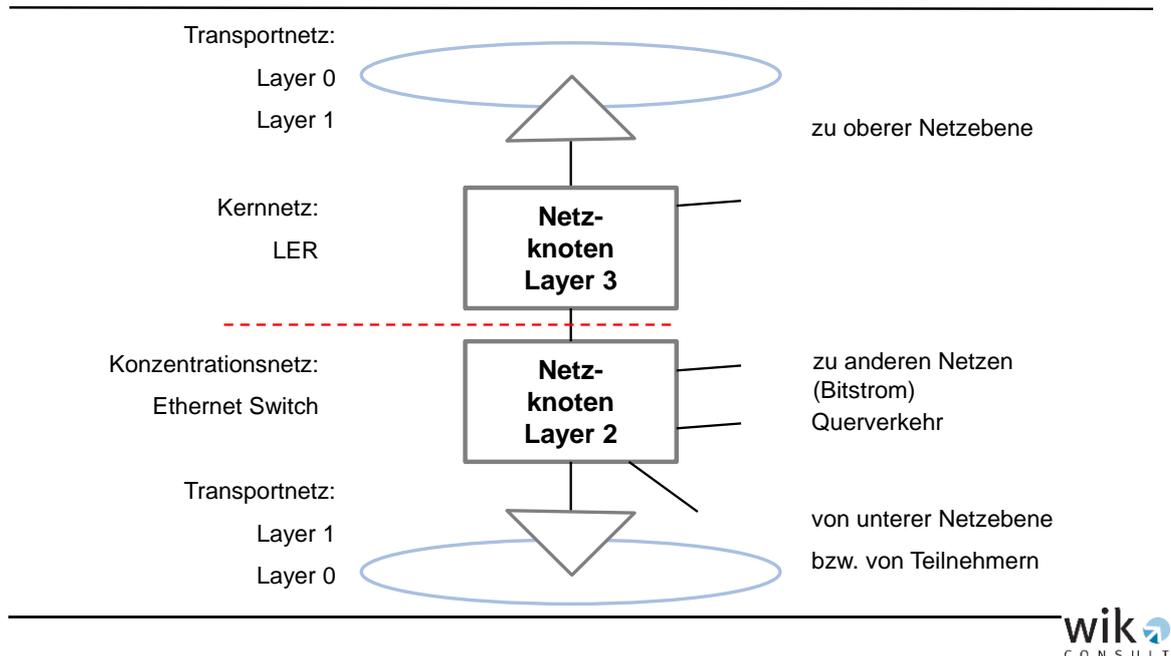


Zur Investitionswertbestimmung für die Ebene 1/ Ebene 2 Einrichtungen werden die gleichen Systemparameter herangezogen wie für die Ebene 0 MPoP-Einrichtungen. Die Anzahl der Einrichtungen hängt wieder von den Kapazitätsgrenzen der Einrichtungen ab (wie schon in Abschnitt 7.1.1 formuliert). Es ergeben sich dann das Mengengerüst und die zugehörigen Investitionsbeträge für PIU, LineCards und Racks.

Die Berechnungen der Metro-Einrichtungen in einem Ebene 1 Standort und einem Ebene 2 Standort, der mit einem Standort aus dem IP-Kernnetz zusammenfällt, weist im logischen Netz keine Unterschiede in den Investitionswertberechnungen auf.

¹²⁴ Die Bandbreitenanforderungen aus den unteren Standorten werden über die physikalische Netzschicht geführt, während die Bandbreitenanforderungen aus MPoP-Einrichtungen am gleichen Standort über interne (lokale) Verbindungen innerhalb- oder zwischen den Racks geführt werden.

Abbildung 7-5: Interne Verbindung zwischen Ebene 2 und 3 in einem IP-PoP



Aus Sicht der physikalischen Schicht unterscheiden sich beide Standorte. Die Metro-Standorte haben logische Kanten zu den kombinierten Metro-Kernnetzstandorten, die in der physikalischen Netzschicht zu realisieren sind, während die Verbindung von den Metro-Einrichtungen zu den IP-Kernnetzeinrichtungen durch interne Verbindungen innerhalb des Standortes erfolgt.

7.2.4 Ebene 3 – Systemzuweisung

Auf Ebene 3 des Breitbandnetzes finden sich die ersten IP basierten Einrichtungen. Dabei werden in der logischen Transportschicht des IP-Kernnetzes zwei Typen von Einrichtungen eingesetzt:

- Edge-Router, die Verkehre aus dem Schicht-2-Transportnetz und den zentralen Zusammenschaltpunkten auf- bzw. abführen und an die auch Diensteserver direkt angeschlossen werden können. Aus heutiger Sicht sind dies die sog. Label Edge Router (LER).¹²⁵

¹²⁵ Am Markt befinden sich Router-Einrichtungen in Form von Edge-Routern, die die Funktionen des Broadband Remote Servers (BRAS) integrieren, vgl. [WIK-05]. Im Kostenmodell werden aber die BRAS-Funktionen der Kontrollschicht zugeordnet und von daher funktionell und auch kostenmäßig separiert und folglich nicht in diesem Abschnitt, sondern im Abschnitt für die Kontrollschicht behandelt.

- Transit-Router, die Verkehre von Edge-Routern oder anderen Transit-Routern auf- bzw. abführen und keinerlei Verkehre vom Schicht-2-Transportnetz bzw. Diensteservern übernehmen. Aus heutiger Sicht sind dies die sog. Label Switch Router (LSR).

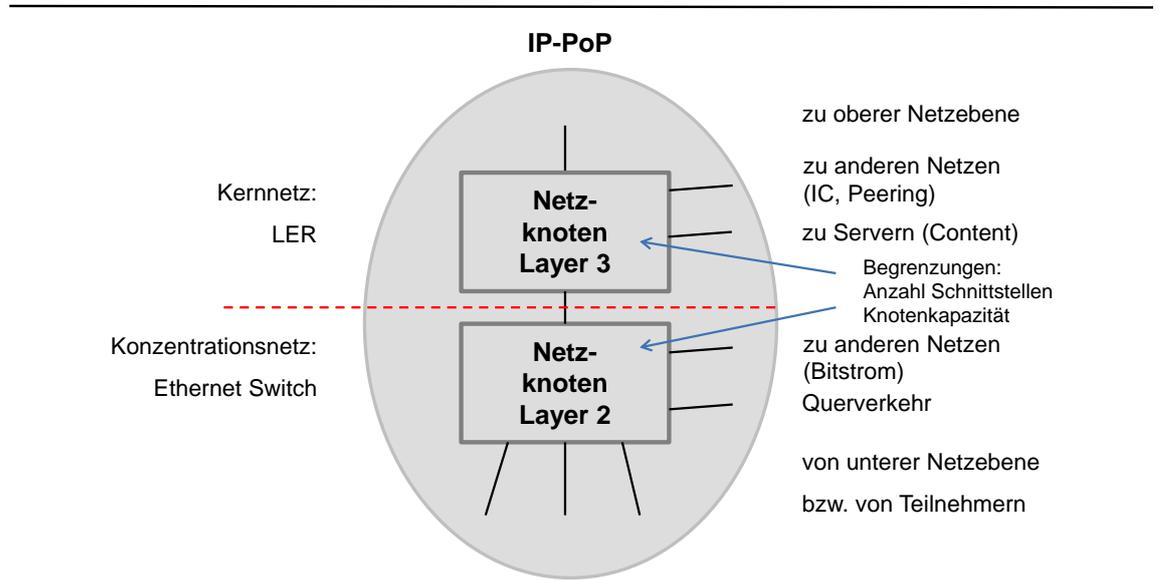
Die Ebene 3 Einrichtung wird durch den Label Edge Router beschrieben. Die in der Einrichtung vorzusehenden Ports richten sich nach den Verkehren aus den hier vier Verkehrsrichtungen, die auch in Abbildung 7-6 dargestellt sind, wobei die Werte der Verkehrsflüsse aus dem Modell für die Dimensionierung bekannt sind.

Für den Label Edge Router ergeben sich die in Abbildung 7-6 dargestellten Verkehrsrichtungen:¹²⁶

- interne Verbindung von und zur Metro-Einrichtung am gleichen Standort $n=1\dots N2$
- Schnittstelle zu Diensteservern, die am IP-Standort angeschlossen werden mit $n=1\dots NS$
- hierarchische Netzkante bzw. interne Verbindung zu und von Transit-Routern, davon 2 bei Doppelanbindung
- Interconnection / interne Verbindung von jedem Edge-Router zum Zusammenschaltungspunkt (Interconnection Point) mit separaten Ports i für die 4 verschiedenen IC-Arten Bitstrom, TDM-IC sowie IC für VoIP sowie IP-interconnection [Transit/Peering]). Hier wird nachfolgend aus Gründen der Übersichtlichkeit in der formalisierten Darstellung auf eine Differenzierung der Interconnection-Ströme verzichtet, die jedoch im Modell abgebildet wird.

126 Das Modell geht davon aus, das Edge-Router immer an Transit-Router angeschlossen werden und damit keine Querwege zwischen Edge Routern aufkommen.

Abbildung 7-6: Dimensionierung eines Netzknotens der Ebene 3 (LER) im Kontext mit dem kolokierten Ebene 2 Knoten



Die Kosten für die Edge-Router Einrichtungen werden durch die gleichen Parameter modelliert wie die Ebene 0 bzw. Ebene 1/Ebene 2 -Einrichtungen.

Die Anzahl der Einrichtungen hängt wieder von den Kapazitätsgrenzen der Einrichtungen ab, wie schon in Abschnitt 7.1.1 formuliert. Allerdings ist zu beachten, dass unter einer entsprechenden parametergesteuerten Option wenigstens zwei Einrichtungen aus Gründen der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit einzurichten sind.

Die entsprechenden Paketflüsse ergeben sich aus der Summe aller ankommenden und abgehenden Paketflüsse. Somit lassen sich auch hier entsprechend der Einrichtungen der anderen Ebenen das Mengengerüst und der damit verbundene Investitionswert für PIU, Linecards und Racks bestimmen.

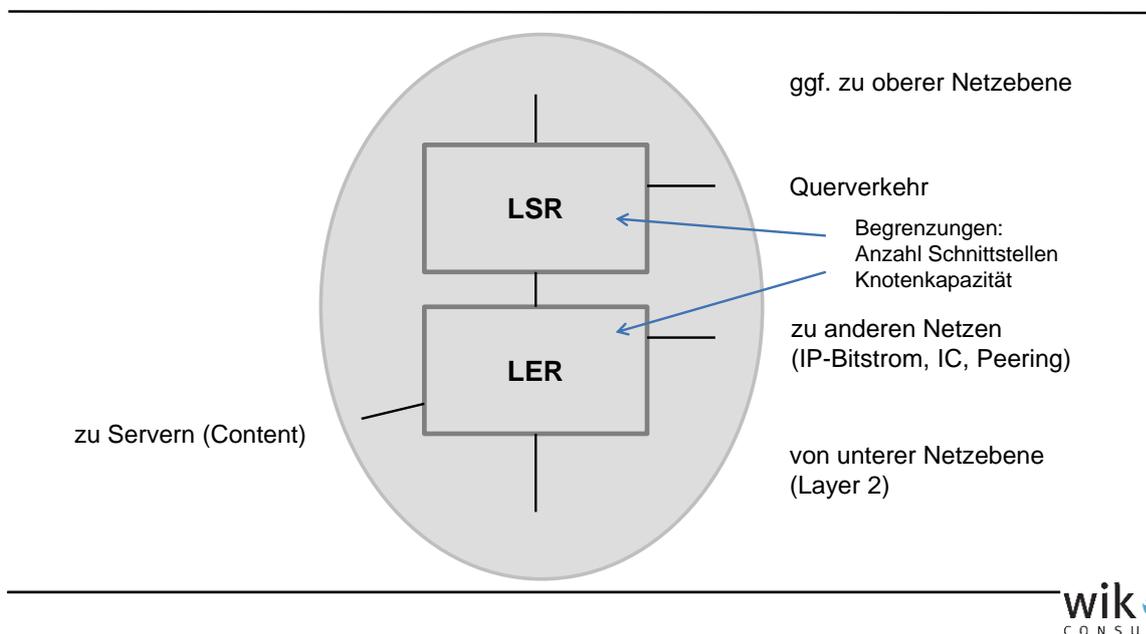
7.2.5 Ebene 4 und Ebene 5 – Systemzuweisung

Auf Ebene 4 und Ebene 5 sind als Ebenen spezifische Einrichtungen Label Switch Router (LSR) vorgesehen, die eine reine Transit-Funktion übernehmen. An einem LSR werden ausschließlich Verkehre aus den zugehörigen Edge-Routern oder von anderen Transit-Routern aufkommen, deren Werte aus dem Modell für die Dimensionierung bekannt sind.

Netzkanten zu anderen LSR werden in einem flachen bzw. 2-Ebenen Kernnetz in der gleichen Ebene erfolgen (Querverbindungen), um eine ausreichende Vermaschung

sicherzustellen. Transit-Router in der mittleren Ebene eines 3-Ebenen Kernnetzes haben – wie auch die Ebene 1/Ebene 2 Einrichtungen in der mittleren Ebene eines 3-Ebenen-Konzentrationsnetzes – neben Netzkanten der Querwege auch Netzkanten zu den zugehörigen Label Switch Router-Einrichtungen in der obersten Netzebene des Kernnetzes zu berücksichtigen. Die zugehörigen Verkehre sind wieder aus der Netzdimensionierung bekannt und zusätzlich auch die zugehörigen Schnittstellenkarten für die Verkehre, die aus den Edge-Router Einrichtungen zu den betrachteten LSR Einrichtungen führen. Dies ist schematisch in der nachfolgenden Abbildung 7-7 dargestellt, wo in der unteren Hälfte der Abbildung nochmals die LER Einrichtung dargestellt ist.

Abbildung 7-7: Dimensionierung eines Netzknotens der Ebenen 4/ 5 (LSR) im Kontext mit dem kolokierten Ebene 3 Knoten (LER)



Im Fall eines flachen 1-Ebenen Kernnetzes fallen jeweils alle Kernnetzfunktionen an allen Kernnetzstandorten an. D.h. die IP-PoP Standorte mit ihren LER sind alle zugleich Standorte von LSR, die über Querverbindungen miteinander verbunden sind.

Die entsprechenden Paketflüsse ergeben sich – wie auch bei den Edge-Router-Einrichtungen – aus der Summe aller ankommenden und abgehenden Paketflüsse. Für die Bestimmung des Mengengerüsts und des zugehörigen Investitionswertes wird auch hier wieder auf die bereits am Beispiel der anderen Netzebenen beschriebenen Routinen zurückgegriffen.

7.3 Systemzuweisung und Investitionswertbestimmung für das physikalische Netz

Im logischen Verbindungsnetzteil wurde nach Netzebenen differenziert, im physikalischen Transportnetzteil ist nach den verschiedenen Topologien der Netzsegmente zu unterscheiden. Dabei sind folgende Zuordnungen von Topologie zu Netzsegmenten vorzunehmen:

- Ring (Netzsegmente 0-1, 1-2, 0-2, 3-4, 4-5, 3-5)
- Vermaschung (oberste Netzebene 5-5)

Dabei sei nochmals darauf hingewiesen, dass im Falle eines flachen 1-Ebenen Kernnetzes die Einrichtungen von Ebene 3 und Ebene 5 an den Standorten zusammenfallen, die Verbindungen daher nur innerhalb desselben Standortes zwischen den Racks direkt zwischen den Systemen geführt werden, ohne weitere physikalische Schicht (mit Ausnahme der verbindenden Kabel).

Aufgrund des generischen Equipments spielen die unterschiedlichen Bandbreitenanforderungen in Konzentrations- und Kernnetz eine untergeordnete Rolle, da bei der Systemzuweisung innerhalb des Modells eine „Selbst-Selektion“ des passenden Equipments erfolgt.

7.3.1 Systemzuweisung und Investitionswertbestimmung in Ringtopologien

Das entscheidende Bauelement in physikalischen Netzen mit Ringtopologie sind Add-and-Drop-Multiplex-Einrichtungen, die es gestatten, aus einem durch Multiplexen aggregiertem Signal, Verkehrsströme ein- bzw. auszuführen. Diese Einrichtungen wurden schon für das PSTN/ISDN auf der Basis des SDH/SONET Standards betrachtet, wobei dort die ein- und auszuführenden Signale elektrischer Natur sind (Ex $x=1,3,4$ bzw. STM-N $N=1, 4, 16$), vergleiche [WIK-02].

Mit Zunahme der Bandbreitenanforderungen wurden diese Einrichtungen weiter entwickelt und die neueren Systeme gestatten es, optische (weiße) Signale ein- bzw. auszuführen und höhere Schnittstellengeschwindigkeiten (STM-64, STM-256) zu unterstützen. Damit können optische Signale aus den logischen Schichten direkt an die entsprechenden Schnittstellenkarten des OADM angeschlossen werden.

Wir unterstellen bei allen Layer 1 Transportnetztechniken, dass sie dem Stand der Technik entsprechende Systeme zum rekonfigurierbaren Ein- und Auskoppeln der Signale an den Ringstandorten beinhalten. Dies bedeutet bei NG-SDH, dass die Signale

auf elektrischer Ebene im ADM ineinander verschachtelt¹²⁷ werden und dann dieses Signal als sogenanntes weißes Licht über die Glasfaser im Ring übertragen wird. Bei WDM nimmt der ROADM weiße oder auch farbige Lichtsignale auf und koppelt sie in seinen aus mehreren Farben bestehenden Ring ein (oder umgekehrt auch aus), wobei jeder Verbindung auf einem Ringabschnitt jeweils eine Farbe des Ringsignals eindeutig zugeordnet ist. Dies erfordert zudem eine ringabschnittsweise Farbverwaltung, die vom zugehörigen Element-Managementsystem zu leisten ist. Für DWDM ist es wichtig, auf elektrischer Ebene hoch vorkonzentrierte Signale als optisches Signal zu übernehmen, weil eine Konzentration von Verbindungen auf optischer Ebene nur über das Farbmultiplex (optisches Frequenzmultiplex) erfolgt, aber nicht mehr durch Optimierung der Verbindungskapazitäten untereinander. Der WDM-ROADM greift in die einzelnen Inhalte der zu transportierenden optischen Signale nicht ein. Dies erfolgt erst bei OTN-Systemen, die die Vorteile von NG-SDH und DWDM kombinieren. Sie erlauben die optimierte Packung mehrerer Verbindungen zur Maximierung der Ausnutzung der optischen Kanäle (Farben) und managen die Verbindungen Ende-Ende über die verschiedenen optischen Farbabschnitte (in den Ringabschnitten) hinweg.

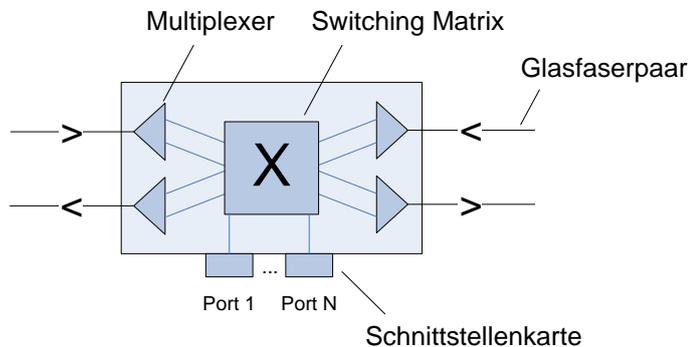
Die unterschiedlichen Technologien erlauben somit das flexible Ein- und Auskoppeln von Verbindungen an den Ring-Standorten mit unterschiedlicher Effizienz, abhängig von der Art und dem Umfang der zu übertragenden Informationen. Abbildung 7-8 zeigt den schematischen Aufbau eines RADM bzw. ROADM und Tabelle 7-1 gibt eine Übersicht über die verschiedenen ADM. Eine allgemeine Übersicht über den Einsatz von ADM-Einrichtungen in Konzentrationsnetzen findet sich in [Mukherjee-06].

Tabelle 7-1: Verschiedene Typen von ADM-Einrichtungen

Technologie	NG-SDH	DWDM	OTN
	Elektrische/ Optische Ports	optische Ports	Optische Ports
Rekonfigurierbare Zuordnung	OADM	ROADM	OTN-ADM
Derzeitige Portsignale	E1,E3,E4,STM-N N=1, ,4, 16, 64, Fast Ethernet (100M), 1GbE, 10GbE	STM-1 - STM-256, GbE, 10GbE, 100GbE, Fiber channel	STM-1 - STM-256, GbE, 10GbE, 100 GbE OTN n=1,2,3,4

¹²⁷ im Rahmen der SDH Containerstruktur

Abbildung 7-8: Schematischer Aufbau eines xADM bzw. ROADM



In der Systemzuweisung werden – wie bereits für das logische Netz ausgeführt – die Arten der verwendeten Einrichtungen durch die entsprechenden Systemparameter dieser Einrichtung modelliert. Im Folgenden ist mit einer ADM-Einrichtung eine generische Einrichtung zu verstehen, die z.B. aus derzeitiger Sicht einen der drei Typen aus Tabelle 7-1 in den Kostenparametern abbildet. Dabei können für die jeweiligen Einrichtungen (PIU) auch Schnittstellenkarten mit unterschiedlicher Portzahl (bei einheitlicher Kapazität der Ports) verfügbar sein. – Diese Ausprägungen sind durch den Modellanwender¹²⁸ entsprechend in der Systemspezifizierung zu hinterlegen.

Für die Systemzuweisung im Fall einer Ringtopologie sind die folgenden Parameter als wesentliche Kostentreiber zu berücksichtigen:

- Anzahl der Ports für die Schnittstellenkarten
- totale Bandbreite, die eine ADM-Einrichtung transportiert (Ringkapazität)
- Anzahl der Standorte im Ring (Ringstandorte)¹²⁹

Die Anzahl der Ports eines Ringstandortes ergibt sich aus der Anzahl der Ports aus dem logischen Netz und ist damit durch die Dimensionierung und Konfiguration der logischen Netzschicht nach Abschnitt 7.2 gegeben. Diese Nachfrage aus den Einrichtungen des logischen Netzes muss ergänzt werden durch die spezifische Layer 1 Nachfrage. Dabei wird die gesamte Layer 1 Nachfrage einer Relation zwischen 2 Standorten

¹²⁸ Hier, Definition des generischen Equipments für RTR durch WIK

¹²⁹ Man beachte, dass ein Standort in mehreren Ringen enthalten sein kann, d.h. mit Ringstandort wird ein Standort mit Bezug auf die betrachtete Ringtopologie verstanden.

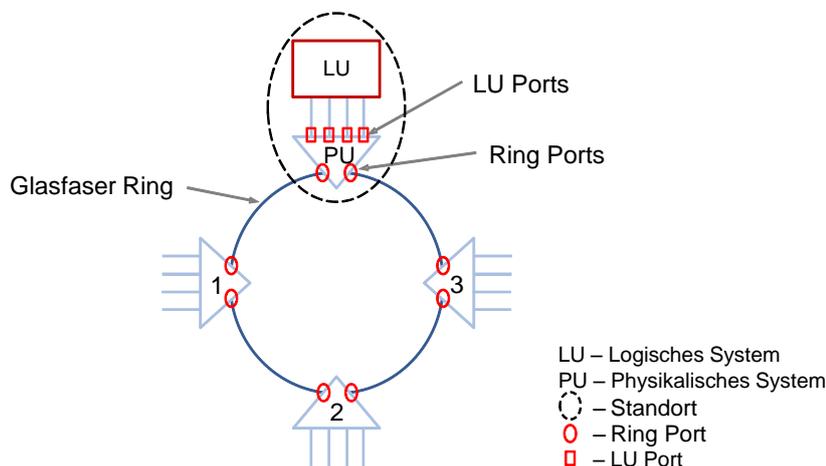
zu einer Gesamtnachfrage auf dieser Kante zusammengefasst und entsprechend bei der Dimensionierung der Layer 1 Einrichtungen berücksichtigt.

Die totale Bandbreite ist durch die Summe der Bandbreiten der Ports aller an einer Ringtopologie angeschlossenen ADM-Einrichtungen gegeben. Für die Schnittstellenkarten werden – wie auch im logischen Netz – verschiedene Typen $j=1\dots J$ angenommen.

Da anders als bei den Einrichtungen der Schicht 2 und 3 die Schnittstellenkarten nicht beliebig mit den PIUs der Schicht 1 kombinierbar sind, erfolgt hier bei der Systemzuweisung in einem ersten Schritt die Auswahl der PIU nach Maßgabe der benötigten Gesamtkapazität. Im zweiten Schritt werden dann die benötigten Schnittstellenkarten mit den zugehörigen Ports ausgewählt.

Die nachfolgende Abbildung 7-9 illustriert den Zusammenhang der Kapazitätsnachfragen aus technischen Einrichtungen des logischen und physikalischen Netzes. Die im Glasfaserring vorzuhaltende Kapazität richtet sich nach der Summe der Bandbreiten, die – hier im Beispiel – aus den Standorten 1, 2 und 3 kommen. Je nach Absicherungsgrad des Rings beträgt diese 50% oder 100% der Kapazitätsnachfragen der hier dargestellten 3 Standorte.

Abbildung 7-9: Zusammenspiel von Kapazitäten von Layer 2/3 Einrichtungen zu Layer 1 Einrichtungen



Es ist zu beachten, dass die Layer 1 Kapazitätsnachfrage bei der Systemzuweisung ebenfalls berücksichtigt ist. Als inkrementelle Einrichtung wird eine sogenannte Channel Bank der hier in Abbildung 7-9 dargestellten Layer 1 Einrichtung zur Vorkonzentration der Layer 1 Kapazitätsnachfrage vorgeschaltet und standortintern an diese angeschlossen. Da die Kosten einer spezifischen Layer 1 Nachfrage jedoch keine Zielgröße der

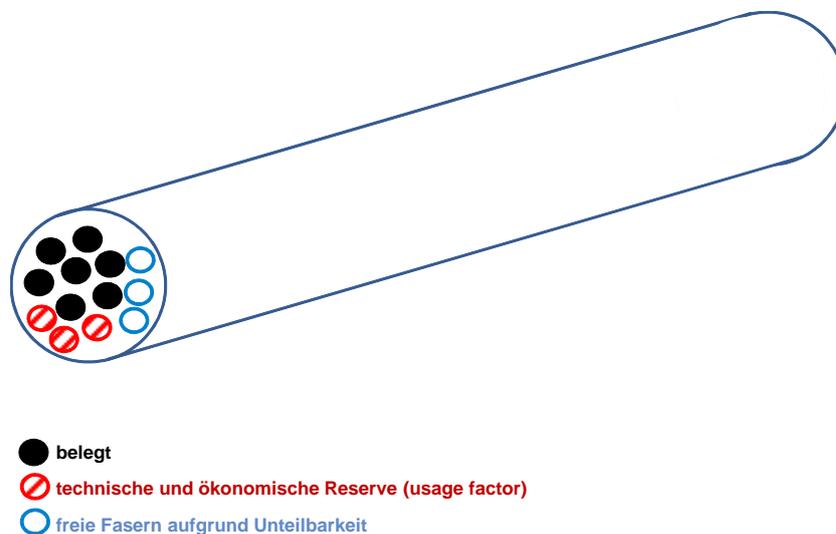
Modellierung sind, bleibt bei der Systemzuweisung diese Channel Bank unberücksichtigt.

Die Investitionen einer Ringtopologie setzen sich zusammen aus den Investitionen für die¹³⁰

- ADM-Einrichtungen
- Glasfaserkabel
- Leerrohre und Gräben.

Für die Bestimmung der Kabelinvestitionen in einem Ring ist zu beachten, dass bei der Dimensionierung der Kabel eine ökonomische und technische Reserve berücksichtigt wird. Diese Reserve fließt in Form eines Zuschlagfaktors bei der Systemzuweisung ein und es kommt dann das Kabel zur Anwendung, dessen Faserzahl gerade hinreichend ist, die Verbindungsanforderungen einschließlich der Reserven zu erfüllen. Damit verbunden ist letztlich auch eine weitere, aus Unteilbarkeiten resultierende Reserve. Diese Zusammenhänge sind in der nachfolgenden Abbildung 7-10 illustriert.

Abbildung 7-10: Auswahl des Kabeltyps und zu berücksichtigende Größen



¹³⁰ Wir gehen in diesem Beispiel davon aus, dass aufgrund der technologischen Entwicklung und der begrenzten Länge der Kabelabschnitte im Ring der Konzentrationsnetze keine zusätzlichen Regeneratoren zwischen zwei benachbarten ADM-Einrichtungen benötigt werden. Generell berücksichtigt das Modell jedoch Repeater bei längeren Ringabschnitten.

7.3.2 Systemzuweisung und Investitionswertbestimmung in vermaschten Topologien (flache Kernnetzebene)

In der vermaschten Topologie der flachen Kernnetzebene lassen sich die Standorte (Knoten) durch die Anzahl der physikalischen Verbindungen (Kanten) des Standortes klassifizieren (Knotengrad). Dabei sind Knoten mit einem Knotengrad zwei von Knoten mit einem Knotengrad größer zwei zu unterscheiden¹³¹.

Traditionell können in Knoten mit Knotengrad zwei ADM-Einrichtungen (ROADM) eingesetzt werden, während Knoten mit einem Knotengrad größer zwei Cross-Connectoren erfordern, vgl. [Alcatel-03]¹³².

Für die Systemzuweisung bei vermaschten Topologien ergeben sich vergleichbare Annahmen wie bei Ringtopologien. Allerdings sind die Einrichtungen individuell in jedem Standort in Abhängigkeit von der Anzahl der physikalischen Netzkanten auszulegen.

Die Investitionen einer vermaschten Topologie (flaches Kernnetz bzw. oberste Kernnetzebene) setzen sich zusammen aus den Investitionen für die:

- Cross connectoren bzw. ADM-Einrichtungen¹³³
- Glasfaserkabel
- Leerrohre und Gräben.

7.4 Systemzuweisung bei Verzicht auf Layer 1 Systeme (Transportnetz)

Wie in Abschnitt 5.1.5 erwähnt erlauben Ethernetswitches bzw. IP-Router mit Hilfe des jüngst standardisierten MPLS-TP Protokolls Ringstrukturen oder auch vermaschte Strukturen aufzubauen, ohne eine darunterliegende Transportschicht zu nutzen. Die schnelle Ersatzschaltung im Fehlerfall (< 50 ms) erfolgt dann nicht mehr in Layer 1 Systemen, sondern in den Switches bzw. Routern selbst mithilfe eines speziellen, die Verbindungen überwachenden Protokolls, das nicht auf die vergleichsweise langsamen Verfahren zur Ersatzschaltung auf Ethernet oder IP-Ebene angewiesen ist. Die MPLS-Tunnel werden im Fehlerfall umgeroutet, ohne dass die IP- bzw. Ethernet-Protokollebene tangiert wird.

¹³¹ Knoten mit einem Knotengrad von eins sind nicht zu erwarten, da wir aus Gründen der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von wenigstens "bi-konexen" Topologien ausgehen (Mindestvoraussetzung).

¹³² Allerdings kann ein Cross-Connector als ein ROADM mit multiplen Richtungen betrachtet werden, vgl. [Bernhey-07], [Tellabs-09]

¹³³ Ggf. zudem abschnittsweise Repeater

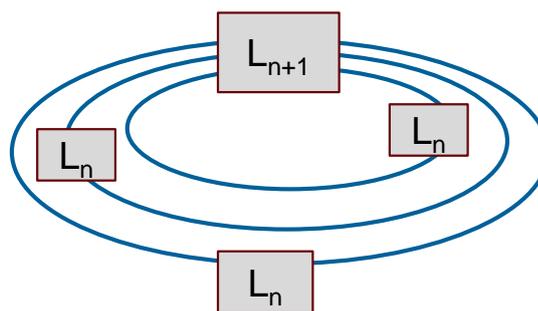
Eine wesentliche Eigenschaft dieser Vorgehensweise ist das nahezu ersatzlose Wegfallen der Netzebene für die Transportsysteme (Layer 1). Allenfalls werden für längere Glasfaserstrecken Zwischenverstärker (Repeater) benötigt, die wir im Modell, wie zuvor für die Transportschicht, den Layer 1 Systemen zuzählen.

Mietleitungsverkehre, die bisher in den Layer 1 Systemen (NG-SDH, C/DWDM, OTN) übertragen wurden, müssen nun auch über Layer 2 übertragen werden. Hierfür werden Pseudowire-Protokolle unterstellt, die die Eigenschaften der Layer 1 Übertragung annähern, aber nicht erreichen können. Alternativ bliebe nur die weitere Verwendung der Systeme der Transportschicht (Layer 1) für derartigen Verkehr, die dann aber synergetisch auch für den Transport der vermittelten Layer 2/ 3 Verkehre genutzt werden kann. Damit bewegen wir uns wieder in bereits bekannten und vom Modell erfassten Netzstrukturen.

Unser Ansatz geht also dahin, den gesamten Verkehr über Layer 2/ 3 Systeme direkt über Glasfaser zu übertragen. Die bereits bekannten Ringstrukturen werden grundsätzlich beibehalten, um die Anbindung auch im Fall der Unterbrechung einer Trasse (Stichwort „Bagger“) sicher zu stellen.

Im Grundsatz gibt es zwei Vorgehensweisen: Entweder wird für jeden Knoten eines Clusters ein eigener Glasfaserring aufgebaut (Individual Ring, vgl. Abbildung 7-11), der jeweils den optimierten Trassen folgt, die wir bereits aus der NG-SDH Welt kennen, oder alle Knoten eines Clusters nutzen dieselben Fasern und bilden einen gemeinsamen Ring (Common Ring, vgl. Abbildung 7-12).

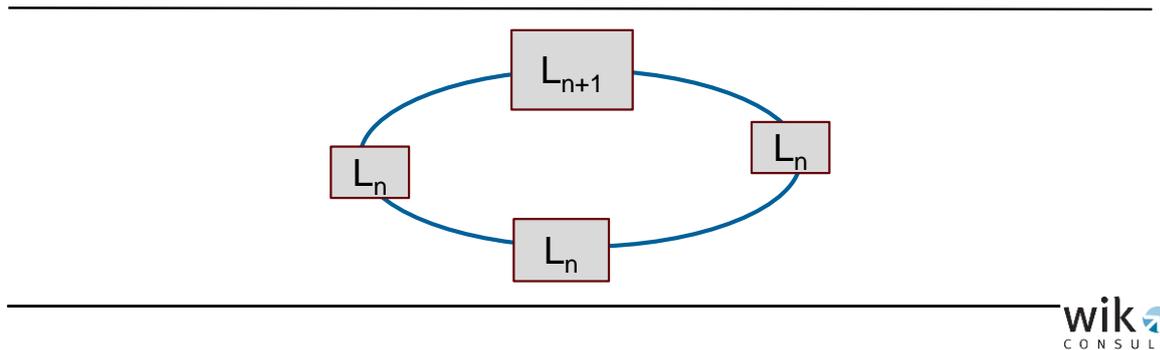
Abbildung 7-11: Individual Ring, Layer 2/ 3 ohne Transportschicht



Beim Individual Ring werden die erforderlichen Glasfasern in einem gemeinsamen Kabel durch den Ring geführt, allerdings müssen Sie wegen der sehr viel längeren Ringsegmente gegenüber einer gemeinsamen Ringstruktur häufiger zwischenverstärkt werden. Auch benötigt jeder Knoten der niedrigeren Netzebene zwei Abschluss Ports im

Knoten der höheren Ebene, so wie er auch zwei Ports für die beiden Ringrichtungen braucht. Dies verdoppelt den Schnittstellenbedarf gegenüber der Lösung mit Transportschicht, bei der die Ringbildung ja innerhalb der Transportsysteme stattfindet und die Layer 2 Systeme nicht berührt, sondern eine abgesicherte Transportbeziehung bereitgestellt wird.

Abbildung 7-12: Common Ring, Layer 2/ 3 ohne Transportschicht



Beim Common Ring kann man im Grundsatz mit einer Faser auskommen, die die Layer 2/ 3 Systeme miteinander im Ring verbindet. Allerdings wird nun der gesamte Ringverkehr durch die Systeme auf der unteren Netzebene geführt und diese müssen entsprechend größer dimensioniert werden, als wenn sie individuell an den übergeordneten Knoten angebunden sind. Auch hier ergibt sich ein höherer Schnittstellenbedarf für die Layer 2/ 3 Systeme gegenüber der Lösung mit Transportschicht für den jeweils 2. Ring Port. Dem stehen Einsparungen am Knoten der oberen Netzebene gegenüber, der den Verkehr aus allen Knoten gesammelt annimmt, während bei der Transportschicht die Knoten individuell mit einem Port an diesen Knoten angebunden würden. Im Saldo ist es ein Mehrbedarf an Schnittstellen, allerdings deutlich geringer als beim individual Ring.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Umsetzung der Modellarchitektur über die möglichen 6 Ebenen des Modells mit ihren unterschiedlichen Ausprägungen. Abbildung 7-13 zeigt die vollständig aufgefächerte Architektur über alle Ebenen, während auf der rechten Seite jeweils der Verzicht auf die mittlere Ebene (level 1 bzw. level 4) des Konzentrations- bzw. Kernnetzes dargestellt ist. Abbildung 7-14 zeigt den vollständigen Aufbau eines Knotenstandortes der obersten Netzebene (level 5), der ja auch die Funktionen der darunterliegenden Ebenen aufnehmen muss. Auch hier ist der Verzicht auf die mittleren Netzebenen (level 1 bzw. 4) des Konzentrations- bzw. Kernnetzes mit dargestellt. Durch einen Stern sind die Netzknoten gekennzeichnet, die in einer Netzarchitektur mit Transportschicht bei der Modellierung entfallen, hier aber für die Entkopplung der Netzebenen mit modelliert werden müssen.

Abbildung 7-13: Individual Ring 6 Level Modellarchitektur

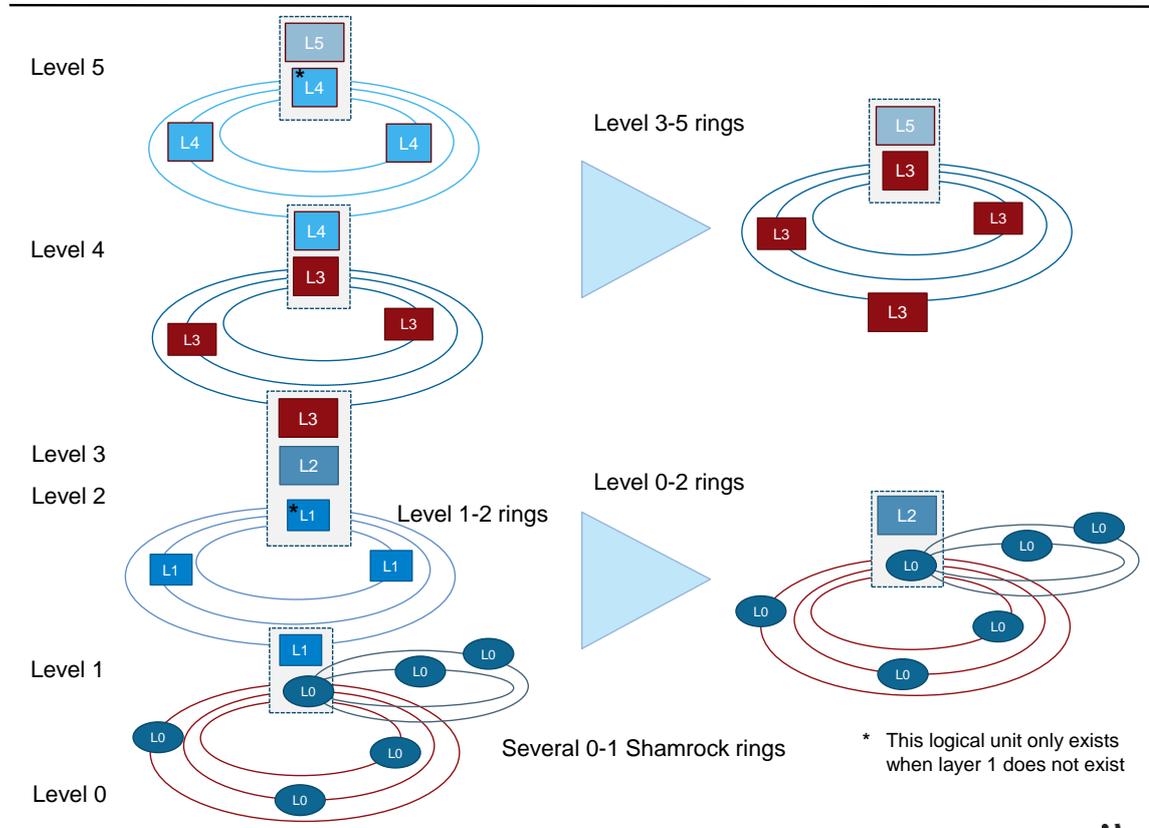
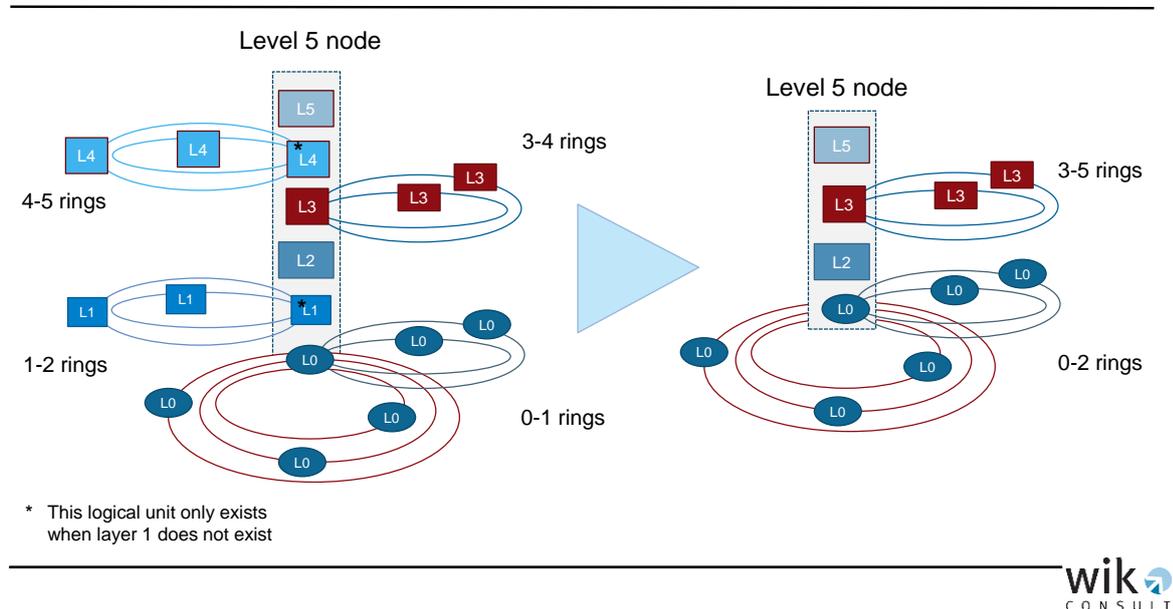


Abbildung 7-14 Individual Ring Level 5 Knotenstandort und Anbindung an untere Ebenen



Die nachfolgenden Abbildungen beschreiben die Implementierung eines 3 Ebenen Konzentrationsnetzes sowohl als Common (Abbildung 7-16) als auch als Individual Ring (Abbildung 7-15). Zum Vergleich dient die Abbildung 7-17 mit einer Transportschicht.

Abbildung 7-15: Individual Ring Konzentrationsnetz

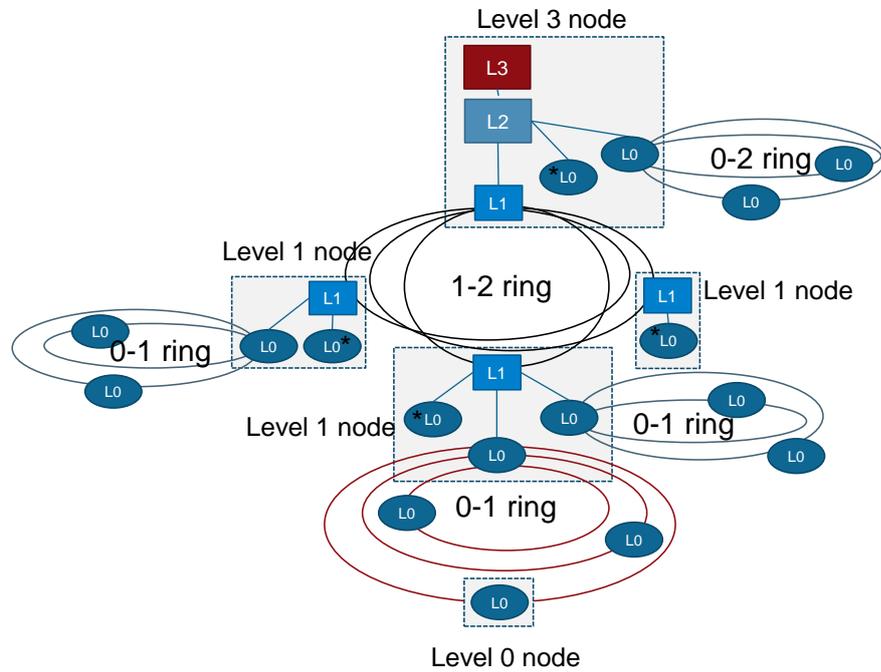


Abbildung 7-16: Common Ring Konzentrationsnetz

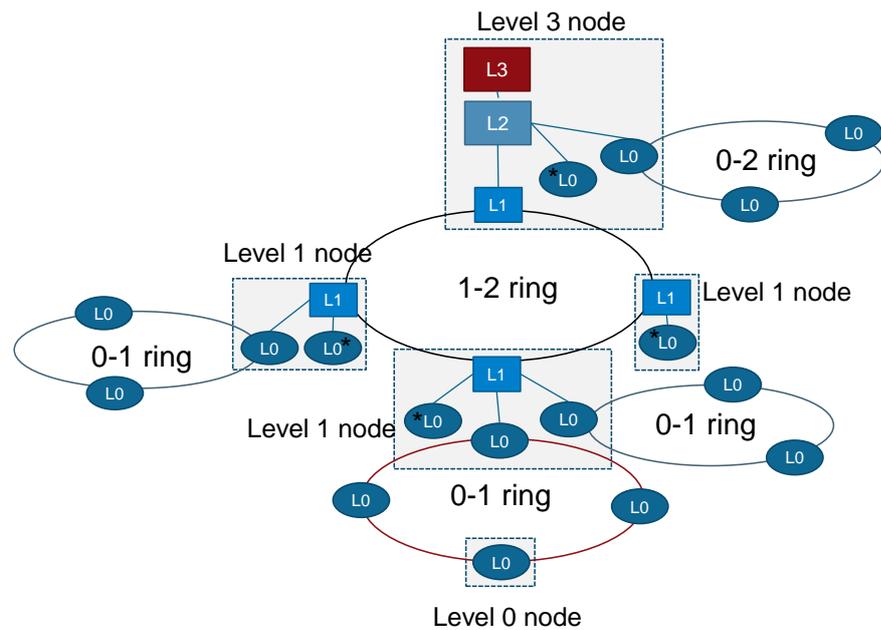
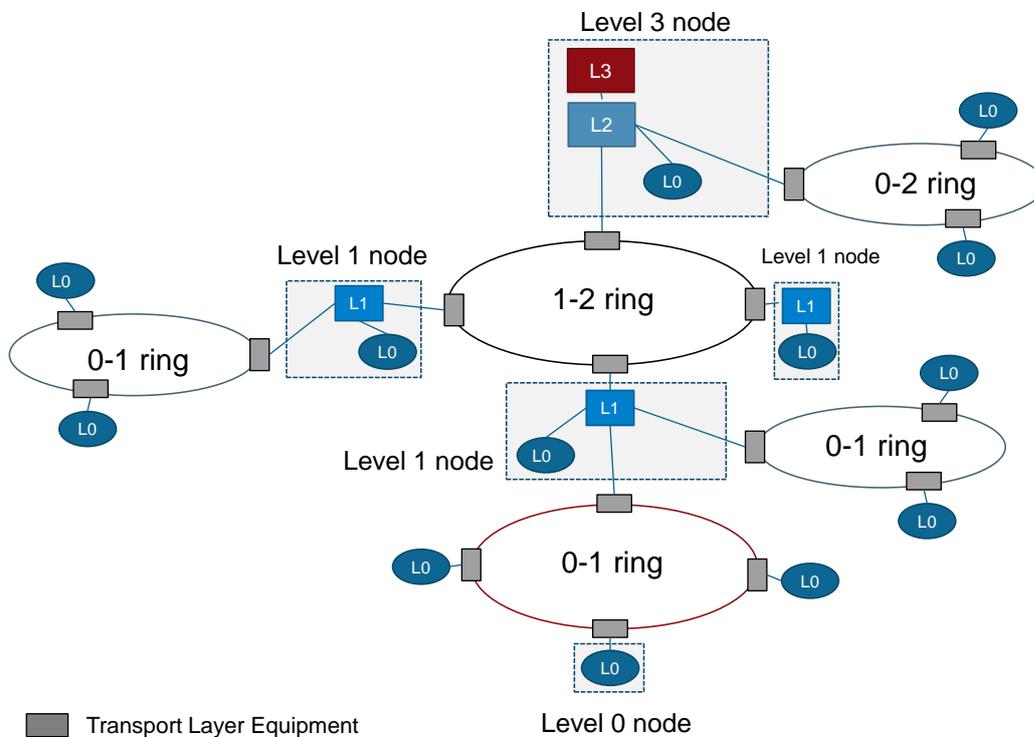


Abbildung 7-17: Ethernet mit Transportschicht im Konzentrationsnetz



Die Systemzuweisung erfolgt anhand des definierten Equipments entsprechend der benötigten Knotenkapazitäten und Schnittstellen, Faserbedarfe, Racks etc. wie bei den übrigen Systemen. Wir gehen davon aus, dass das Layer 2/ 3 Equipment mit MPLS-TP Funktionalität in Schnittstellen und Prozessoren teurer ist als das herkömmliche Equipment. Für die Berechnungen dieser Architekturvarianten sind daher die entsprechenden Preise einzustellen

Im Modell wurde nur die die Umsetzung der Architektur ohne Transportschicht für das Konzentrationsnetz implementiert, weil sich bereits hier bei allen Modellläufen für Österreich Mehrkosten gegenüber der Lösung mit Transportschicht gezeigt haben, die sich aus den bereits bei den prinzipiellen Architekturbeschreibungen erläuterten Mehrbedarfen für die Layer 2/ 3 Systeme ergeben¹³⁴, und die regelmäßig die Einsparungen bei den Layer 1 Systemen überwiegen. Insbesondere die Faser- und Repeaterbedarfe der Individual Ring Architektur legt nahe, diese nur mit einem WDM-System zusammen zu betreiben, womit aber wieder eine Transportschicht eingeführt ist.

¹³⁴ Hierbei sind die im vorhergehenden Absatz angesprochenen Mehrkosten noch nicht einmal berücksichtigt.

7.5 Systemzuweisung und Investitionswertbestimmung für die Kontrollschicht

Die Aufgaben der Kontrollschicht teilen sich in zwei große Gruppen:

- Zuweisung von Kapazitäten und deren Überwachung im Betrieb und Ersatzschaltung im Störfall für alle Verbindungen (OAM)
- Einrichtung, Überwachung und Terminierung für Kapazitäten aus den vermittlungsbasierten Diensten (Signalisierung)

Einrichtungen, die diese Funktionen wahrnehmen, können in Form von zentralisierten oder verteilten Funktionen oder einer Mischung aus Beidem implementiert werden. Wie auch in den Verbindungs- und Transportschichten ist das Kostenmodell flexibel und generisch gestaltet, um eine flexible Anpassung an die Entwicklung der Technologien und ihrer Architekturen zu gewährleisten. Diese wird, wie auch in den Abschnitten 7.1 und 7.2, mittels Parametern einer generischen Systemzuweisung vorgenommen.

Auf eine Investitionswertbestimmung für die OAM-Funktionen wird verzichtet, da davon ausgegangen wird, dass diese zum einen bereits in den technischen Einrichtungen des logischen und physikalischen Netzes enthalten sind (Element Manager) bzw. zum anderen über indirekte Investitionen abgebildet werden.

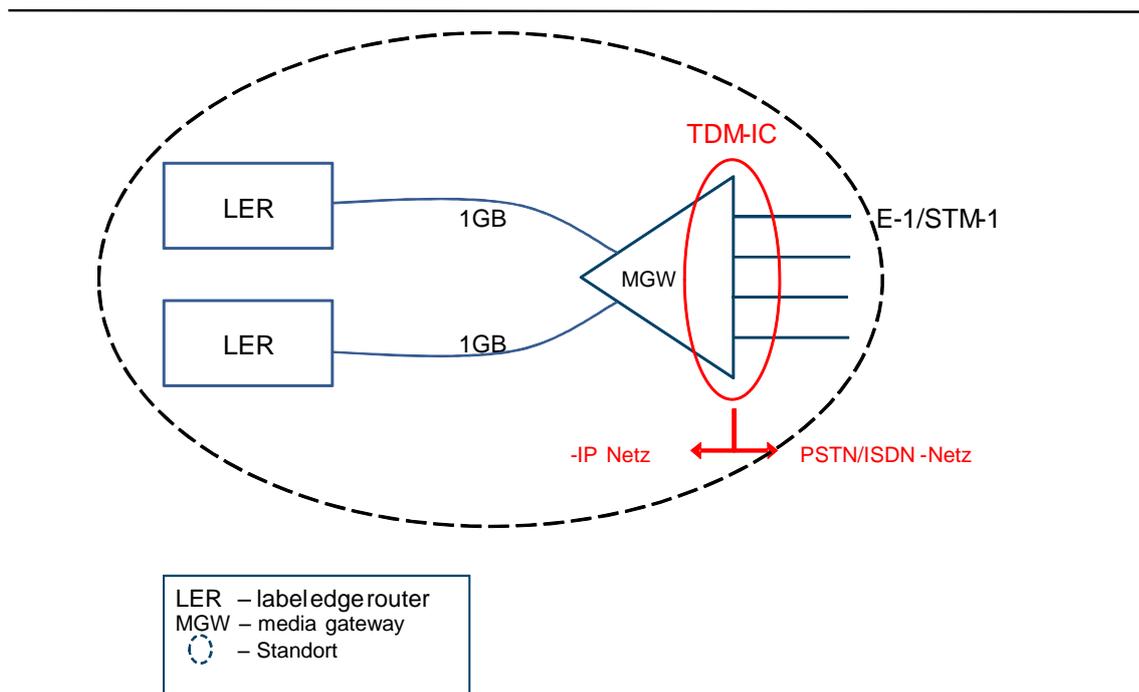
In Kapitel 6 wurde der Modellierungsansatz für die Einrichtungen der Kontrollschicht ausgeführt. Die Systemzuweisung basiert auf dem dort vorgestellten Modellierungsansatz, der für die Einrichtungen der Kontrollschicht entweder zentrale oder dezentrale Lösungen vorsieht. Dabei sind die Gateways aufgrund ihrer Transportfunktion prinzipiell dem Transportnetz zuzuordnen, aber aufgrund ihrer funktionalen Bedeutung für die Sprachzusammenschaltung und zur Verdeutlichung der Realisierung des IC-Verkehrs im Zusammenspiel der Einrichtungen mit in diesem Abschnitt dargestellt. Für die Modellimplementierung wurde der Ansatz einer verteilten Kontrollschicht gewählt.

Für alle zentralen Kontrolleinrichtungen wie den Softswitch, DNS oder BRAS wird auf eine explizite Modellierung der Anbindung an das Transportnetz verzichtet, vielmehr sind die Kosten für die Schnittstellenkarten in den Systemkosten enthalten. Ebenso wird auf eine explizite Modellierung des sich aus der Kontrollschicht ergebenden Signalisierungsverkehrs verzichtet, da er im Verhältnis zum Nutzverkehr vernachlässigbar ist.

Lediglich für die Gateways erfolgt im Rahmen der Systemzuweisung eine Berücksichtigung der Schnittstellenkarten, da diese vom zu transportierenden Verkehrsvolumen abhängen, wie es auch bei den Einrichtungen des logischen Netzes der Fall ist. Siehe hierzu auch die schematische Darstellung in der nachfolgenden Abbildung 7-18. Die Kapazitäten von Plug-In-Unit (PIU), Linecards und Ports wird wie bei allen technischen Einrichtungen durch generische Systemfamilien mit unterschiedlichen Ka-

pazitäten beschrieben. Die Besonderheit des Media Gateways ist es, auf der Kernnetz-Seite über Ethernet-Schnittstellen und auf der PSTN/ISDN-Seite über die traditionellen E1 Schnittstellen des SDH oder auch aggregiert in einer STM-1 Schnittstelle (63 x E1) zu arbeiten, um unmittelbar mit einem klassischen PSTN/ ISDN zusammenschaltet werden zu können. Das Media-Gateway macht im Prinzip die technische Umsetzung dafür.

Abbildung 7-18: Schnittstellen am Media Gateway



Die Investitionen ergeben sich aus der Größe und Anzahl der benötigten Einrichtungen. Da die Anzahl der Standorte, an denen zentrale Kontrolleinrichtungen vorzuhalten sind, wird durch Inputparameter gesteuert. Letztlich muss die sich aus dem gesamten Netzverkehr zur Hauptverkehrsstunde (bei den spezifischen Funktionselementen nach Maßgabe der Dienste-spezifischen Busy Hour) ergebende Nachfrage durch die Zahl der Standorte dividiert werden, um die vorzuhaltende Kapazität von Einrichtungen an einem Standort zu ermitteln. Dieser Investitionswert wird dann wiederum mit der Zahl der Standorte multipliziert. Zudem wird parametrisiert, in welchem Ausmaß Kapazität vorgehalten werden soll, um den Ausfall einzelner Systeme auffangen zu können, ohne Leistungseinbußen zu erfahren.

7.6 Ermittlung der netzbezogenen Kosten für eine Sprachminute

Wir gehen an dieser Stelle davon aus, dass die Informationen zur Struktur des jeweiligen Netzes mit all seinen Netzelementen vorliegen und die Investitionswerte berechnet sind (siehe entsprechende Darstellungen in den vorangegangenen Abschnitten) und somit die Kostenberechnung vorgenommen werden kann. Netzkosten bestehen im Wesentlichen aus den annualisierten Capex und den Opex, auf die je nach Ansatz und Dienst ein Aufschlag für Gemeinkosten¹³⁵ erfolgt. Die in diesem Modell vorgestellte Investitionswertermittlung beschränkt sich primär auf die direkten Investitionen in Netzelemente. Die indirekten Investitionen und Opex werden in diesem Modell durch Zuschlagssätze abgeleitet, die aus der Markterfahrung festgelegt werden und über entsprechende Parameter in das Modell einfließen. In den folgenden Unterabschnitten werden wir unsere Ansätze zur Bestimmung der Capex beschreiben, wie auch die Bestimmung der indirekten Investitionen und der OPEX sowie die Berücksichtigung der Gemeinkosten. Anschließend beschreiben wir die Zuordnung der so abgeleiteten Gesamtkosten zu den verschiedenen Diensten und zur Berechnung der Kosten pro Einheit eines Dienstes – hier die Sprachminute.

7.6.1 Annualisierte Capex

Der erste Schritt zur Ermittlung der annualisierten Capex in einem Bottom up-Modell besteht darin, den Investitionswert der Anlagen des vom Netzplanungsmodul bestimmten Netzes zu ermitteln. Indem diese Bewertung mit den gegenwärtigen Preisen der Anlagen vorgenommen wird (current cost), stellt das Ergebnis den Wert eines vollkommen neuen Netzes dar. Dies ist konsistent mit der konzeptionellen Überlegung, wonach die Kosten des Netzes denen entsprechen sollen, die von einem neu in den Markt eintretenden Anbieter aufgebracht werden müssten.

Abgeleitet von diesen Investitionswerten der einzelnen Anlagen sind jährliche Beträge zu ihrer Amortisation zu bestimmen, wobei diese Beträge sowohl die Abschreibungen als auch die Zinsen für die Bereitstellung des Kapitals (einschließlich einer angemessenen Verzinsung des Eigenkapitals) abdecken müssen. In Bottom up-Modellen ist es üblich, dafür den Annuitätsansatz zu benutzen, bei dem Abschreibungen und Zinsen in einem Berechnungsschritt bestimmt werden. Von diesem Ansatz gehen zur Ermittlung der Capex auch aus.

135 Die Gemeinkosten beinhalten aus unserer Sicht (Definition) auch die Wholesale Kosten. Gemeinkosten sind bei der Bestimmung der LRAIC/ LRIC zu berücksichtigen, nach Auffassung der EU-Kommission bei der Bestimmung der pure LRIC jedoch nicht oder allenfalls teilweise, so .z.B. die Wholesalekosten. Das Modell arbeitet an dieser Stelle mit Zuschlagssätzen, die entsprechend hoch eingestellt sein müssen.

Formal gehen wir dabei wie folgt vor. Wir bezeichnen mit I den Wert der betreffenden Anlage zum Zeitpunkt der Investition und mit A den jährlichen Betrag, der zur Amortisation von I erwirtschaftet werden muss. Ferner, lassen wir i für den Zinssatz stehen, definieren $q = 1/(1+i)$ und bezeichnen mit n die Länge der wirtschaftlichen Lebensdauer der Anlage. Die folgende Relation muss dann gelten, um sicher zu stellen, dass das eingesetzte Kapital einschließlich zu zahlender Zinsen erwirtschaftet wird:

$$I = A * [q + q^2 + \dots + q^n] .$$

Unterstellt wird dabei, dass der Restwert der Anlage zum Zeitpunkt n vernachlässigbar gering ist. Aus der obigen Formel folgt, dass

$$A = c * I ,$$

wobei

$$c = 1 / [q + q^2 + \dots + q^n] ,$$

oder nach algebraischer Umformung,

$$c = (1/q) * [1 - q] / [1 - q^n] .$$

Für diese Berechnung müssen der Zinssatz (gewöhnlich in der Form des Weighted Average Cost of Capital, oder WACC) und die erwartete Lebensdauer der betreffenden Anlage bekannt sein. Hervorzuheben ist, dass in dieser Ableitung die Amortisationsbeträge A über die Zeit hinweg gleich bleiben, da annahmegemäß in dieser einfachen Version Mengen und Preise der Anlagen während der n Perioden unverändert bleiben.

Während der wirtschaftlichen Lebensdauer einer Anlage können sich zwei Parameter ändern, die einen starken Einfluss auf die Kostenbestimmung haben: die jährlichen Ausbringungsmengen der Anlage, die gewöhnlich wachsen, und der Preis der Anlage, der sich in die eine oder andere Richtung verändern kann. Gleichfalls ändern kann sich die Kaufkraft, beeinflusst von der Inflationsrate. Diese erwarteten Änderungen sind bei der Preissetzung in Betracht zu ziehen, da ein zukünftiger potenzieller Wettbewerber, dessen Preissetzung zu antizipieren ist, bei einem späteren Markteintritt von diesen dann geänderten Bedingungen ausgehen wird. In der Annuitätsformel können diese Entwicklungen berücksichtigt werden, indem die Formel für q wie folgt spezifiziert wird:

$$q = [(1+\Delta g)^*(1+\Delta p)]/(1+i)$$

wobei

Δg = prognostizierte durchschnittliche Änderungsrate der Auslastung der Anlage während ihrer wirtschaftlichen Lebensdauer, und

Δp = durchschnittliche erwartete Veränderungsrate im Preis der Anlage (als Modern Equivalent Asset) während ihrer wirtschaftlichen Lebensdauer, bereinigt um die Inflationsrate.

Werden entsprechende Werte für q in die Gleichung

$$I = A * [q + q^2 + \dots + q^n]$$

eingefügt, ergeben sich Amortisationsbeträge A für die sukzessiven Jahre, die sich *ce-teris paribus* von Jahr zu Jahr um den Faktor $(1+\Delta g)$ verändern. Auf diese Art und Weise wird gewährleistet, dass jeder zukünftigen Einheit an Leistungsmenge derselbe Betrag an Abschreibung zugeschrieben wird als einer gegenwärtig erbrachten Einheit. Einem analogen Argument folgend, stellt der Faktor Δp sicher, dass zu jedem Zeitpunkt der Abschreibungsbetrag proportional zum Wert der Anlage erfolgt. Hieraus folgt, dass die Amortisationsbeträge A zukünftiger Perioden größer oder kleiner als der gegenwärtige sein können, abhängig davon, ob Δg und Δp positive oder negative Werte einnehmen, bzw. ob der Wert von $(1+\Delta g)^n(1+\Delta p)^n$ größer oder kleiner als 1 ist. Der erwartete Wert von Δp wird bei Investitionsgütern mit großem technischen Fortschritt eher negativ und bei denen ohne solchen Fortschritt im Einklang mit der allgemeinen Inflation eher positiv sein. Bei am Anfang geringer aber später im Investitionszyklus starker Auslastung der Anlage wird der Wert von Δg positiv, bei umgekehrtem Verlauf der Auslastung eher negativ sein.

Der hier beschriebene, die Veränderungen im Output und die Entwicklung der Preise der Anlagen in Betracht ziehende Ansatz entspricht der ökonomischen Abschreibung, da die Abschreibungsbeträge dergestalt bestimmt werden, dass sie in jeder Periode dem Wertverlust der Anlage entsprechen. Gleichzeitig entspricht er auch dem Gebot, Grundlage für eine nicht-diskriminierende Preisbildung zu sein. Dieser letzte Aspekt ergibt sich daraus, dass die Zinslast auf der Basis eines durchschnittlich eingesetzten Kapitals berechnet wird, was die Voraussetzung dafür ist, dass die Kosten der Anlage einschließlich Zinsen in jedem Jahr proportional zu der Ausbringungsmenge und zum Wert der Anlage bestimmt werden.

Der für die Verzinsung des eingesetzten Kapitals anzusetzende Zinssatz ebenso wie die betriebsgewöhnlich Nutzungsdauer und der Preisverfall sowie die Auslastungsrate sind grundsätzlich frei parametrierbar und werden auf Basis von Referenzwerten und Markterfahrungen in ökonomisch sinnvoller Form eingestellt.

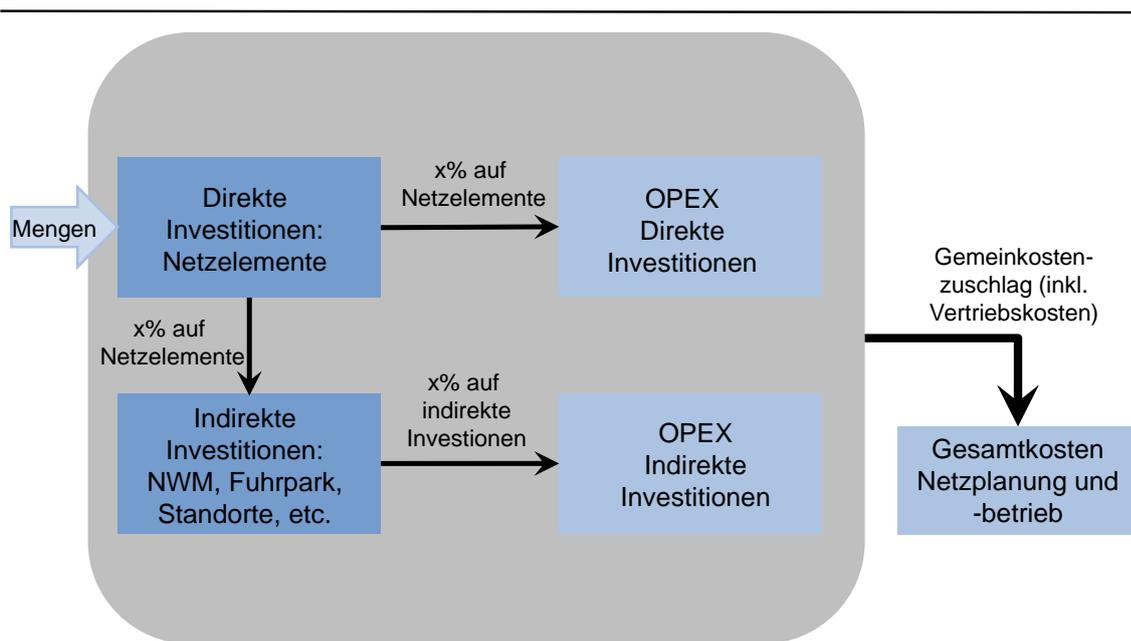
Die gleiche Vorgehensweise wird auch für die Annualisierung der indirekten Investitionen angewendet, auf deren Bestimmung der folgende Abschnitt etwas genauer eingeht.

7.6.2 Indirekte Invest, OPEX und Gemeinkosten

Die Modellierung von indirekten Investitionen, OPEX und Gemeinkosten erfolgt bei Bottom-up Modellen in der Regel auf Basis von Zuschlagsfaktoren. Dabei gehen wir wie folgt vor:

Zunächst werden die indirekten Investitionen bestimmt. Diese setzen sich zusammen aus Investitionen, die nicht unmittelbar den einzelnen Komponenten oder Ebenen des Netzes zugeordnet werden können. Aus den direkten und den indirekten Investitionen werden anschließend die OPEX über individuelle Zuschlagssätze je Investitionsgruppe gebildet. Aus der Summe der CAPEX der direkten und indirekten Investitionen und aus den OPEX für beide können anschließend die Gemeinkosten über einen Gemeinkostenzuschlag ermittelt werden. Alle Zuschlagssätze sind im Modell frei parametrierbar und werden auf Basis von Referenzwerten und Markterfahrungen eingestellt.

Abbildung 7-19: Zuschläge für indirektes Invest, OPEX und Gemeinkosten und Bestimmung der Gesamtkosten



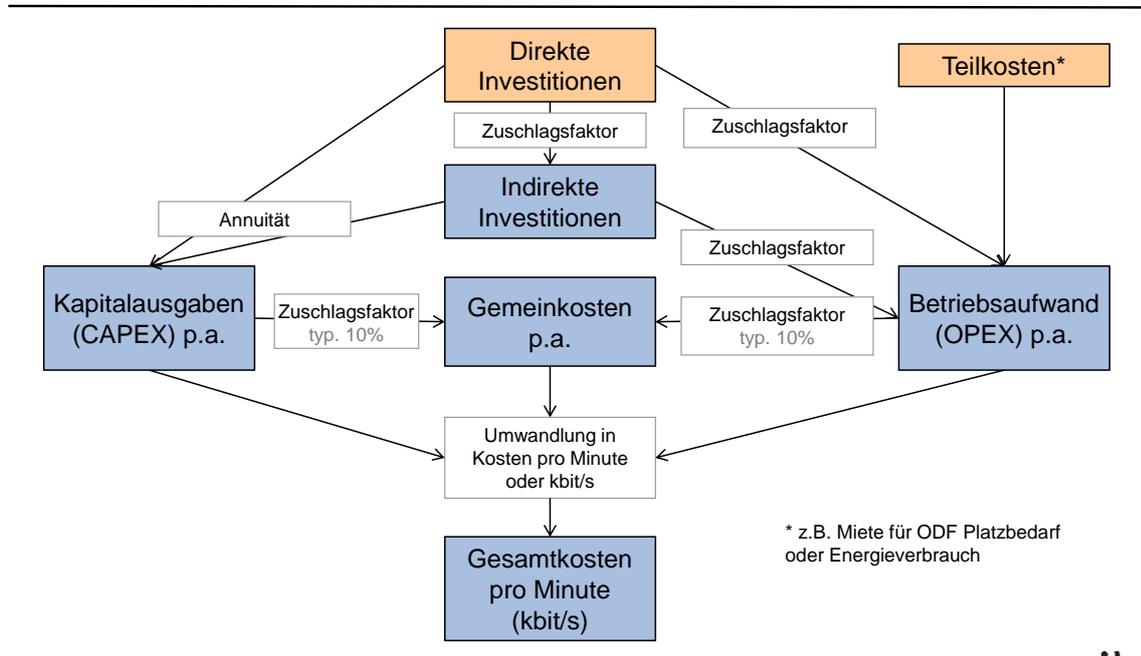
Die indirekten Investitionen bestehen aus Investitionen für Fahrzeuge, Büroausstattung, Testzentrum/ Messgeräte/ und Werkzeuge (unter dem Begriff Werkstatt subsummiert), IT, Netzwerkmanagement (sofern nicht als Element Manager in den Netzkomponenten berücksichtigt) und Land/ Gebäude. Für jede dieser Positionen gibt es einen individuellen Zuschlagssatz auf die Netzelemente in nachfolgender Gliederung (Tabelle 7-2):

Tabelle 7-2: Parametrierung indirekter Investitionen

	Investment for motor vehicles as a percentage of direct investment	Investment for office equipment as a percentage of direct investment	Investment for workshop equipment as a percentage of direct investment	Investment for IT / general purpose computer as a percentage of direct investment	Investment for network management as a percentage of direct investment	Investment for land and buildings as a percentage of direct investment
Concentration network						
Ethernet switch	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
NG SDH equipment	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
DWDM equipment	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
OTN equipment	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
Trenches / Cable deployment	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
Core network						
LER	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
LSR	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
DWDM equipment	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
OTN equipment	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
Trenches / Cable deployment	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
Media Gateway	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
Sites	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
Racks	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
Control layer						
BRAS	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
RADIUS	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
DNS	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
Softswitch	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
MediaGateway controller	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
SBC	0%	0,0%	0%	0%	0%	0%

Die indirekten Investitionen werden nach derselben Methode wie die indirekten Investitionen abgeschrieben.

Abbildung 7-20: Rechenweg über indirekte Investitionen, OPEX und Gemeinkosten zur Bestimmung der Gesamtkosten



Die OPEX werden über individuelle Zuschlagssätze auf alle direkten und indirekten Investitionen entsprechend der zuvor aufgeführten Gliederungen bzw. Investitionsgruppen bestimmt.

Die Gemeinkosten werden anschließend über einen einheitlichen Zuschlagssatz auf die Summe der CAPEX (direkt und indirekt) und der OPEX (direkt und indirekt) bestimmt.

Die Gesamtkosten wiederum sind das Resultat aus CAPEX, OPEX und, wenn berücksichtigungsfähig, der Gemeinkosten.

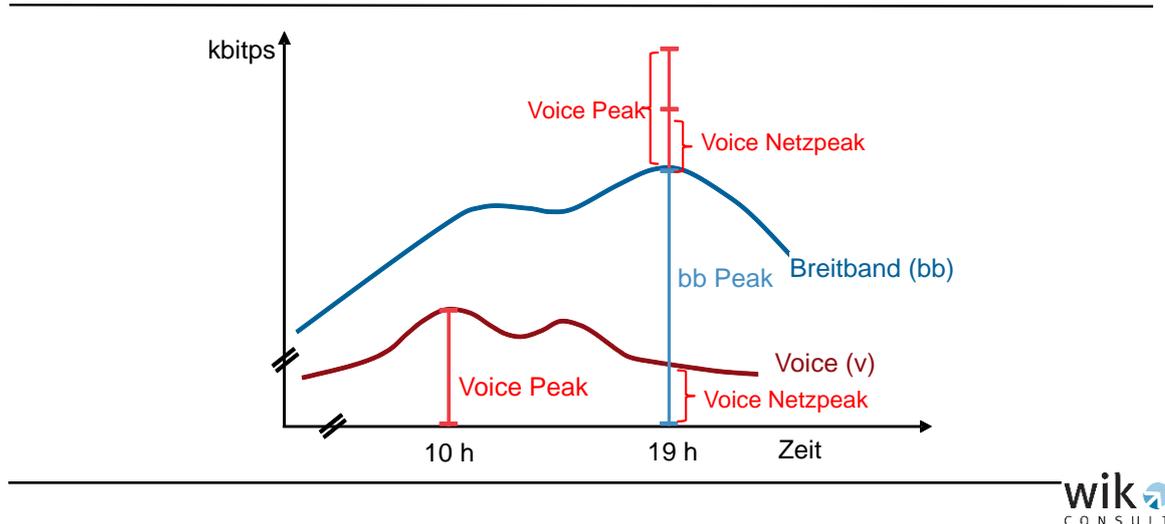
7.6.3 Bestimmung der Gesamtkosten und Kosten für einen Dienst

Da Struktur und Umfang des Netzes von der Nachfrage bestimmt werden, die während der Spitzenlastzeit befriedigt werden muss, werden auch die Gesamtkosten des Netzes von der Nachfrage zu diesem Zeitpunkt und zu dem Zeitpunkt etwaiger dienstespezifischer Lastspitzen verursacht.¹³⁶ Die Verteilung dieser Kosten auf die Mengen, die während der gesamten relevanten Zeit nachgefragt werden, kann unterschiedlich erfolgen. Es kann eine strikte proportionale Verteilung zur Spitzenlastzeit vorgenommen werden,

¹³⁶ Z.B. der Verkehr zur Sprach Busy Hour, der die Größe Sprachnetzspezifischer Netzkomponenten bestimmt, die dann über entsprechende Routingfaktoren den Sprachkosten zugerechnet werden.

oder die Kosten werden den verschiedenen Diensten entsprechend Kriterien zugeordnet, die eher durch Preissetzungsüberlegungen bestimmt werden.

Abbildung 7-21: Beispiel für Tagesverkehrskurven eines NGN für Sprach- und sonstigen Breitbandverkehr



Typischerweise klaffen die Hauptverkehrszeit des Sprachverkehrs und des sonstigen Breitbandverkehrs auseinander. Das Breitbandnetz ist generell für den maximalen Gesamtverkehr zu dimensionieren. Die Komponenten des Sprachnetzes (z.B. Softswitches, Mediatgateways, ...) sind jedoch für die Hauptverkehrszeit des Sprachnetzes zu dimensionieren. Die beiden Verkehrswerte zur Hauptverkehrszeit des Gesamtnetzes zu addieren würde typischerweise zu einer Überschätzung des Gesamtverkehrs und zu einer Überschätzung der Kosten führen. Daher erlaubt das Modell eine Anpassung der Hauptverkehrswerte des Sprachnetzes an den Verkehrswert des Sprachverkehrs zur Hauptverkehrsstunde des Gesamtnetzes über einen Korrekturfaktor, der das Modell entsprechend parametrisiert und aus Markterfahrungen gewonnen wird (vgl. Voice Peak, korrigiert zum Voice Netzpeak in Abbildung 7-21¹³⁷).

Im LRAIC-Ansatz wird dann für die Bestimmung der Kosten der einzelnen Dienste von den Gesamtkosten, einschließlich Gemeinkosten, ausgegangen, die durch das Errichten und Betreiben des Netzes bzw. durch das Angebot der Dienste entstehen und von dem Modell wie oben beschrieben für die Capex der direkten Netzinvestitionen, der indirekten Investitionen und der jeweils zugehörigen OPEX und Gemeinkosten berechnet worden sind. Für die Bestimmung der Kosten eines Dienstes werden Informationen genutzt, die im Netzplanungsmodul in Bezug auf den jeweiligen Grad der Inanspruch-

¹³⁷ Abbildung 7-21 zeigt nicht unbedingt die Hauptverkehrsstunde des Gesamtnetzes, wengleich sie typischerweise mit der des Breitbandnetzes identisch ist.

nahme der verschiedenen Anlagen durch die verschiedenen Dienste eingesetzt bzw. zum Teil durch diesen Prozess gewonnen worden sind. Diese Informationen kommen in der Form von Routing-Faktoren zur Anwendung, mit deren Hilfe die Kosten der Anlagen auf die verschiedenen Dienste verteilt werden. Als Ergebnis erhält man die Anteile der Kosten eines jeden Anlagentyps, die den verschiedenen Diensten zuzuordnen sind. Durch Aufaddieren der Kostenanteile eines Dienstes über alle Anlagentypen erhält man die dienstespezifischen Kosten und durch Dividieren mit dem Volumen des entsprechenden Dienstes erhält man die Kosten pro Einheit dieses Dienstes.

Besonderheiten – im Vergleich zur Kostenbestimmung einer Verbindungsminute im PSTN/ISDN – liegen in der Berücksichtigung von Verkehrsklassen in dem hier betrachteten Multi-Service-Netz.

Für die Netzelemente des Breitbandnetzes (inkl. Gateways) bestimmen sich die Einheitskosten über das sogenannte Minuten-Äquivalent einer Sprachminute, ausgedrückt in kbit/s. In Abhängigkeit der Dimensionierungserfordernisse aufgrund einer Qualitätsdifferenzierung von Diensten im Netz wird die Kapazität für das Minuten-Äquivalent nicht durch die dienstespezifische Bandbreite, sondern durch seine – den Dimensionierungsanforderungen entsprechende „Äquivalente Bandbreite“ bestimmt. In einem ersten Schritt sind daher die Gesamtkosten des Dienstes zu bestimmen (nach Maßgabe der Inanspruchnahme von Netzkapazitäten zur Hauptverkehrsstunde des Gesamtnetzes) und in einem zweiten Schritt kann dann eine Verteilung auf die Einheit (hier Sprachminute) erfolgen.

Für die Elemente der Kontrollschicht wird anstelle der Minuten-Äquivalente die Zahl der Verbindungen als Divisor herangezogen und auf Basis der durchschnittlichen Gesprächslänge auf die Verbindungsminute umgerechnet.

Im Rahmen der aktuellen EU-Empfehlung für die Bestimmung von Terminierungsentgelten in Fest- und Mobilnetzen [EU Kommission-09a] muss ein aktuelles Kostenmodell auch die dort definierten sogenannten pure LRIC für den Terminierungsverkehr bestimmen können. Dies sind im Prinzip die Grenzkosten, die entstehen, wenn man zu allen anderen Verkehren nur noch den Terminierungsverkehr hinzufügen würde. Zu den Verkehren, die vor dem Hinzufügen des Terminierungsverkehrs bereits im Netz berücksichtigt sein müssen, zählt beispielsweise auch der im Netz entstehende Verkehr, der in anderen Netzen terminiert werden soll, der Originierungsverkehr. D.h. dass im Grundsatz die Netzelemente zur Zusammenschaltung von Sprachnetzen für den Austausch von Verkehr untereinander schon vorhanden sein müssen. Sie werden ohne den Terminierungsverkehr nur anders dimensioniert. Die Gemeinkosten sind entsprechend der EU-Empfehlung für die Bestimmung der pure LRIC auszuklammern bzw. ggf. angemessen (z.B. Wholesalekosten) zu berücksichtigen. Das Modell bestimmt diese Kosten des pure LRIC Terminierungsverkehrs in zwei Modellläufen, indem es einmal mit und einmal ohne Verkehr die Kosten des effizienten Netzes bestimmt und die Differenz der Kosten auf die Minuten des Terminierungsverkehrs aufteilt. Diese Rechnungen kön-

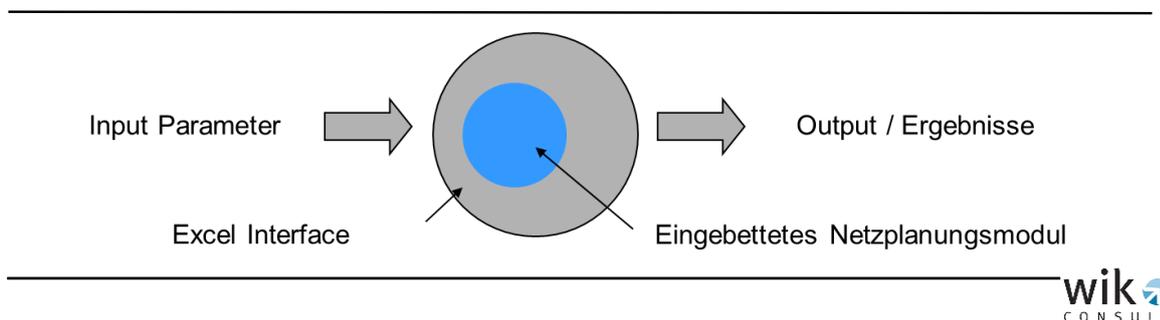
nen, über Parameter gesteuert, in zwei oder in einem (modellintern doppelten) Rechnungsschritt in einem Gang erfolgen.

Wie bisher für PSTN/ ISDN Netze üblich erlaubt das Modell eine Spreizung der LRAIC-basierten Terminierungsentgelte nach dem Prinzip des Element Based Charging in Local, Single und Double Transit. Diese Spreizung mag sich aber überholen, wenn es in NGN Netzen nur noch wenige (nationale) Übergabepunkte gibt. Für die Bestimmung der pure LRIC wurde auf diese Spreizung verzichtet. Es wird nur ein Wert ausgegeben.

8 Merkmale des Software-Tools

Das Modell wird durch eine Software implementiert, die in ihrer nutzerfreundlichen Oberfläche auf Excel basiert. Hier werden die wesentlichen Parameter definiert, die die Netzstruktur (z.B. Anzahl Netzebenen und deren Knoten) bestimmen, während die umfangreichen Nachfrageparameter über Text basierte files eingelesen werden. Aufgrund der für die Netzoptimierung erforderlichen iterativen Berechnung erfolgt der erste Schritt der Netzplanung in einem Netzplanungsmodul, das der Excel Oberfläche unterlegt ist und in dem die Algorithmen zum Netz-Design in der Programmiersprache C++ geschrieben und mit MS Visual Net kompiliert worden sind. Für verschiedene funktionale Blöcke gibt es auf C++ basierenden Funktions-Module in Form kompilierter DLL (Digital Link Libraries). Diese stehen in einer direkten Kommunikation mit dem in MS Excel implementierten Master-Programm. Zentrale Elemente des Netzplanungsmoduls sind die Generierung der Standort bezogenen Nachfrage auf Ebene 0, das Traffic Routing sowie die optimierte bedarfsabhängige Systemzuweisung. Diese Berechnungen erfordern häufig iterative Optimierungen, die sich nicht oder nur sehr umständlich in Excel nachbilden lassen.

Abbildung 8-1: Excel Interface und eingebettetes Netzplanungsmodul



Nach Beendigung der Netzplanungs-Berechnungen werden alle relevanten Kostentreiber-Informationen (ähnlich Stücklisten) für den zweiten Schritt der Berechnungen an ein Kostenmodul weitergeleitet, das alle Kosten der Netzkomponenten bestimmt, gegliedert nach Netzebenen und Kommunikationsschichten. Alle Berechnungen zur Bestimmung der Kosten sind linear und bedürfen keiner Iterationen, so dass das Kostenmodul gänzlich in MS Excel programmiert wurde.

Das Kostenmodul stellt dann auch die Oberfläche für die Präsentation aller Ergebnisse in hoher Detailtiefe bereit, einschließlich der Typen und Zahl aller Netzknoten je Ebene und deren Art und Menge an Schnittstellen, die Trassen und Kabellängen etc.

9 Abschließende Bemerkungen

Das vorliegende Dokument beschreibt die vom WIK entwickelte und vertretene Methodik zur Analyse der Kostenstruktur des Breitbandnetzes unter Berücksichtigung des Konzentrationsnetzes sowie des IP-Kernnetzes. Es handelt sich dabei um einen generischen Modellierungsansatz, der auf der einen Seite eine nachfragegetriebene Netzdimensionierung Bottom-up vornimmt und auf der anderen Seite das abgeleitete Mengengerüst (Nachfrage) unter Rückgriff eines Kostenmoduls bewertet. Es umfasst die Modellierung des logischen und des physikalischen Netzes und verlangt für die Modelanwendung keine, aus der Ist-Struktur des nationalen Netzbetreibers abgeleiteten Mengengrößen. Mit Hilfe der vorgeschlagenen Methodik wird es bei Verfügbarkeit valider Eingabedaten möglich sein, eine Bottom-Up Kostenstudie für ein effizientes, neu errichtetes Breitbandnetz nach dem Stand der Technik zu erstellen.

Der vorgestellte Modellierungsansatz erlaubt die Ermittlung des Investitionswertes für das Breitbandnetz sowie angemessener Betriebs- und Gemeinkosten. Aufgrund des elementorientierten Ansatzes werden dabei Informationen über die Inanspruchnahme der Netzelemente durch die verschiedenen Dienste – im Modell abgebildet durch Verkehrsklassen – generiert und können für eine verursachungsgerechte Kostenzurechnung verwendet werden.

Die RTR GmbH hat ein Referenzdokument für die Spezifizierung des nun vorliegenden Kostenmodells einer öffentlichen Kommentierung zugänglich gemacht, um den Marktteilnehmern Gelegenheit für konzeptionelle und inhaltliche Verbesserungen zu geben. Als Ergebnis der Konsultation und Auswertung der Stellungnahmen wurden entsprechende Modifikationen in der Spezifikation des Modells vorgenommen und implementiert, die in diese Modellbeschreibung eingegangen sind.

Das Kostenmodell (bzw. dessen Ergebnisse) kann von einer Regulierungsbehörde – neben anderen Instrumenten – zur Fundierung von Entscheidungen der Entgelthöhe im Bereich des Netzzugangs oder der Zusammenschaltung herangezogen werden. Die Aussagekraft der Ergebnisse hängt dabei wesentlich von der Güte der eingesetzten Modellparameter ab, welche unter anderem auf Basis eines Fragebogens an die Marktteilnehmer ermittelt werden.

Literaturverzeichnis

- [Begain-09]: K. Al-Begain, Ch. Balakrishna, L.A. Galindo, D. Moro., IMS: A Development an Deployment Perspective, John Wiley and Sons, 2009
- [Black-02]: Uyles Black, MPLS and Label Switching Networks, Prentice Hall 2002
- [Caballero-05]: J. M. Caballero QoS in Metro Etherent Provision white paper Trendscomms July 2005 Next Generation,
http://www.techonline.com/electronics_directory/techpaper/193102978
- [cienna-08]: ROADM in Network Architectures, 2008, www.cienna.com
- [Ericsson-07] Introduction to IMS, White paper
- [EU Kommission-09]: Draft recommendation on regulated access to Next Generation Access Networks (NGA); Brussels, [Draft 12 June 2009 for 2nd public consultation]: C(2009)
- [Eu Kommission-09a]: Europäische Kommission, Recommendation on the Regulatory Treatment of Fixed and Mobile Termination Rates in the EU - EXPLANATORY NOTE, Brussels,
http://ec.europa.eu/information_society/policy/ecomms/doc/library/public_consult/termination_rates/explanatory.pdf.
- [EU Kommission-10]: Commission recommendation on regulated access to Next Generation Access Networks (NGA); Brussels, C(2010) 6223
- [Fielder-10] M. Fielder, , H. Hlavacs, K. Hackbarth, P. Arlos Quality of Experience Metrics and performance evaluation, annals of telecommunications Vol 65 n° ½ 2010
- [Garcia-10] A. García, L. Rodríguez de Lope, K. Hackbarth, Application of Cost Models over Traffic Dimensioning with QoS Restrictions, forthcoming in Annal de Telecommunication, Special Issue on Quality of Experience and Socio-Economic Issues of Network-Based Services Vol. 65 n° ¼ March/April 2010
- [Hackbarth-06]: K. Hackbarth, G. Kulenkampff, Technische Aspekte der Zusammenschaltung in IP-basierten Netzen unter besonderer Berücksichtigung von VoIP, Studie für die Bundesnetzagentur, July 2006
- [Jay-10]: S. Jay. T. Plückebaum, D.Ilic, Der Einfluss von Next Generation Access auf die Kosten der Sprachterminierung , WIK Diskussionbeitrag 335 ,
http://www.wik.org/uploads/media/Diskus_335.pdf
- [Jenkins-06]: D. W. Jenkins, D.A. Scholtens, Metro WDM Design & Evolution, Tellabs white paper, 2006, <http://www.tellabs.com/resources/papers/tlabmetrowdm.pdf>
- [Mannie-04]: E. Mannie, Ed. Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture Request for Comments: 3945 October 2004, <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3945.txt>
- [Marcus-10]: J. S. Marcus, Comcast vs FCC: Rough water ahead for the US FCC?, in WIK Newsletter Nr. 79, Juni 2010, S. 20-21
- [Palm-04]: ITU- xDSL Standards, ITU Workshop, All Star Network Access, Geneva 2004,
http://www.itu.int/ITU-T/worksem/asna/presentations/Session_6/asna_0604_s6_p4_palm.pdf

- [Rendon-09] J. Rendon, T. Plückebaum, S. Jay, LRIC cost approaches for differentiated QoS in broadband networks, WIK-Diskussionsbeitrag Nr.325 Bad Honnef Nov. 2009
- [RTR-2010] Bescheid M 3/09-103 der Telekom-Control-Kommission vom 06.09.2010.
- [Schröder-05]: J. Schröder, M. Götzer, R. Müller, Resource management in next generation networks, AEÜ Nr. 60 2006 Eslsevier
- [Shaikh-10]: J. Shaikh, M. Fielder, D. Collange, Quality of Experience from user and network perspective, annals of telecommunications Vol 65 n° ½ 2010
- [Shukla-07]: V. Shukla et. All, Next Generation Optical Network- Enabling Dynamic Bandwidth Services, Proc. of the National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC), Anaheim, CA, March 25, 2007, <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=NFOEC-2007-NWB3>
- [Siegmond-02]: G. Siegmund, Technik der Netze, Hüttig Verlag Heidelberg 5^o Auflage 2002
- [WIK-98]: Analytisches Kostenmodell für das Ortsnetz, Referenzdokument http://www.bundesnetzagentur.de/cae/servlet/contentblob/83630/publicationFile/2477/Ei_nanalytischesKostenmodellId259pdf.pdf, 4. März 1998
- [WIK-00]: Analytisches Kostenmodell Nationales Verbindungsnetz, Referenzdokument 2.0, <http://www.bundesnetzagentur.de/cae/servlet/contentblob/14338/publicationFile/859/AnalytischesKostenmodellId270pdf.pdf>, 30. Juni 2000
- [WIK-02]: Analytisches Kostenmodell Nationales Verbindungsnetz, Referenzdokument 2.0; erstellt im Auftrag der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post, 2002, http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/BNetzA/Bundesnetzagentur/AmtsblattPublikationen/DruckschriftenAllgemein/AnalytischesKostenmodell/AnalytischesKostenmodellId270pdf.pdf?__blob=publicationFile
- [WIK-05]: Analytisches Kostenmodell für ein Breitbandnetz, Referenzdokument 2005, http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1931/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/RegulierungTelekommunikation/AnalytischeKostenmodelle/Dokumente_Basepage.html?nn=69052#doc83628bodyText5
- [WIK-07]: WIK Fachtagung „Network Neutrality: Implications for Europe“, Bonn, 3./4. Dezember 2007 (Zusammenfassung und Präsentationsfolien auf www.wik.org)

Anhang 1

Der in diesem Dokument vorgestellte Modellierungsansatz hat generischen Charakter. Damit soll eine Robustheit des Modells gegenüber technischen Veränderungen sichergestellt und somit das Modell zukunftssicher gestaltet werden.

Diese Vorgehensweise hat jedoch den Nachteil, dass die Modellbeschreibungen an vielen Stellen abstrakt bleiben.

In dem vorliegenden Anhang wird konkretisiert, welche technischen Realisierungsformen für die Modellanwendungen implementiert sind. Dabei handelt es sich um Realisierungsformen, die wir – vor dem Hintergrund des (Pure) LRIC Ansatzes – gegenwärtig als sinnvoll erachten und für die marktfähige Einrichtungen existieren (bzw. in naher Zukunft erwartet werden).

In der nachfolgenden Tabelle sind für das Konzentrationsnetz 4 (#1 bis #4) und für das Kernnetz 3 (#5 bis #7) verschiedene Realisierungsformen anhand der Protokoll-Stacks dargestellt sowie die zugehörige logische Netzstruktur als auch die physikalische Topologie benannt.

Sämtliche Varianten für das Konzentrationsnetz sehen den Einsatz von Ethernet (in verschiedenen Kombinationen mit anderen Protokollschichten) vor, jedoch kein IP. Umgekehrt gilt dies für das Kernnetz, welches über alle Varianten IP-basiert ist. Diese Herangehensweise wurde im Zuge der Konsultation von den Marktteilnehmern gestützt, die die Anwendung von IP im Kernnetz uneingeschränkt bestätigt haben.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt halten wir einen Einsatz von IP im Konzentrationsnetz nicht für sinnvoll, da

- die höheren Kosten von IP-Routern im Vergleich zu Ethernet-Switches nennenswert sind,
- die Verkehre im Wesentlichen hierarchisch zum Kernnetz geführt werden, da erst dort hinreichende economies of scale realisiert werden können (mit anderen Worten: eine Verkehrslenkung – oder auch MPLS basierte Verkehrsführung – innerhalb der Konzentrationsnetz-Cluster ist ökonomisch nicht sinnvoll).

Wir gehen davon aus, dass der Modellierungsrahmen von jeweils maximal 3 Netzebenen im Konzentrations- und Kernnetz genügend Spielraum bietet, IP-Einrichtungen auch teilnehmernah zu modellieren.

Tabelle A1-1: Implementierte Varianten der Realisierung des logischen und physikalischen Netzes

		Konzentrationsnetz				Kernnetz			
Schicht/Layer	Name	#1	#2	#3	#4		#5	#6	#7
3	IP						IP	IP	IP
2-3	Shim	MPLS-TP					MPLS-TP	MPLS	MPLS
2	Ethernet	Ethernet	Ethernet	Ethernet	Ethernet				
1a	eph1		NG-SDH		OTN			OTN	
1b	oph1			DWDM	OTN			OTN	DWDM
0a	Faser/ Kabel	Fibre	Fibre	Fibre	Fibre		Fibre	Fibre	Fibre
0b	Leerrohr/Graben								
Netzstruktur (logisches Netz)		Ring	Stern/ Doppelabstützung	Stern/ Doppelabstützung	Stern/ Doppelabstützung	obere Ebene	vermascht/ Ring	vermascht/ Ring	vermascht/ Ring
		Ring	Stern/ Doppelabstützung	Stern/ Doppelabstützung	Stern/ Doppelabstützung	mittlere an obere Ebene	Ring	Stern/Doppel- abstützung	Stern/Doppel- abstützung
		Ring	Stern/ Doppelabstützung	Stern/ Doppelabstützung	Stern/ Doppelabstützung	untere an mittlere Ebene	Ring	Stern/Doppel- abstützung	Stern/Doppel- abstützung
Topologie (physik. Netz)		Ring	Ring	Ring	Ring	obere Ebene	Multi-Ring- Topologien	Multi-Ring- Topologien	Multi-Ring- Topologien
		Ring	Ring	Ring	Ring	mittlere an obere Ebene	Multi-Ring- Topologien	Multi-Ring- Topologien	Multi-Ring- Topologien
		Ring, ggf. Baum	Ring, ggf. Baum	Ring, ggf. Baum	Ring, ggf. Baum	untere an mittlere Ebene	Multi-Ring- Topologien	Multi-Ring- Topologien	Multi-Ring- Topologien

Anhang 2: Kostentreiber

Tabelle A2-1: Kostentreiber Layer 2/3

Einrichtung	Kostentreiber
Ports	Bandbreite (BW) / Richtungen
Schnittstellenkarten	Bandbreite (BW) / Ports
(PIU) Aggregation Switch	Bandbreite (BW) / Steckplätze 138
(PIU) Edge Router	Bandbreite (BW) / Steckplätze
(PIU) Core Router	Bandbreite (BW) / Steckplätze
Rack	Plug In Units (PIU) / Höheneinheiten (HE)

Tabelle A2-2: Kostentreiber Layer 1

Einrichtung	Kostentreiber
Ports	Bandbreite (BW) / Richtungen
Schnittstellenkarten	Bandbreite (BW) / Ports
(PIU) (O)ADM	Ringkapazität / Steckplätze
(PIU) ROADM	Ringkapazität / Steckplätze
(PIU) OXC	(Kantengrad) / Kantenkapazität (BW) / Steckplätze
(PIU) CWDM	Ringkapazität / Steckplätze
(PIU) DWDM	Ringkapazität / Steckplätze
Rack	Plug In Units (PIU) / Höheneinheiten (HE)
Regenerator	Kantenlänge / Technologie / Glasfasern

Tabelle A2-3: Kostentreiber Layer 0

Einrichtung	Kostentreiber
Kabel	km (Distanz)
Gräben	km (Distanz)
Leerrohre	km (Distanz)

138 für Schnittstellenkarten

Tabelle A2-4: Kostentreiber Kontrollschicht

Funktionseinheit	Standort	Kostentreiber
Softswitch für Dienste innerhalb des Bezirks	begrenzte Anzahl an Kernnetzstandorten (Input Parameter je Netzebene und Anzahl Standorte)	BH Verbindungswünsche
Media Gateway	An allen Kernnetzstandorten, an denen IC mit Netzen veralteter Systeme (PSTN/ISDN, PLMN) angeboten wird	BH-Verkehr und entstehende Anzahl von E1 Gruppen
BRAS	begrenzte Anzahl an Kernnetzstandorten (Input Parameter je Netzebene und Anzahl Standorte)	BH Breitbandsitzungswünsche
IP Gateway	An allen Standorten, an denen Interconnection zu IP-Netzwerken angeboten wird	BH IP Paketstrom, BH Bandbreitenbedarf
DNS server	An einem oder zwei Kernnetzstandorten	BH Verbindungswünsche
Session Border Controller (SBC)	begrenzte Anzahl an Kernnetzstandorten (Input Parameter je Netzebene und Anzahl Standorte)	BH Verbindungswünsche (IC-calls)
Mediagateway Controller	begrenzte Anzahl an Kernnetzstandorten (Input Parameter je Netzebene und Anzahl Standorte)	BH Verbindungswünsche (IC-calls)