

Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz Version 2.3

Autoren:

K. Hackbarth, Universität von Kantabrien, Santander, Spanien
G. Kulenkampff, WIK-Consult
T. Plückebaum, WIK-Consult

WIK-Consult GmbH
Rhöndorfer Str. 68
53604 Bad Honnef
Deutschland

Bad Honnef, 15. August 2016

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XII
1 Einführung	1
1.1 Gegenstand und Zielsetzung	1
1.2 Aufbau des Dokuments	3
1.3 Übersicht über das NGN Konzentrations- und Kernnetz mit BNG	4
2 Methodischer Ansatz für das Kostenmodell Breitbandnetz	8
2.1 Analytische Kostenmodelle für IP-basierte Netze	8
2.2 Konzeptioneller Rahmen des hier vorliegenden Kostenmodells	9
2.3 Anforderungen an das Kostenmodell und zentrale Merkmale des Modellierungsansatzes	12
2.4 Modellierungsgegenstand: Konzentrationsnetz und IP-Kernnetz	15
2.4.1 Modellierung des logischen und physikalischen Netzes sowie der Kontrollplattform	15
2.4.2 Übersicht zu den Netzsegmenten und zugehörigen Verkehren	15
2.4.3 Abgrenzung gegenüber dem NGA	18
3 Nachfragemodellierung	23
3.1 Nachfrage und QoS-Differenzierung	23
3.2 Informationsanforderungen an Verkehrsdaten	25
3.3 Bottom-up Bestimmung der Verkehrsnachfrage	31
3.3.1 Dienstmodell	33
3.3.1.1 Verbale Beschreibung aktueller Dienste	34
3.3.1.2 Modellierungsrelevante Eigenschaften der Dienste	35
3.3.1.3 Vereinfachtes Dienstmodell	36
3.3.2 Berechnung der Verkehrsnachfrage	38
3.4 Berücksichtigung von IPTV im Breitbandkostenmodell	42
3.4.1 IPTV – Outband	42
3.4.2 IPTV – Inband	44
3.5 Spezifische Layer 2, Layer 1 und Layer 0 Nachfrage	46

3.5.1	Kapazitätsnachfrage auf Layer 2 und Layer 1	48
3.5.2	Nachfrage nach unbeschalteter Glasfaser (Layer 0)	49
3.5.3	Berücksichtigung der Kapazitätsnachfrage aus dem Mobilfunknetz	49
4	Netzgestaltung und Dimensionierung	51
4.1	Entwurf der Netzhierarchie	52
4.2	Logische Netzstruktur und Verkehrsführung	57
4.2.1	Konzentrationsnetz	57
4.2.2	Kernnetz	59
4.2.2.1	Vorgabe von Serverstandorten im Kernnetz	62
4.2.2.2	Hierarchisches Kernnetz	62
4.2.2.3	Vermaschtes Kernnetz auf der obersten Netzebene bzw. im 1-Ebenen-Kernnetz	64
4.2.3	Verkehrsführung von und zu Zusammenschaltungspunkten	66
4.3	Redundanzen in logischer und physikalischer Netzstruktur	68
4.4	Netzdimensionierung	73
4.4.1	Dimensionierung und QoS-Realisierungsform	74
4.4.2	Dimensionierung von Knoten und Kanten	75
5	Physikalisches Netz und seine Beziehungen zum logischen Netz	81
5.1	Stand der Entwicklung der Systeme für das physikalische Netz	84
5.1.1	SDH/SONET	85
5.1.2	Weiterentwicklungen des SDH/SONET-Modells	89
5.1.3	Entwicklungen in der logischen Netzschicht (IP als auch Ethernet) und deren Einfluss auf die Entwicklung der physikalischen Plattform	90
5.1.4	Next Generation-SDH (NG-SDH)	92
5.1.5	Optisches Transportnetz (OTN)	94
5.1.6	Ethernet und IP over DWDM	98
5.1.7	Erweiterung des Netzzugangs im Konzentrationsnetz	99
5.2	Anwendung der Architekturen im Breitband-Kostenmodell	100
5.3	Topologische Aspekte für das physikalische Netz	105
5.3.1	Topologie und OCh-Führung im Konzentrationsnetz sowie in den hierarchischen Segmenten des Kernnetzes	106
5.3.2	Topologie und OCh-Führung im Ring sowie im vermaschten Kernnetz	107

5.3.3 Schichten im physikalischen Netz	109
6 Kontrollschicht	111
6.1 NGN und IMS	111
6.2 Next Generation Internet (NGI)	114
6.3 NGN und NGI im Kostenmodell	116
6.4 Allgemeine Funktionselemente im Breitbandnetz	117
7 Systemzuweisung, Investitionswertbestimmung und Kostenberechnung	120
7.1 Ableitung eines generischen Equipments für Einrichtungen des logischen und physikalischen Netzes	120
7.1.1 Systemparameter	120
7.1.2 Preisparameter	124
7.2 Systemzuweisung und Investitionswertbestimmung für das logische Netz	124
7.2.1 Teilnehmer anschließendes Equipment im MPoP – Systemzuweisung und Abgrenzung gegenüber dem NGA	125
7.2.2 Ebene 0 – Systemzuweisung	127
7.2.3 Ebene 2 – Systemzuweisung	133
7.2.4 Ebene 3 – Systemzuweisung	136
7.2.5 Ebene 5 – Systemzuweisung	138
7.3 Systemzuweisung und Investitionswertbestimmung für das physikalische Netz	140
7.3.1 Systemzuweisung und Investitionswertbestimmung in Ringtopologien	140
7.3.2 Systemzuweisung und Investitionswertbestimmung in vermaschten Topologien (flache Kernnetzebene)	146
7.4 Systemzuweisung und Investitionswertbestimmung für die Kontrollschicht	150
7.5 Ermittlung der netzbezogenen Kosten (Transportkosten ausgedrückt in Minutenäquivalenten)	151
7.5.1 Annualisierte Capex	151
7.5.2 Bestimmung der Gesamtkosten und Kosten für einen Dienst	152
8 Indirekte Investitionen und OPEX	154
9 Merkmale des Software-Tools	155
10 Abschließende Bemerkungen	156
Literatur	157
Anhang zum Referenzdokument	165

1 Anhang: Generierung der Verkehrsnachfrage	167
2 Anhang: Modelle für die Berechnung von Verkehrs- und Bandbreitenmatrix (Routing-Regeln)	171
2.1 Routing im Konzentrationsnetz am Beispiel des 0-2 Intra-Cluster Verkehrs	171
2.2 Routing im Kernnetz	172
2.2.1 Routing Ende-zu-Ende ON-Net Verkehr im Kernnetz	173
2.2.2 Routing von Client-Server Verkehr im Kernnetz	175
3 Anhang: Berechnung von mark-up Faktoren für QoS Parameter	177
3.1 Einleitung	177
3.2 Wartesysteme mit Poisson Ankunftsrate	179
3.3 Warteverlustsystem mit Poisson Ankunftsrate	186
3.4 Allgemeines Wartesystem	188
3.5 Verkehrsintegration unter Wartesystemen mit Priorität	192
4 Anhang: Detaillierte Beschreibung von VoIP-Diensten	198
5 Anhang: Generische Nachfragemodellierung – Nutzertypen und Anschlusstechnologien	201
5.1 Nutzermodell	201
5.2 Technologien der zugehörigen Anschlussnetze	202
5.3 Zuweisung von Anschlusstechnologien und Diensten zu Nutzern	204
6 Anhang: Ableitung der Standort- und Nachfragerinformationen aus Daten des PSTN/ISDN	207
7 Anhang: Inputparameter Netzplanungsmodul	208
7.1 VORBEMERKUNG	208
7.2 SERVICE INPUT	208
7.3 TRAFFIC DEMAND	217
7.4 NETWORK DESIGN	220
7.4.1 Scenario Parameters	220
7.4.2 Locations, Voice-IC, Design and Protection	221
7.4.3 Core Optimisation	225
7.5 SYSTEM ASSIGNMENT	226
7.5.1 Redundancy and Layer 1 Technology	226
7.5.2 Logical System Assignment	226

7.5.3 Physical System Assignment	227
7.6 MPOP-LIST	229
8 Anhang: Inputparameter Kostenmodul	231
8.1 Control Layer	231
8.2 WACC	232
8.3 Economic lifetime	233
8.4 Expected annual rate of price change	234
8.5 Other parameters	236
8.6 OPEX: Zuschlagsfaktoren auf den Investitionswert	236

Anlagen zum Referenzdokument Version 2.3:

Anlage 1: Berechnung der Kosten der Sprachzusammenschaltung

Anlage 2: Berechnung der Kosten von Bitstromzugang

Anlage 3: Berechnung der Kosten von Mietleitungen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Lineares Kostenmodell	8
Abbildung 2-2:	ITU Planning Model	9
Abbildung 2-3:	Schematische Darstellung eines TELRIC-Modells zur Kostenberechnung in Telekommunikationsnetzen	10
Abbildung 2-4:	Schematisierte Netzebenen; zugehörige Knotenzahl - parametergesteuert	14
Abbildung 2-5:	IP-PoP als gemeinsamer Standort zweier Netzebenen	16
Abbildung 2-6:	Netzsegmente im Breitbandnetz	17
Abbildung 2-7:	Heterogenität der Länge der dedizierten Anschlussleitung im NGA	19
Abbildung 2-8:	NGA-Architekturen und ihre Realisierung im MPoP	20
Abbildung 2-9:	MPoP als Standort der untersten Netzebene im Konzentrationsnetz	21
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	33
Abbildung 3-3:	Online-Nutzung in Deutschland	34
Abbildung 3-4:	Korrelation zwischen Bandbreitanforderung eines Dienstes und seiner Multimedialität	35
Abbildung 3-5:	Traffic Transformation Function	45
Abbildung 3-6:	Illustration der Multicastströme im logischen Netz	46
Abbildung 3-7:	Kapazitätsnachfrage auf Layer 1 und abgeleitete Kapazitätsnachfrage aus Layer 2 und Layer 3	47
Abbildung 4-1:	Modellierungsrahmen Netzstruktur	52
Abbildung 4-2:	Nachfragegetriebene Netzmodellierung	54
Abbildung 4-4:	Sternstruktur im 2-Ebenen Konzentrationsnetz	59
Abbildung 4-5:	Einrichtungen im 2-Ebenen-Kernnetz (IP-Kernnetz)	63
Abbildung 4-6:	Logische Netzstruktur eines hierarchischen 2-Ebenen Kernnetzes	64
Abbildung 4-7:	Einsatz von LSR im Ring	65
Abbildung 4-8:	Ring als Grundform der Mehrwegführung am Beispiel des 2-Ebenen Konzentrationsnetzes	69
Abbildung 4-9:	Doppelung von logischen Einrichtungen im 2-Ebenen-Kernnetz auf Ebene 3 und 5	70
Abbildung 4-10:	Doppelung von technischen Einrichtungen des physikalischen Netzes (Px)	71

Abbildung 4-11: Standortabsicherung: Clusterbildung bei Einfach- (a) und Doppelanbindung (b)	72
Abbildung 5-1: Grundsätzliche Funktionen der physikalischen Transportschicht und ihrer zugehörigen Netzelemente	82
Abbildung 5-2: Abbildung einer Sternstruktur aus der logischen Netzschicht auf eine Ringtopologie in der physikalischen Netzschicht	83
Abbildung 5-3: Zeitmultiplex – allgemeine Darstellung	86
Abbildung 5-4: Optisches Multiplexen (Frequenzmultiplex)	87
Abbildung 5-5: Traditionelles Schichtenmodell eines nationalen Netzbetreibers	88
Abbildung 5-6: Protokolle des NG-SDH und deren Realisierung in Form von MultiService Switch Plattform (MSSP)-Einrichtungen	94
Abbildung 5-7: Signalstruktur des OTN	95
Abbildung 5-8: Endpunkte der OTN-Schichten an einem Netzbeispiel	97
Abbildung 5-9: Abschnitte der TCM-Überwachung an einem Beispiel für eine Ende-zu-Ende-Verbindung über die Netze zweier Betreiber	97
Abbildung 5-10: Schichten bei Führung der Bandbreitenanforderungen aus den logischen Netzen direkt über optische Träger	99
Abbildung 5-11: Schichten bei der Führung der Leitungsnachfragen aus den logischen Netzen ausschließlich mittels OTN	102
Abbildung 5-12: Schichten bei der Führung der Leitungsnachfragen aus den logischen Netzen sowohl über OTN als auch SDH/SONET	104
Abbildung 5-13: Funktionen der OTN-Schichten	105
Abbildung 5-14: Cluster (a) und Ringbildung im Cluster auf Basis des Kleeblatt-Algorithmus (b)	107
Abbildung 5-15: Beispiel für eine logische Netzstruktur (a) und deren zugehörige physikalische Topologie (b) im flachen Kernnetz	108
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: Kapazitätsbereitstellung im IMS mittels der Policy Decision Function (PDF)	116
Abbildung 6-4: Einrichtung der Kontrollschicht	118
Abbildung 7-1: Plug-In-Unit (PIU) mit Schnittstellenkarten und Ports	121
Abbildung 7-3: Schematische Darstellung für die MPoP-Einrichtungen (Ebene 0)	130

Abbildung 7-4:	Schematische Darstellung der Ebene 2 Einrichtungen	134
Abbildung 7-5:	Schematische Darstellung für die Edge-Router-Einrichtungen und Anbindung der Ebene 2 Einrichtung (in BNG integriert)	137
Abbildung 7-6:	Schematische Darstellung für die Label Switch Router-Einrichtungen mit Anbindung des LER	139
Abbildung 7-7:	Schematischer Aufbau eines RADM bzw. ROADM	141
Abbildung 7-8:	Zusammenspiel von Kapazitäten von Layer 2/3 Einrichtungen zu Layer 1 Einrichtungen	144
Abbildung 7-9:	Auswahl des Kabeltyps und zu berücksichtigende Größen	146
Abbildung 7-10:	Schematischer Aufbau eines multidirektionalen (mit mehr als zwei Richtungen) ROADM	147
Abbildung A 2-1:	ON-Net Verkehrsströme im 2-Ebenen Kernnetz nach Tabelle A 2-1	175
Abbildung A 3-1:	Mark-up-Faktor und relative Belastung des Wartesystems in Funktion der Bandbreite bei $E(L) = 150$ oct.	181
Abbildung A 3-2:	Mark-up-Faktor und relative Belastung des Wartesystems in Funktion von $E(\tau_b)$ bei $v_b = 1$ Mbps	182
Abbildung A 3-3:	Mark-up-Faktor in Funktion der Basisbandbreite und der Durchlaufzeit des Basiswartesystems in ms	183
Abbildung A 3-4:	Mark-up-Faktor in Funktion der Basisbandbreite und der Durchlaufzeit der Ende-zu-Ende Verbindung in ms	184
Abbildung A 3-5:	Struktur des Konzentrationsnetzes für das Netzbeispiel	185
Abbildung A 3-6:	Bandbreitenwerte des Netzbeispiels eines Konzentrationsnetzes bei Festlegung der Reduktion der Durchlaufzeit, der durch den α Faktor beeinflusst ist	186
Abbildung A 3-7:	Durchlaufzeiten für ein G/G/1 System mit $V_s = 1$ Mbps, $E(L) = 150$, $\lambda = 633,3333333$ [p/s]	191
Abbildung A 3-8:	Relative Abweichung der Durchlaufzeit des G/G/1 Systems aus Abbildung A3-7 gegenüber der Durchlaufzeit eines korrespondierenden M/M/1 Systems	192
Abbildung A 5-1:	Schichten eines NGN unter Fixed Mobile Integration (FMI)	204

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Numerische Beschreibung von Diensten	35
Tabelle 3-2:	Dienstekategorien im vereinfachtem Dienstmodell und ihre zugehörigen Attributwerte	37
Tabelle 3-3:	Beispiel für eine Verkehrszuweisung je Nutzer und Dienstkategorie in Erlang/Busy Hour	39
Tabelle 3-4:	Bandbreitenwerte [kbps] je Nutzer in der Busy Hour entsprechend den Beispielwerten aus Tabelle 3-2 und Tabelle 3-3	40
Tabelle 3-5:	Beispiel für die Bandbreiten (downstream) an einem MPoP nach Nutzertypen bzw. Dienstkategorien, Werte in [Mbps/Busy Hour]	41
Tabelle 3-6:	Durchschnittlicher Kostenanteil von IPTV je betroffenen Ring	43
Tabelle 3-7:	Anteil der Ringe mit IPTV je Netzsegment	43
Tabelle 3-8:	Reduktionsfaktoren für die Layer 0 Kosten bei Berücksichtigung von IPTV	43
Tabelle 4-1:	Beispiel für 4 Netzebenen und die Anzahl zugehöriger Standorte für ein Breitbandnetz in Deutschland, Stand 2016	55
Tabelle 4-2:	Optionen für die logische Struktur eines 3-Ebenen Netzes	61
Tabelle 4-3:	Beispiel für Zusammenschaltungsszenarien in einem 2-Ebenen-Konzentrations- und 2-Ebenen-Kernnetz	67
Tabelle 4-4:	Relative Werte für die Verkehrsverteilung bei Doppelanbindung an einem bzw. zwei Standorten	72
Tabelle 4-5:	Dienste-/Verkehrsklassen-Matrix	77
Tabelle 5-1:	Entwicklung der Übertragungssysteme	83
Tabelle 5-2:	Virtuelle Container und ihre Verkettung im SDH	86
Tabelle 5-3:	Standardisierungs-Institutionen zur Erweiterung der physikalischen Transport-Plattform im NGN	90
Tabelle 5-4:	Entwicklung des Ethernet zum „Carrier Ethernet“	92
Tabelle 5-5:	Zusammenfassende Darstellung der Protokolle des NGN-SDH	93
Tabelle 5-6:	Vergleich der Kapazitätsausnutzung zwischen NG-SDH (vc) und SDH/SONET (cc)	93
Tabelle 5-7:	Derzeitige OTN Einrichtungen und ihre Ethernet-Schnittstellen	96
Tabelle 6-1:	Kontrollschicht-Szenarien in Koordination zwischen der logischen– und physikalischen Ebene	114
Tabelle 6-2:	Kostentreiber der Einrichtungen der Kontrollschicht	119

Tabelle 7-1:	Verschiedene Typen von ADM-Einrichtungen	141
Tabelle A 1-1:	Eingangsdaten über die Verkehre der Nutzer (Busy Hour Erlang) und Bandbreiten (BW) der Dienste	167
Tabelle A 1-2:	Downstream Bandbreiten je Nutzertyp nach Diensten differenziert	168
Tabelle A 1-3:	Bandbreiten je Nutzer in der BH und monatliches Datenaufkommen	168
Tabelle A 1-4:	Aggregierte Bandbreitenwerte eines MPoP mit M=10.000 Nutzern	169
Tabelle A 1-5:	Entwicklung der aggregierten Bandbreiten an einem MPoP in Relation zu der Anzahl der Haushalte und Nutzer bei 50 % Breitbandpenetration und 40 % Marktanteil des Betreibers	170
Tabelle A 2-1:	Beispiel einer Verkehrsmatrix für ON-Net Verkehr	173
Tabelle A 3-1:	Beispiel zur Verteilung der Durchlaufzeit mit L =150 Okt,	185
Tabelle A 3-2:	Ergebnisse eines Beispiels für ein Warte-Verlust System M/M/1/K+1, dessen Werte für K=40 gegen die Werte eines reinen Wartesystems M/M/1 konvergieren	187
Tabelle A 3-3:	Ergebnisse eines Beispiels für ein Warte-Verlust System M/M/1/K+1 mit konstanter von K unabhängiger Durchlaufzeit	188
Tabelle A 3-5:	Vergleich der Ergebnisse für die Berechnung des mark-up Faktors bei Verkehrsintegration mittels DiffServ Verkehrsintegration (mit Dominanz durch k=1 und Verkehrsseparierung)	195
Tabelle A 3-6:	Ergebnisse bei Variation der $E(\tau_k)$ Werte	196
Tabelle A 3-7:	Ergebnisse der Berechnung mit gleichen Paketankunftsrate für alle Verkehrsklassen (braun markiert) im Vergleich zu den vorhergehenden Ergebnissen (gelb markiert)	197
Tabelle A 4-1:	Charakteristische Werte für VoIP	198
Tabelle A 4-2:	Paketlänge für VoIP nach G.726/16kbps in den verschiedenen OSI-Schichten für Anwendung von VoIP im Internet	199
Tabelle A 5-1:	Beschreibung einer Klassifikation von Nutzertypen	201
Tabelle A 5-2:	Attribute der von Anschlusstechnologien auf der Basis von Glasfaser und Kupfer	203
Tabelle A 5-3:	Spektrum einer möglichen Zuweisung von Anschlusstechnologien und damit Anschlussbandbreiten zu Nutzertypen	205
Tabelle A 5-4:	Beispielhafte qualitative Zuordnung von IP-Diensten zu Nutzertypen unter Berücksichtigung der zugeordneten Anschlusstechnologien	206
Tabelle A 6-1:	Grundlegende Daten über Nutzerszenarien pro Standort (Nutzer nach Anschlusstechnologien)	207

Abkürzungsverzeichnis

ADM	Add Drop Multiplexer
ASON	Automatic Switched Optical Network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BA-ISDN	Basisanschluss-ISDN
BH	Busy Hour
BHCA	Busy hour call attempts
BNetzA	Bundesnetzagentur
BNG	Broadband Network Gateway
BRAS	Broadband Remote Access Server
BW	Bandbreite (bandwidth)
CAC	Connection Admission Control
CAPEX	Capital Expenditure
CC	Contiguous Concatenation
CSCF	Call Session Control Function
CX	Crossconnect
DNS	Domain Name Server
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DSL	Digital Subscriber Line
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex
FGI	Future Generation Internet
FR	Frame Relay
FRR	Fast Reroute
FTTB P2P	Fibre to the Building Point to Point
FTTB PON	Fibre to the Building Passive Optical Network
FTTC	Fibre to the Cabinet
FTTEx	Fibre to the Exchange
FTTH P2P	Fibre to the Home Point to Point
FTTH PON	Fibre to the Home Passive Optical Network
FTTH	Fibre to the Home
FTTx	Fibre to the x
G.SHDSL	Global Standard Single-Pair High-speed Digital Subscriber Line
Gb	Gigabit
Gbps	Gigabit per second

GFP	Generic Frame Procedure
GMPLS	Generalized Multiprotocol Label Switching
HDTV	High Definition Television
HSSG	Higher Speed Study Group
HVt	Hauptverteiler
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IMS	IP Multimedia Subsystem
IP	Internet Protocol
IPCN	Internet Protocol Communication and Networks
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
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
LC	Liquid Crystal
LCAS	Link Capacity Adjustment Scheme
LE	Large Enterprise
LER	Label Edge Router
LRIC	Long Run Incremental Cost
LSR	Label Switch Router
LTE	Long Term Evolution
MAN	Metropolitan Area Network
MEF	Metro Ethernet Forum
MPLS	Multiprotocol Label Switching
MPoP	Metropolitan Point of Presence
ms	Millisekunden
MSSP	Multi Service Switch Platform
NASS	Network Attachment Subsystem
NGA	Next Generation Access
NGI	Next Generation Internet
NGN	Next Generation Network

NG-SDH	Next Generation SDH
OADM	Optical Add-Drop-Multiplexer
OAM	Operations, Administration, Maintenance
OCh	Optical Channel
ODU	Optical Data Unit
OEO	optisch-elektrische Umwandlung / optical-electrical-optical conversion
OMS	optische Multiplex-Schicht / Optical Multiplex Section
OPEX	Operational Expenditure
OSI	Open Systems Interconnection
OSPF	Open Shortest Path First
OTN	Optisches Transportnetz / Optical Transport Network
OTS	optische Transportschicht / Optical Transmission Section
OTU	Optical Transport Unit
OXC	optischer Crossconnector
P2P	Peer to Peer
PBB-TE	Provider Backbone Bridges Traffic Engineered
PIU	Plug-In-Unit
P-OTN	passives optisches Transportnetz
PSTN	Public Switched Telephone Network
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RACS	Resource and administration control subsystem
RADM	Reconfigurable Add Drop Multiplexer
RED	Random Early Detection
RFC	Remote Function Call
ROADM	Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer
RSVP	Resource Reservation Protocol
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
S-GMPLS	segmented GMPLS
SLA	Service Level Arrangement
SME	Small Medium Enterprise
SOHO	Small Offices Home Offices
SONET	Synchronous Optical Network
STM	synchrones Transportmodul

STV	Standard Television
TCM	Tandem Correction Monitoring
TCP	Transmission Control Protocol
TDM	Time-division multiplexing
TE-Ansatz	Total Element Ansatz
TELRIC	Total Element Long Run Incremental Cost
TK	Telekommunikation
TSP	Travelling Salesman Algorithmus
UDP	User Datagram Protocol
UPC	User Parameter Control
vc	virtual concatenation
VC	virtueller Container
vgl.	vergleiche
VLAN	Virtual Local Area Network
VoD	Video-on-Demand
VoIP	Voice over IP
VPN	Virtual Private Network
WACC	Weighted Average Cost of Capital
WAN	Wide Area Network
WDM	Wavelength Division Multiplex
WIK	Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur- und Kommunikationsdienste

1 Einführung

Das Referenzdokument Analytisches Kostenmodell für ein Breitbandnetz wurde von der Bundesnetzagentur am 19. Mai 2010 initial zur Konsultation gestellt. Ein die Stellungnahmen des Marktes berücksichtigendes Dokument wurde im Dezember 2010 veröffentlicht. Im Jahr 2014 kam es zu Modellerweiterungen für die Kostenberechnung für Bitstromzugang und Mietleitungen, die jeweils in Anhängen (Anhang 9 und Anhang 10) veröffentlicht wurden. Mit der Konsultation des Modellierungsansatzes Kosten für Mietleitungen erfolgte in der zweiten Jahreshälfte 2014 eine Auswertung der Stellungnahmen, die in das Referenzdokument Version 2.2 vom 22. Dezember 2014 mündeten. Seinerzeit wurde der Aufbau des Dokuments insofern geändert, als dass die produktspezifischen Kosten nun durchgängig in Anlagen beschrieben werden und das Hauptdokument auf die sämtlichen Diensten gemeinsam zugrundeliegenden Transportkosten fokussiert. Zu diesem Zweck wurden die für die Sprachzusammenschaltung spezifischen Modellierungsansätze in einen separaten Teil überführt. Insgesamt existieren drei Anlagen:¹ Anlage 1: Kosten der Sprachzusammenschaltung, Anlage 2: Kosten von Bitstromzugang, Anlage 3: Kosten von Mietleitungen. Am 9. Mai 2016 wurde eine Modellanpassung zur Berücksichtigung der neuen BNG-Architektur zur Konsultation gestellt². Die eingegangenen Stellungnahmen wurden bei der Erstellung dieses konsolidierten Dokumentes berücksichtigt. Der Modellierungsansatz bleibt in seiner Grundstruktur im Sinne eines bottom-up Ansatzes unverändert. Die sich aus der BNG-Architektur ergebenden Implikationen für die Netzdimensionierung finden Berücksichtigung.

1.1 Gegenstand und Zielsetzung

In dem vorliegenden Dokument ist die Grobspezifikation eines analytischen Kostenmodells für das Breitbandnetz dargestellt. Es umfasst das Konzentrationsnetz sowie das IP-Kernnetz. Mit einem Kostenmodell für das Breitbandnetz will die Bundesnetzagentur ein Analyseinstrument zum umfassenden Verständnis der Kosten von Breitbandnetzen schaffen, das auch eine Ermittlung der Kosten effizienter Leistungsbereitstellung für die über ein modernes Breitbandnetz erbrachten regulierten (Vorleistungs-)Produkte ermöglicht. In diesem Zuge erfolgen keine Vorfestlegungen hinsichtlich der ggf. im Rahmen von Entgeltregulierungsentscheidungen zur Anwendung kommenden Maßgrößen.

In Zeiten sich ändernder Technologien und Netzstrukturen können Bottom-Up-Kostenmodelle Erkenntnisse generieren, die über die von Kostennachweisen und Top-Down-Modellen hinausgehen, da diese lediglich die bereits implementierte Technologie und Netzstruktur abbilden können.

¹ [WIK-14f], [WIK-14g], [WIK-14h], Version 2.3: [WIK-16c], [WIK-16d], [WIK-16e].

² [WIK 16]

Die Kostenmodellierung setzt auf den Arbeiten für das „Analytische Kostenmodell für das Breitbandnetz“ [WIK-05] auf, welches im Jahr 2005 von der Bundesnetzagentur zur Konsultation gestellt wurde, und soll in Fortführung dessen zwei Module umfassen: ein Modul für ein Ethernet basiertes Konzentrationsnetz sowie ein weiteres Modul für ein IP-basiertes Kernnetz. Neben der Spezifikation des logischen Netzes umfasst es das physikalische Netz und berücksichtigt die Weiterentwicklungen in den optischen Übertragungsverfahren.

Die Modellierung eines Next Generation Access Network (NGA) ist nicht Gegenstand dieser Grobspezifikation. Die Modellierung des NGA ist als eigenständiges Modul anzusehen, da es – anders als das Konzentrations- und Kernnetz – vorwiegend durch die Infrastrukturkosten bestimmt wird und daher einen Modellierungsansatz erfordert, der den Einsatz eines GIS-Straßenlayers bedarf. NGAs sind nur insoweit für die hier vorgenommene Kostenmodellierung von Relevanz, als dass

- davon auszugehen ist, dass mit dem zunehmenden Einsatz von Glasfasertechnologie zum Endkunden nicht nur die Anschlusskapazitäten, sondern auch das übertragene Datenvolumen gegenüber den bisherigen DSL-Anschlüssen steigt, welches für Konzentrationsnetz und IP-Kernnetz kostentreibend ist. Letztlich sind daher mit den Annahmen zum Verkehrsvolumen im Konzentrations- und IP-Kernnetz Annahmen über die Anschlusstechnologien und ihre Nutzung verbunden.
- Darüber hinaus soll die Modellierung des Konzentrationsnetzes unabhängig von der darunter liegenden NGA Architektur, d.h. „NGA-neutral“ erfolgen. NGA-spezifische Kosten sind aufgrund der hier vorzunehmenden Trennung der Kostenmodellierung in einzelne Module der jeweiligen NGA Architektur zuzuordnen.

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 des zu regulierenden Unternehmens und damit
- die Ermittlung eines externen Maßstabs zur Beurteilung der Kostennachweise des zu regulierenden Unternehmens sowie
- einen sachgerechten Diskurs über zentrale, kostenbestimmende Parameter und deren Auswirkungen auf die Kosten.

Vor dem Hintergrund der genannten Anforderungen ist es das Ziel des vorliegenden Dokumentes – in Analogie zu den Vorgehensweisen bei den Referenzdokumenten zu den Vorgängerversionen, zum nationalen Verbindungsnetz oder der Teilnehmeranschlussleitung –, ein analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz zu spezifizieren, das in nachvollziehbarer Form alle relevanten Beziehungen zwischen Input- und Outputgrößen dokumentiert und somit diese einem kritischen Diskurs zugänglich macht. 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 auf den folgenden Seiten 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. Der Anwendungsbereich des Kostenmodells für das Breitbandnetz erstreckt sich dabei sowohl auf die Höhe der Entgelte von Vorleistungen als auch auf darauf aufbauende Endkundenleistungen. Die hier vorgestellte Methode kann dabei nicht zugleich sämtliche in die Modellrechnung einfließende Parameter umfassen. Eine Übersicht über die verwendeten Inputparameter für das Netzplanungsmodul und das Kostenmodul findet sich in den Anhängen. Die Parameter sind ggf. im Rahmen von Entgeltregulierungsentscheidungen von den Beschlusskammern festzulegen [WIK-05].

1.2 Aufbau des Dokuments

Die Arbeit gliedert sich neben dieser Einleitung in neun weitere Kapitel, wobei das Kapitel 8 lediglich begründet, warum die Modellierung von indirekten Investitionen und OPEX ausgegrenzt wird und das neunte Kapitel die Merkmale des Softwaretools beschreibt. Kapitel zehn beinhaltet die abschließenden Bemerkungen. Das zweite Kapitel beschreibt den grundsätzlichen Charakter eines Bottom-Up- und damit Netzplanungsmodells und stellt für die hier relevante Kostenmodellierung zentrale Modellelemente dar. Das dritte Kapitel umfasst die Verkehrsnachfrage und ist damit von zentraler Bedeutung für die Qualität der nachfragegetriebenen Netzdimensionierung in einem analytischen Kostenmodell. Hier werden die Informationsanforderungen an die Verkehrsdaten formuliert und ausgeführt, wie – selbst bei wenig differenzierten Informationen über die Nachfrage nach Breitbanddiensten – eine Modellparametrisierung vorgenommen werden kann. Hierbei steht die Implementierung von betreiberspezifischen Nachfragewerten im Vordergrund. In einem zweiten Schritt wird vorgestellt, wie im Rahmen eines Nachfragemodells eine unabhängige Berechnung der Verkehrsnachfrage vorgenommen werden kann.

In den nachfolgenden Kapiteln 4, 5 und 6 werden grundsätzliche Netzarchitekturen, die zur Realisierung eines Breitbandnetzes in Frage kommen, dargestellt. Der Fokus liegt zunächst auf den grundsätzlichen Modellannahmen mit ihren Zusammenhängen sowie

der Ableitung der notwendigen Eingangsdaten und Zielgrößen. Die Beschreibung erfolgt verbal. Das vierte Kapitel beschreibt die grundlegenden Fragen der Netzgestaltung und Dimensionierung und deren Konkretisierung für die Bestimmung der Netzhierarchie, Struktur und Dimensionierung der logischen Netzschicht für ein Breitbandnetz. Das fünfte Kapitel betrachtet Architekturen für die physikalische Netzschicht und deren Korrelation mit den Einrichtungen für die logische Netzschicht. Daraus werden die Dimensionierung und die Bestimmung der Netztopologie für das physikalische Netz abgeleitet. Das sechste Kapitel behandelt Fragen der Kontrollschicht, die für die Signalisierung, Ressourcenverwaltung, Authentifizierung und Tarifierung zuständig ist. Im siebten Kapitel werden die Systemzuweisung und Kostenberechnung behandelt, wobei ein generisches Modell für die Systemzuweisung entwickelt wird, welches die Anwendung konkreter Einrichtungen in die Parameter einer generischen Kostenfunktion abbildet.

Gleich zu Beginn (Abschnitt 1.3) geben wir einen Überblick über das modellierte Aggregations- und Kernnetz und beschreiben dabei auch die wesentlichen Unterschiede zu der vorhergehenden Modellversion. Dies soll dem Leser eine Orientierungshilfe zu den nachfolgenden Detailüberlegungen geben, die durch die Integration der BNG in den einzelnen Segmenten des Netzes und seinen Implementierungsformen konzeptionelle Anpassungen erfahren haben. Zudem wird diese Zusammenfassung beim Lesen der Anhänge bzgl. der dienstespezifischen ergänzenden Modellbestandteile auf schnelle Weise helfen, den Gesamtkontext herzustellen.

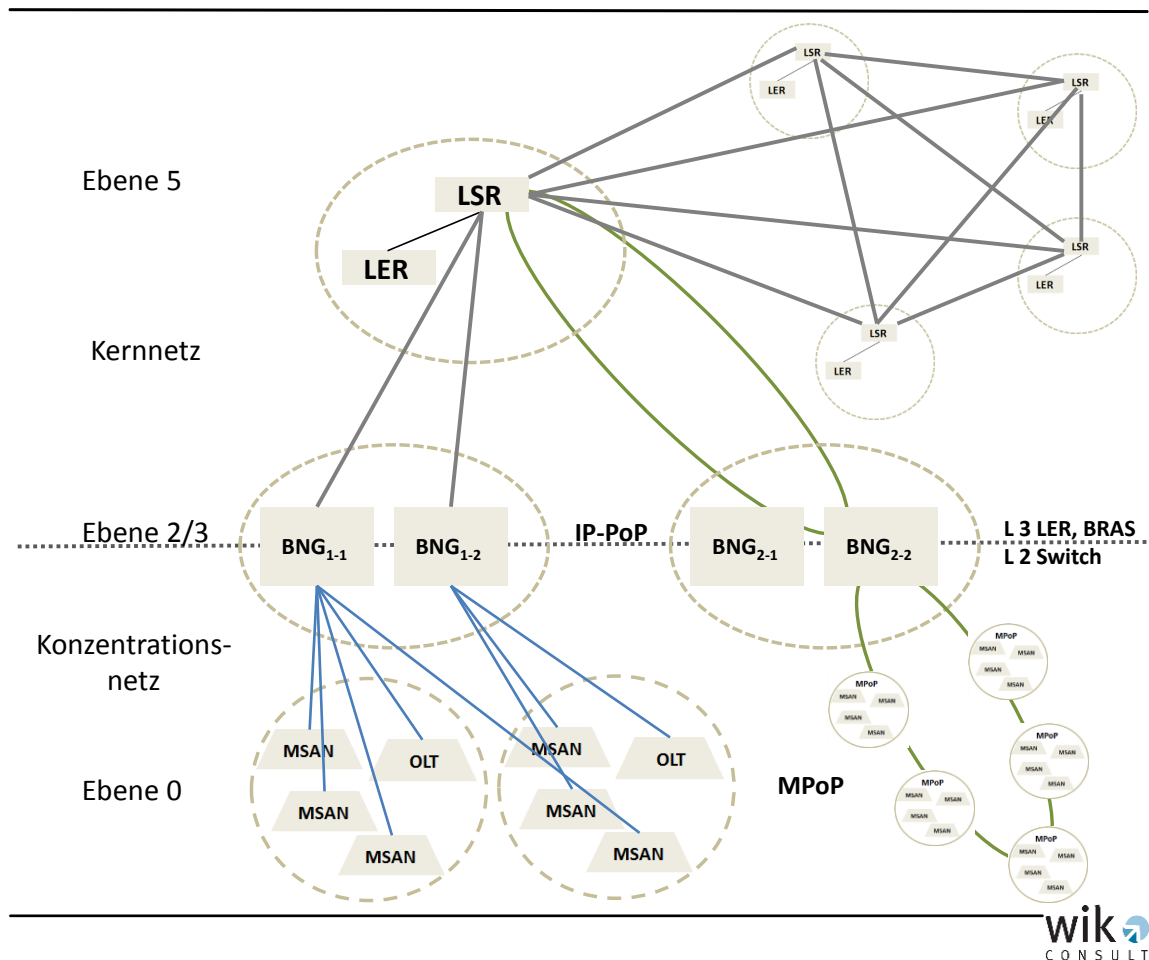
1.3 Übersicht über das NGN Konzentrations- und Kernnetz mit BNG

Mit dem BNG ist ein System auf den Markt gekommen, das es erlaubt, die Funktionen eines Ethernet-Aggregationsswitches auf der obersten Ebene eines Konzentrationsnetzes mit der Funktion eines Label Edge Routers (LER) und der Funktion eines Broadband Remote Access Servers in einem Gerät zu vereinen und schon durch den Wegfall externer Schnittstellen Synergieeffekte zu erzielen. Hiermit fallen zwangsläufig auch die Standorte der eigentlich zwei verschiedenen Netzebenen zugeordneten Funktionen der Systeme an einem Standort zusammen.

Auf der Teilnehmeranschlusseite wächst die Nachfrage nach und steigt das Angebot von breitbandigen Verbindungen. Zunehmender Glasfaserausbau verkürzt (FTTC) oder ersetzt gar (FTTH) die bandbreitenbegrenzenden Kupferdoppeladern. In den Anschlussbereichen werden signifikant steigende Bandbreiten aggregiert, die in das Kernnetz weitertransportiert werden müssen. Somit werden bisher effizient eingesetzte Technologien des Transportnetzes durch leistungsfähigere Systeme ersetzt. So migriert beispielsweise die SDH- und NG-SDH Technik an den Rand der Netze und wird nur noch zur Aggregation entsprechender Layer 1 Mietleitungen verwendet. Dies erlaubt, die Auswahl möglicher Technologien für das Transportnetz im Konzentrations- und

Kernnetz auf höherwertige/ breitbandigere Techniken zu begrenzen. Abbildung 1-1 gibt einen Überblick über das in der Modellversion 2.3 modellierte NGN Konzentrations- und Kernnetz.

Abbildung 1-1: Übersicht über ein NGN mit BNG auf Ebene 2/3



Die MSAN und OLT aggregieren die (NGA)-Anschlussleitungen. Diese sind entweder Outdoor in den KVz oder Indoor in den HVt (MPoP) angesiedelt. Auch die Mietleitungen (Layer 1 und Layer 2) laufen in den MPoP zusammen und werden dort auf ChannelBanks aggregiert. Der MPoP ist weiterhin der Ort (scorched node), an dem alle Teilnehmeranschlussverkehre zusammengeführt und alloziert werden können. Jeder Knoten im Netz hat eine solche Ebene 0 Funktion. Ausgewählte, vom Modell endogen bestimmte Netzknoten bekommen zudem höherwertige Funktionen der Ebene 2/3, und von denen wieder eine Teilmenge Ebene 5 Funktionen. Kriterien für deren Auswahl können im Modell parametrisiert werden.

Jeder OLT, MSAN bzw. die aggregierenden ChannelBanks werden über separate, Glasfaser-gleiche Übertragungstrecken an die dem Cluster zugeordneten BNG in den Ebene 2/3 Standorten angebunden. Die logischen Verbindungen hierzu sind im linken

Zweig der Abbildung 1-1 dargestellt, die physikalische Realisierung erfolgt über Glasfaserringe aus DWDM-ROADM Wellenlängen-Multiplexern (s. rechte Seite in Abbildung 1-1). Jeder MSAN etc. wird mit mindestens einer Wellenlänge angebunden. Eine Auswahl, auch NG-SDH als Transporttechnologie in den Ringen des Konzentrationsnetzes (zwischen den Ebenen 0-2) einzusetzen, gibt es in der Version 2.3 nicht mehr. Bei der hier vorgenommenen Art der Konzentration der Verkehre im BNG macht auch eine Zwischenschicht aggregierender Netzknoten auf einer Ebene 1 keinen Sinn mehr, weil dort keine Aggregation mehr stattfinden würde. Diese Option wurde daher in der Version 2.3 deaktiviert. Geblieben ist der IP-PoP auf Ebene 2/3, der nun aber mit dem integrierten BNG bestückt ist.

Der BNG routet den Layer 2 Bitstrom-Verkehr auf seiner Netzebene aus, BNG für BNG. Eine Aggregation der Verkehre für die Wholesale Nachfrager findet am Standort nicht statt. Die Nachfrager übernehmen ihren Verkehr je BNG.

Der verbleibende Verkehr wird in das Kernnetz weitergegeben, zunächst intern im BNG an dessen LER Funktion und von dort weiter an die LSR der Ebene 5. Eine zwischengeschaltete Konzentrationsfunktion auf einer Ebene 4, wie in der Vorgängerversion vorhanden, aber nicht verwendet, wurde nun in der Version 2.3 gleichfalls deaktiviert. Jeder BNG ist an zwei übergeordnete LSR desselben Ebene 5 Standortes angeschlossen (in Abbildung 1-1 nicht dargestellt, s. Abbildung 4-9). Es gibt auch die Option zur Parametrierung einer Doppelabstützung (Abbildung 4-11) auf zwei verschiedene Ebene 5 Standorte. Die physikalische Anbindung im Kernnetz ist über OTN-ROADM Ringe für die Verbindung der Ebenen 2/3-5 realisiert (rechter Zweig in Abbildung 1-1). Im Kernnetz kann vom Ring bis zu einer vermaschten oder optimiert vermaschten Struktur eines OTN-Transportnetzes gewählt werden.

Die LSR führen die Verkehrslenkung (Vermittlung) durch und routen entweder in andere Zweige des eigenen Netzes (On-Net Verkehr), oder über die an sie angeschlossenen LER auf die Content-Server Farmen etc., die IP-TV Server oder die Caches, oder der Verkehr verlässt das Netz an den LER als IP-Bitstrom, als sprachterminierender Verkehr in andere Netze, als Transitverkehr oder als Peering-Verkehr mit anderen ISP. Über die LER kommt natürlich auch der Verkehr in der anderen Richtung in das Netz hinein. Für den Sprachverkehr kann neben der Zusammenschaltung als VoIP (und SBC) auch die Zusammenschaltung klassischer Art (PSTN) über Media-Gateways und deren Controller verwendet werden. Sollen mehr als die Zusammenschaltungspunkte der oberen Kernnetzebene eingerichtet werden, so wird der Verkehr über Festverbindungen auf die entsprechenden Standorte niedrigerer Ebene heruntergeführt.

Diese kurze Zusammenfassung kann nur einen groben Überblick geben. Die Details der Beschreibung und der Dimensionierung und Parametrierung des Modells und zur Bestimmung der Transportkosten des NGN finden sich in den nachfolgenden

Abschnitten. In den Anlagen 1 für die Sprachzusammenschaltung, 2 für Bitstrom und 3 für Mietleitungen finden sich die dienstespezifischen Teile und Ergänzungen.

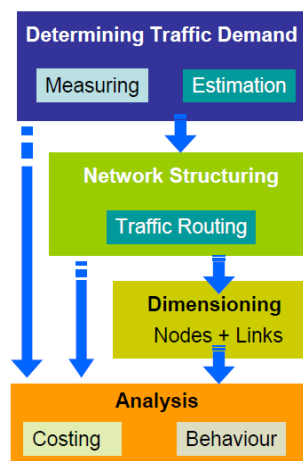
2 Methodischer Ansatz für das Kostenmodell Breitbandnetz

In diesem Kapitel werden Methoden zur Kostenmodellierung von Telekommunikationsdiensten und Netzen betrachtet und die wichtigsten Aspekte zur Kostenmodellierung eines Breitbandnetzes abgeleitet. Dazu werden im ersten Abschnitt Kostenmodelle betrachtet, in denen die Transportschicht auf dem IP Protokoll basiert. Im zweiten Abschnitt werden die Anforderungen an das Kostenmodell und zentrale Merkmale des Modellierungsansatzes zusammenfassend dargestellt. Im dritten Abschnitt werden die Struktur zukünftiger Breitbandverbindungsnetze und ihre Abgrenzung zum Teilnehmeranschlussnetz beschrieben. Daraus wird die Struktur des Breitbandnetzes als eine Komposition von Konzentrationsnetzen und eines sie verbindenden Kernnetzes abgeleitet.

2.1 Analytische Kostenmodelle für IP-basierte Netze

Modelle für die Planung von Kommunikationsnetzen im Zusammenhang mit ökonomischen Untersuchungen werden in der Literatur seit längerem betrachtet und eine entsprechende Zusammenfassung im Zusammenhang mit der Entwicklung des Internets findet sich in [NGI-04]. Diese Modelle beschreiben einen linearen Zusammenhang, beginnend von der Bestimmung der Verkehrsnachfrage über die Netzgestaltung (Netzstruktur), die Dimensionierung und die abschließende Kostenbetrachtung, siehe Abbildung 2-1.

Abbildung 2-1: Lineares Kostenmodell

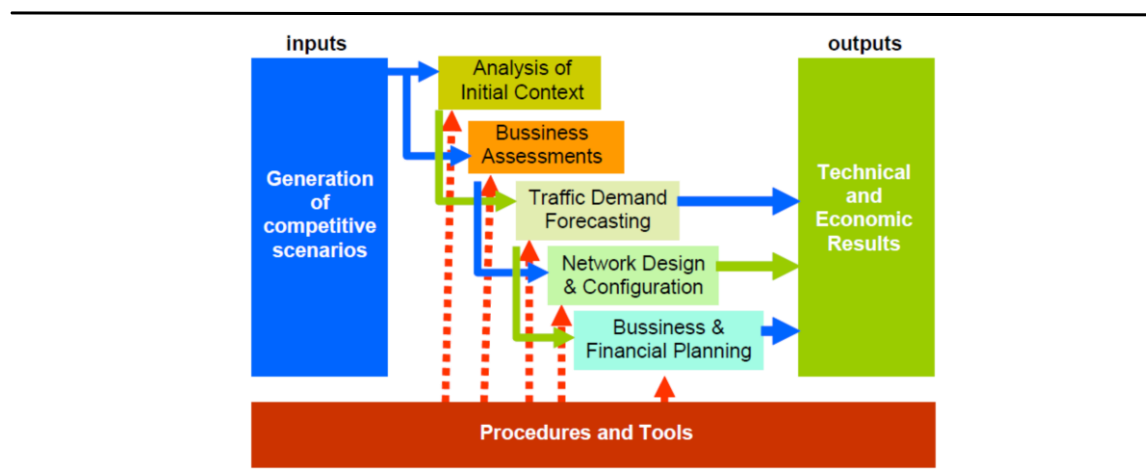


Quelle: nach [Arana-97] entnommen aus [NGI-04]

Die ITU hat im Rahmen ihrer Arbeitsgruppen ein erweitertes Modell zur Netzplanung und Kostenuntersuchungen entwickelt und vorgestellt, das ebenfalls in [NGI-04] beschrieben ist, siehe Abbildung 2-2. Darin beschreiben die Szenarien Annahmen über

die Anzahl der Nutzer, deren Verteilung in der abzudeckenden Geographie, ihre Klassifizierung nach Nutzertypen und deren Dienste, die sie in Anspruch nehmen. Verfahren und Werkzeuge bilden den algorithmischen Teil ab, der aus den Szenarien die von den Nutzern erzeugten und empfangenden Verkehre und ihre Verteilung generiert, und daraus mittels eines Netzentwurfes eine Netzkonfiguration nach Standorten und Verbindungen zwischen diesen berechnet. Die Verkehrsführung über diese Netzkonfiguration ergibt die Verkehrsbelastung und die entsprechenden Bandbreiten pro Standort und Verbindung. Dazu können dann sowohl nach technischen als auch ökonomischen Parametern die Einrichtungen zugewiesen und die entsprechenden Kosten nach CAPEX und OPEX berechnet werden.

Abbildung 2-2: ITU Planning Model



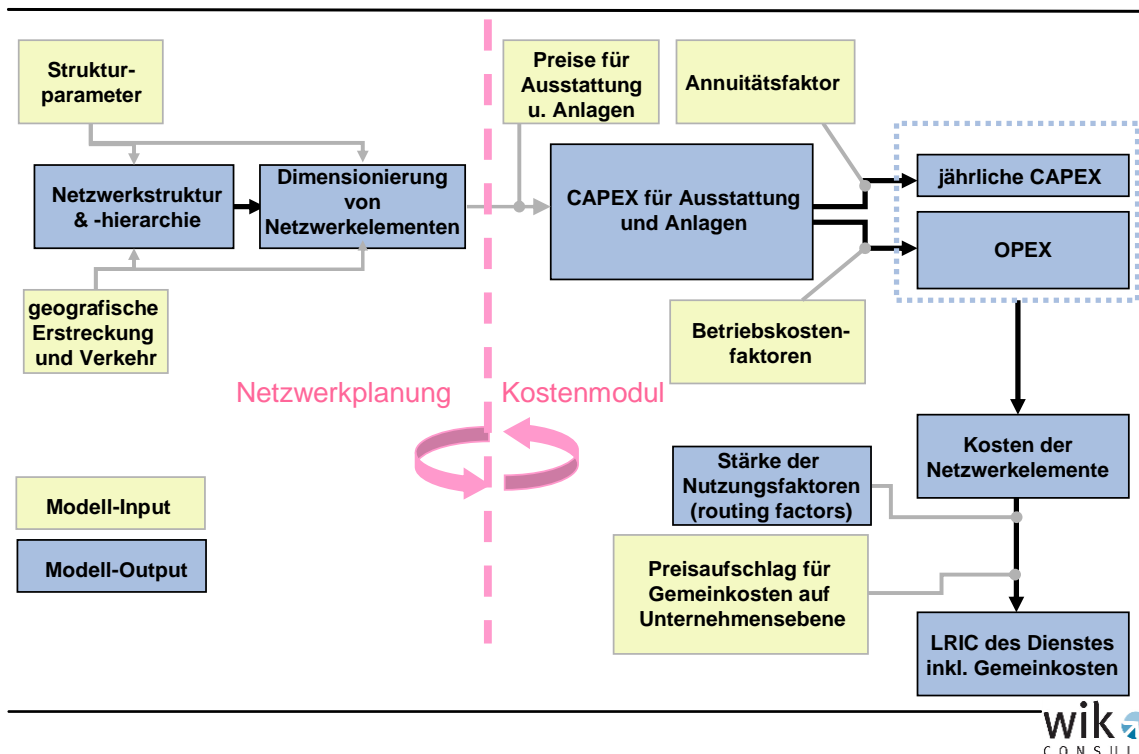
Quelle: [ITU-02] entnommen aus [NGI-04]

2.2 Konzeptioneller Rahmen des hier vorliegenden Kostenmodells

Die Methodik dieser skizzierten Modelle liegt auch dem hier zu spezifizierenden Kostenmodell für das Breitbandnetz zu Grunde. Für das nachfolgend betrachtete Kostenmodell wurde 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 2-3 illustriert auf der linken Seite das Zusammenspiel von 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).

Abbildung 2-3: Schematische Darstellung eines TELRIC-Modells zur Kostenberechnung in Telekommunikationsnetzen



Quelle: [ACCC-07]

Die Modell-Beschreibung wird so weit wie möglich unabhängig von der/den zu betrachtenden konkreten Netzarchitekturen, Nutzertypen, Dienstekategorien und deren Klassifizierung nach QoS-Gesichtspunkten gehalten. Damit soll eine generische Nutzer- und netzagnostische Spezifizierung erreicht werden. Um das Verständnis zu erleichtern, wird die abstrakte Beschreibung durch konkrete Beispiele illustriert, die aus Sicht der Autoren die derzeitige Situation beschreiben, aber nicht als unbedingte Festlegung für das Kostenmodell Breitbandnetz verstanden werden sollten. Das Kostenmodell Breitbandnetz geht von folgenden Grundlagen aus:

- Netzdimensionierung und Kosten im Modell sind 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, können aber durch Sensitivitätsanalysen optimiert werden.
- Die verschiedenen 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 abgebildet werden (sofern eine Qualitätsdifferenzierung vorgenommen werden soll).
- Für jede Verkehrsklasse können QoS-Parameter festgelegt werden. Die modelltechnische Umsetzung soll auf Basis von mark-up Faktoren auf die Mittelwerte der in Anspruch genommenen Bandbreite bestimmt werden. Diese mark-up Faktoren werden mit Hilfe verkehrstheoretischer Modelle bestimmt.
- Neben den Dienstenachfragen auf Layer 3 (IP) werden Kapazitäten bzw. Nachfragen auf den Schichten 2 und 1 bei der Netzdimensionierung und Kostenrechnung berücksichtigt (Erfassung von economies of scope and scale).
- Es wird eine generische Netzarchitektur unterstellt und deren Abbildung auf konkrete zum Einsatz kommende Architekturen wird im Rahmen von Kostenparametern vorgenommen.

Die in das Modell einfließenden Parameter lassen sich im Wesentlichen in die folgenden Blöcke einteilen, wobei die Punkte 3c) sowie 5) Parameter des Kostenmoduls darstellen.³

1. Geographische Grunddaten (MPoP Lokationen als scorched nodes)
2. Nachfrage
 - a) Verteilung der Nachfrager über die MPoP und die ihnen vorgelagerten KVz,
 - b) Verkehrsarten, Verkehrswerte je Verkehrsart und Nachfrager (-gruppe),
 - c) Verteilung der Verkehre auf Ziele (On-Net/ Off-Net)
3. Investitions- und Preisparameter für technische Systeme
 - a) Leistungsfähigkeit,
 - b) Invest je Netzelement,
 - c) ergänzende ökonomische Faktoren (Abschreibungsdauern, Preisänderungsraten, OPEX-Zuschläge, indirekte Investitionen, ...)

³ In dem ausschließlich Excel basierten Kostenmodul können diese Inputparameter verändert werden, ohne dass eine Rückkopplung mit dem C++ basierten Netzplanungsmodul erfolgen muss. Die Ergebnisse des Netzplanungsmoduls werden grundsätzlich an das Excel basierte Kostenmodul übergeben, und können dort unter Rückgriff auf die spezifischen Kostenparameter „weiterverarbeitet“ werden.

4. Netzstrukturparameter (Zahl der Netzebenen, Mindestdistanzkriterien, max. Ringgröße, IC- und Server-Standorte, Redundanz, ...)
5. Generelle ökonomische Parameter (WACC, Zuschlagsfaktor Common Cost, ...)

Sowohl die geographischen Grunddaten als auch die Verteilung der Nachfrager über die MPoP bilden die Basisbefüllung des Modells. Die Parametrisierung der Nachfrage, d.h., die Zuweisung der Verkehrsnachfrage zu den zugrunde gelegten Nachfragertypen sowie sonstiger Struktur- und Investitionsparameter erfolgt im Netzplanungsmodul, das in C++ programmiert wurde. Die Ergebnisse (Mengengerüst, dessen Bewertung und Routingfaktoren) werden in ein Excel basiertes Kostenmodul ausgegeben, das die Oberfläche für die eigentliche Kostenberechnung bildet. Parameter können entsprechend in der Excel-Oberfläche verändert und sensitiviert werden. Dies betrifft insbesondere die generellen ökonomischen Parameter als auch die Investitions- und Preisparameter von zentralen Einrichtungen der Kontrollschicht, die nicht standort-spezifisch, sondern für das gesamte Netz dimensioniert werden. Die Sensitivisierung der Netzstrukturparameter sowie der Netzelemente und deren Preise erfolgt im Netzplanungstool.

2.3 Anforderungen an das Kostenmodell und zentrale Merkmale des Modellierungsansatzes

Die Anforderungen an das Kostenmodell für das Breitbandnetz leiten sich primär aus den regulatorischen Anwendungsfällen ab. Neben der Bestimmung von Kosten für Vorleistungen (z.B. zur Bestimmung der LRIC oder Überprüfung von Preis-Kosten-sowie Kosten-Kosten-Scheren) ist auch die Bestimmung effizienter Zusammenschaltungsstrukturen eine Zielgröße für die Modellanwendung.

Das Modell soll es ermöglichen auf der einen Seite die effizienten Kosten der Bereitstellung von Vorleistungsprodukten zu bestimmen sowie auf der anderen Seite auch Strukturen bestehender Netzbetreiber nachbilden zu können. Um effiziente von weniger effizienten Szenarien unterscheiden zu können, setzt dies voraus, dass beide rechenbar sind. Eine Mischung aus modellendogener und Inputparameter gesteuerter Optimierung ist daher charakteristisch für ein solches Modell (welches auch [ineffiziente] Ist-Strukturen abbildbar machen soll).

Mit der ersten Fassung des Analytischen Kostenmodells für das Breitbandnetz waren Fragen nach effizienten Netz- und Zusammenschaltungsstrukturen zentral. Mit der Modellanpassung zur Berücksichtigung der MSAN und BNG steht die Berücksichtigung der Architektur des regulierten Netzbetreibers im Vordergrund, die der Bestimmung effizienter Kosten zugänglich gemacht werden soll. Der methodische Ansatz findet unverändert Anwendung. Nach wie vor sind Netzstrukturparameter verfügbar, die unter Effizienzgesichtspunkten gewählt werden können. Die in der Vorgängerversion 2.2 implementierten Freiheitsgrade mit Blick auf die Netzstruktur erlauben eine Abbildung

der BNG-Architektur, so dass auf dem in der Grundstruktur angelegten Modellierungsrahmen aufgesetzt werden kann. Die sich aus der BNG-Architektur ergebenden technischen Randbedingungen werden in dieser Modellversion berücksichtigt. Dies ist unter anderem eine Festlegung auf 4 Netzebenen.

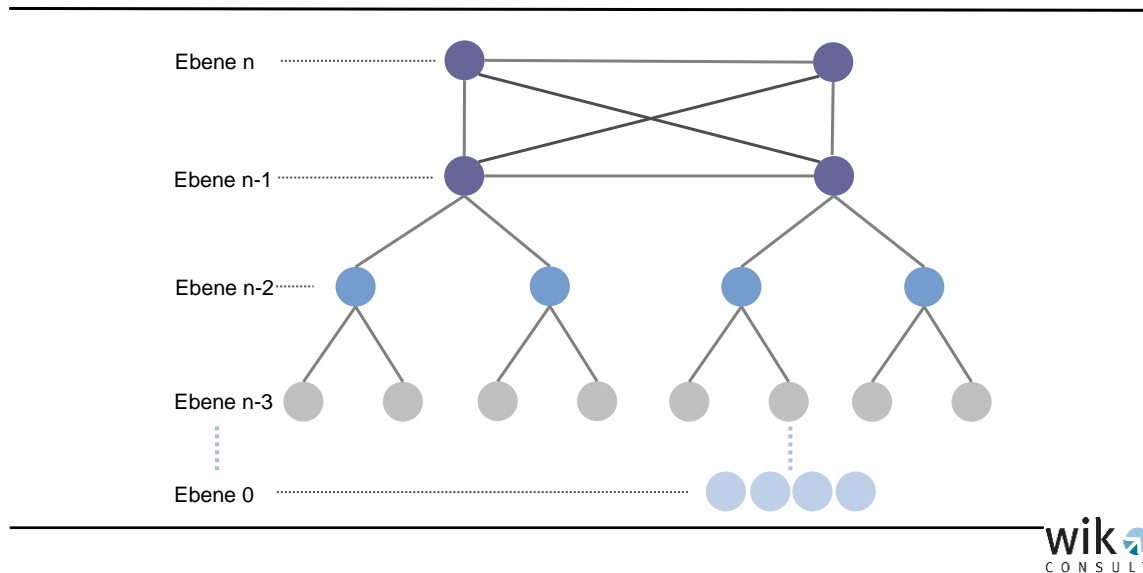
Der sich aus diesen Anforderungen ergebende Modellierungsrahmen lässt sich dabei wie folgt skizzieren:

- Festgelegte Anzahl von Netzebenen
=> **Modellimplementierung**
- Vorgaben zu den Netzknoten:
 - jeder Netzknoten enthält Funktionen der untersten Netzebene
=> **Modellimplementierung**
 - Funktionen der Netzknoten höherer Netzebenen werden **modellendogen** bestimmt (Knotenstärke und Abstandskriterien zur Auswahl der Knoten)
 - Anzahl der Gesamtzahl der Netzknoten
=> **Modellinput** (zugrunde liegende Datenbank)
 - Anzahl der Netzknoten pro Netzebene
=> **Modellinput** (Inputparameter)

Soll eine Abbildung von Ist-Strukturen über den scorched node-Ansatz hinaus vorgenommen werden, so kann eine Netzhierarchie vorgegeben werden.

Die nachfolgende Grafik (Abbildung 2-4) illustriert eine Netzstruktur in allgemeiner Form. Die Ebenen n und n-1 bilden in diesem Beispiel das Kernnetz ab. Letztlich soll an dieser Stelle dargestellt werden, dass durch den Modellanwender die Zahl der Netzknoten je Netzebene über Inputparameter steuerbar ist. Die Netzknoten der Ebene 0 (MPoP) fließen mit ihren Geo-Koordinaten in die Modellierung ein, wodurch die Anforderungen an einen Scorched-Node-Ansatz erfüllt sind.

Abbildung 2-4: Schematisierte Netzebenen; zugehörige Knotenzahl - parametergesteuert



Optimierungselemente stecken insbesondere in den implementierten Regeln der Zuweisung von Knoten zur Hierarchieebene sowie in der Ableitung der Topologie der physikalischen Schicht. Die durch den Modellanwender zu bestimmenden Parameter erlauben Vergleichsrechnungen auf komparativ statischer Basis,⁴ und damit die iterative Identifizierung effizienter Strukturen. Die Erfahrungen aus vielen vorhergehenden Modellierungen und die Einführung des BNG als integriertem Layer 2 und LER (Layer 3 Edge) Netzknotten haben es nahegelegt, in der nun vorgenommenen Modellierung in der Version 2.3 auf die hier vorgestellte Flexibilität zu verzichten und die Zahl der Netzebenen auf insgesamt 4 zu beschränken (vgl. auch Abbildung 2-5)

Die Berücksichtigung von Netzzugang und Zusammenschaltung ist im Modell methodisch sowohl im Konzentrationsnetz als auch im Kernnetz angelegt. Diese Vorgehensweise soll eine ggf. zukünftig erfolgende Definition von Zusammenschaltungsprodukten auch im Kostenmodell abbildbar machen. Im Modell ist daher die Ausführung von Verkehrsströmen vorgesehen, die (im Bedarfsfall) bei der Dimensionierung der darüber liegenden Netzelemente entsprechend nicht mehr zu betrachten sind.

⁴ Komparativ statische Analysen sind dadurch gekennzeichnet, dass lediglich ein Parameter des Modells (nicht des Netzes!) verändert wird, während die übrigen Parameter unverändert bleiben.

2.4 Modellierungsgegenstand: Konzentrationsnetz und IP-Kernnetz

2.4.1 Modellierung des logischen und physikalischen Netzes sowie der Kontrollplattform

Die hier vorgenommene sprachliche Unterscheidung in logisches und physikalisches Netz stellt auf die Unterscheidung von Einrichtungen des Netzes hinsichtlich ihrer Funktionalität entsprechend der OSI-Schichten ab. So beschreiben wir mit den Einrichtungen des logischen Netzes Konzentrations- und Switching-Einrichtungen in den OSI Schichten 2 und 3 inklusive der Schnittstellenkarten, die den Verkehr an die Einrichtungen der Schicht 1 übergeben.

Die Aufgabe der physikalischen Netzschicht ist es, die aus der logischen Schicht resultierenden Leitungsnachfragen zwischen den Standorten sowie sonstigen Nachfragen wie z.B. in Form von Mietleitungen, die direkt auf Layer 1 (ohne Inanspruchnahme von Layer 2 oder 3) realisiert werden, physikalisch umzusetzen. Entsprechend umfasst das physikalische Netz Einrichtungen sowohl auf der OSI Schicht 1 als auch auf dem Layer 0.⁵

Darüber hinaus ist die Kontrollplattform Gegenstand der Modellierung. Sie ist die Plattform zur Dienstrealisierung zum Aufbau, Monitoring und Abbau von Verbindungen sowie zur Netzverwaltung. Sie lässt sich nicht eindeutig einzelnen OSI Schichten zuweisen. Zum Teil liegt die Kontrollschicht oberhalb von Layer 3, zum Teil ist sie schichtübergreifend, d.h. quer zu Layer 1 bis 3.

2.4.2 Übersicht zu den Netzsegmenten und zugehörigen Verkehren

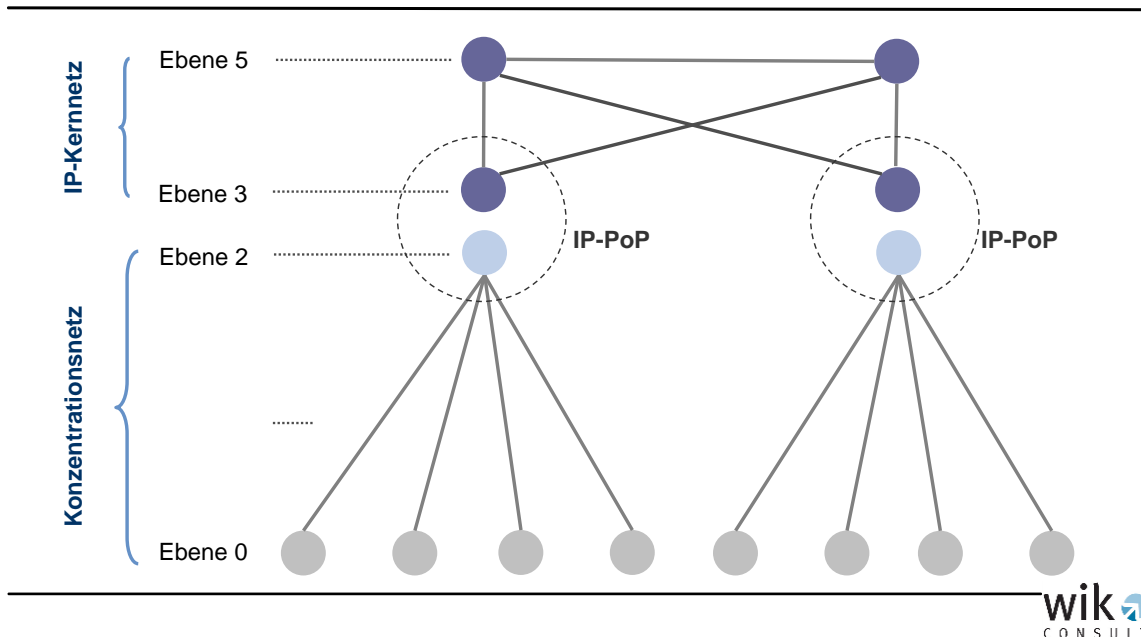
Wie bereits eingangs ausgeführt, besteht das Kostenmodell Breitbandnetz aus zwei Netzsegmenten:

- Konzentrationsnetz und
- IP-Kernnetz.

Für beide Netzsegmente wird im Rahmen dieses Dokumentes eine Spezifikation vorgenommen. Letztlich muss beachtet werden, dass die oberste Netzebene im Konzentrationsnetz mit der untersten Netzebene im Kernnetz an einem gemeinsamen Standort erfolgt – der nachfolgend als IP-PoP bezeichnet wird. In der neuen BNG-Architektur konstituiert der BNG-Standort den IP-PoP und führt in seiner Funktionalität Konzentrationsnetz und IP-Kernnetz in seiner Schnittstellenfunktion zusammen.

⁵ Das OSI-Modell beschreibt Schichten von 1 bis 7. Die darunter liegende „Schicht“ ist der Layer 0 und umfasst die passiven Elemente Gräben, Rohre und Kabel.

Abbildung 2-5: IP-PoP als gemeinsamer Standort zweier Netzebenen



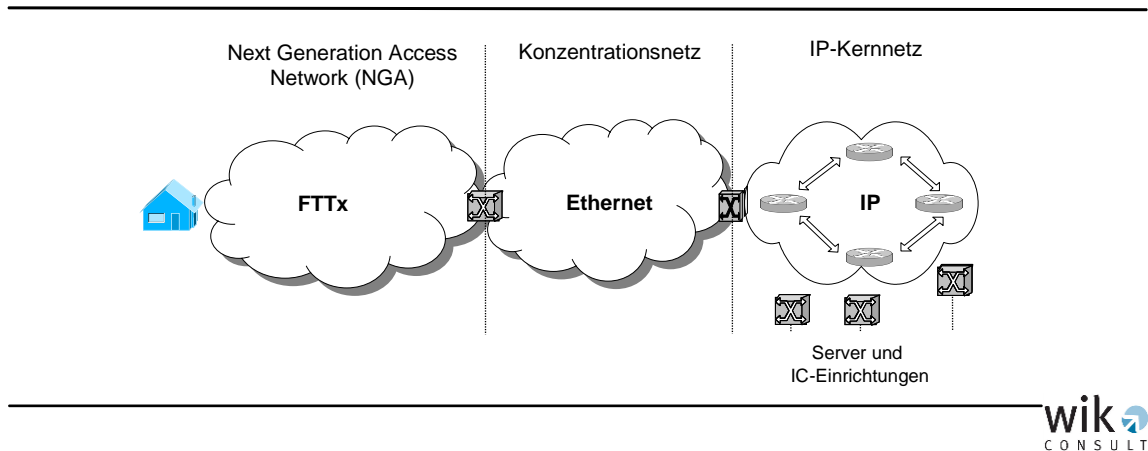
In der nachfolgenden Abbildung 2-6 sind die Netzsegmente des Breitbandnetzes schematisch dargestellt und beinhalten zur vollständigen Darstellung der Wertschöpfungskette vom Teilnehmer ausgehend das Teilnehmeranschlussnetz (hier: Next Generation Access Network, NGA).⁶ In Anlehnung an die traditionelle Trennung von Verbindungsnetz und Teilnehmeranschlussnetz im PSTN ist für das zukünftige Breitbandnetz zwischen dem NGA und dem Konzentrationsnetz eine Trennung vollzogen worden. Konzentrationsnetz und IP-Kernnetz bilden das Pendant zum Verbindungsnetz der schmalbandigen Welt – mit dem Unterschied, dass zukünftig im Kernnetz auf Basis des Internet Protokolls (IP) eine Realisierung sämtlicher Dienste erfolgen soll.⁷ Da die Dienste letztlich über das IP-Kernnetz realisiert werden, hat das mittlere Netzsegment – seiner Namensgebung entsprechend – die Hauptaufgabe, den von den Endkunden initiierten Verkehr vorzukonzentrieren und dem eigentlichen Dienstnetz (IP-Kernnetz) zuzuführen.⁸ Beide Netzsegmente sind Gegenstand des hier zu spezifizierenden Kostenmodells für das Breitbandnetz.

⁶ Es sei darauf hingewiesen, dass das Mobilfunknetz außerhalb der Betrachtung bleibt. Eine Integration des Verkehrs aus Mobilfunknetzen in das NGN im Sinne einer Fix-Mobile-Integration bedarf einer Erweiterung des hier vorgelegten Modellierungsansatzes. Eine Berücksichtigung der Mobilfunkverkehre erfolgt im Breitbandkostenmodell insoweit, als dass sich aus dem Mobilfunkverkehr auch eine Nachfrage für das Festnetz in Form von Terminierungsverkehr für Sprachminuten, oder Transit- / Peering-Verkehr aus dem Mobilfunknetz zu berücksichtigen ist. Gleiches gilt für die Mietleitungsnachfrage von Mobilfunknetzbetreibern. Bei der Parametrisierung des Modells sind daher auch diese, sich aus den Mobilfunknetzen ableitenden Nachfragen zu berücksichtigen.

⁷ Aus diesem Grund ist das letzte Netzsegment auch nicht nur mit Kernnetz, sondern auch dem Zusatz „IP“ gekennzeichnet.

⁸ Die Berücksichtigung rein Ethernet basierter VLAN-Verkehre wird in Abschnitt 4.2.1 aufgegriffen.

Abbildung 2-6: Netzsegmente im Breitbandnetz



Da das Kostenmodell u.a. eine Bestimmung der Kosten effizienter Leistungsbereitstellung ermöglichen soll, sind alle relevanten Größen- und Verbundvorteile bei der Kostenmodellierung zu berücksichtigen. – Dies bedeutet, dass die Verkehre sämtlicher Dienste, die die hier zu betrachtenden Einrichtungen des logischen und physikalischen Netzes in Anspruch nehmen, bei der Netzdimensionierung zu berücksichtigen sind (TELRIC-Ansatz).⁹

- Vor dem Hintergrund des Anspruchs der Dienstintegration auf einem Netz (dem IP-Netz) scheint dies durch die Berücksichtigung der gesamten IP-basierten Dienste hinreichend abbildbar zu sein.
- Mit Blick auf das Konzentrationsnetz ist demgegenüber ergänzend (d.h. zusätzlich zum IP-Verkehr, der dem Kernnetz zugeführt wird) zu berücksichtigen, ob ggf. lokale bzw. regionale Verkehre innerhalb der jeweiligen Konzentrationsnetzcluster realisiert werden (bei denen es sich entsprechend um reine Layer-2 Verkehre handelt) und diese Verkehre dann entsprechend ihrer Nachfrage bei der Netzdimensionierung berücksichtigt werden müssen. Mit Blick auf die z.Zt. relevante Technologie Carrier Ethernet sind dies vor allem VLAN-Verkehre (Virtual Local Area Network). Mit der BNG-Architektur ist die Art der Verkehrslenkung gegenüber der Modellversion 2.2 verändert, da auf eine vollständige Aggregation des clusterbezogenen Verkehrs verzichtet wird. Der L2 Verkehr des Konzentrationsnetzes wird zum ersten Aggregationsknoten (BNG) am Rande des Kernnetzes geführt und von dort verteilt. Eine Ausnahme bilden Standort-interne Layer 2 Mietleitungen, deren Verkehr den Standort nicht verlässt.

⁹ Der Total Element Long Run Incremental Cost (TELRIC) Ansatz stellt darauf ab, dass sämtliche Dienste, die ein Netzelement beanspruchen, bei der Netzdimensionierung und Kostenzurechnung Berücksichtigung finden.

- Für die Dimensionierung des physikalischen Netzes sind neben den abgeleiteten Nachfragen aus den Schichten 2 und 3 auch die sonstigen Nachfragen auf Schicht 1 zu berücksichtigen. Dies sind Kapazitäten, wie sie beispielsweise in Form von Mietleitungen vermarktet werden, oder auch für andere Vorleistungen zum Einsatz kommen (sowohl für Dritte als auch für sich selbst).¹⁰

Die Abgrenzung der Netzsegmente Kernnetz und Konzentrationsnetz erfolgt auf Basis der Technologie, die in den jeweiligen Netzsegmenten zum Einsatz kommt (Layer 2 Übertragung im Konzentrationsnetz und Layer 3 Übertragung im IP-Kernnetz).

Zentraler Bestandteil des Modells ist eine bottom-up Bestimmung und modellendogene Optimierung sowohl des logischen als auch des physikalischen Layers.

2.4.3 Abgrenzung gegenüber dem 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 2-6 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 Draft Recommendation der EU dargestellt ist,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 2-7 ist das Ende der dedizierten Leitung durch einen Punkt

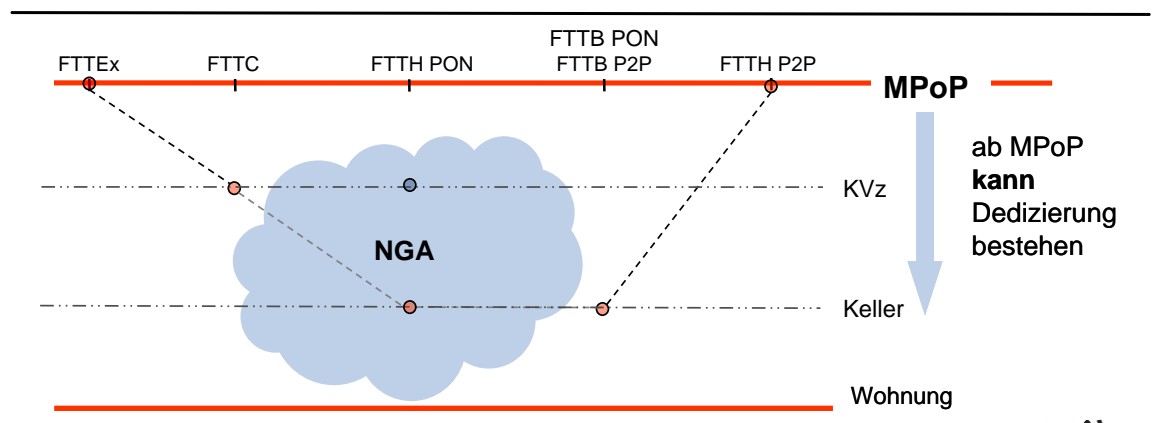
¹⁰ Bereits an dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Freiheitsgrade der Realisierung von Mietleitungen auf Layer 1 technologieabhängig sind und ggf. die Integration der Mietleitungsnachfrage in IP erforderlich sein kann.

¹¹ [EU Kommission 10] p. 6.

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 2-7 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 entfernteren 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 2-7: Heterogenität der Länge der dedizierten Anschlussleitung im NGA



Die einzelnen FTTx Bezeichnungen sind dabei wie folgt zu verstehen:

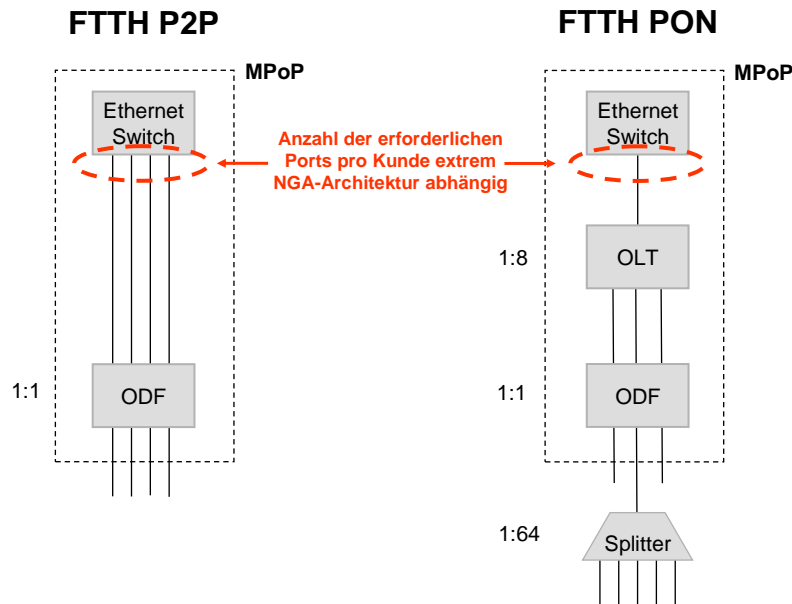
FTTEx	Fibre to the Exchange (CuDA bis zum HVt bzw. MPoP)
FTTC	Fibre to the Cabinet (VDSL-Realisierung am bisherigen KVz-Standort)
FTTB	Fibre to the Building
FTTH	Fibre to the Home
PON	Passive Optical Network
P2P	Point to Point

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

¹² [Jay, Plückebaum, 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.

Vorkonzentration vorgenommen, so dass sich die Zahl der erforderlichen Ports und damit auch der standortbezogene Konzentrationsbedarf am MPoP reduzieren. Dies ist in Abbildung 2-8 vereinfacht dargestellt.

Abbildung 2-8: NGA-Architekturen und ihre Realisierung im MPoP



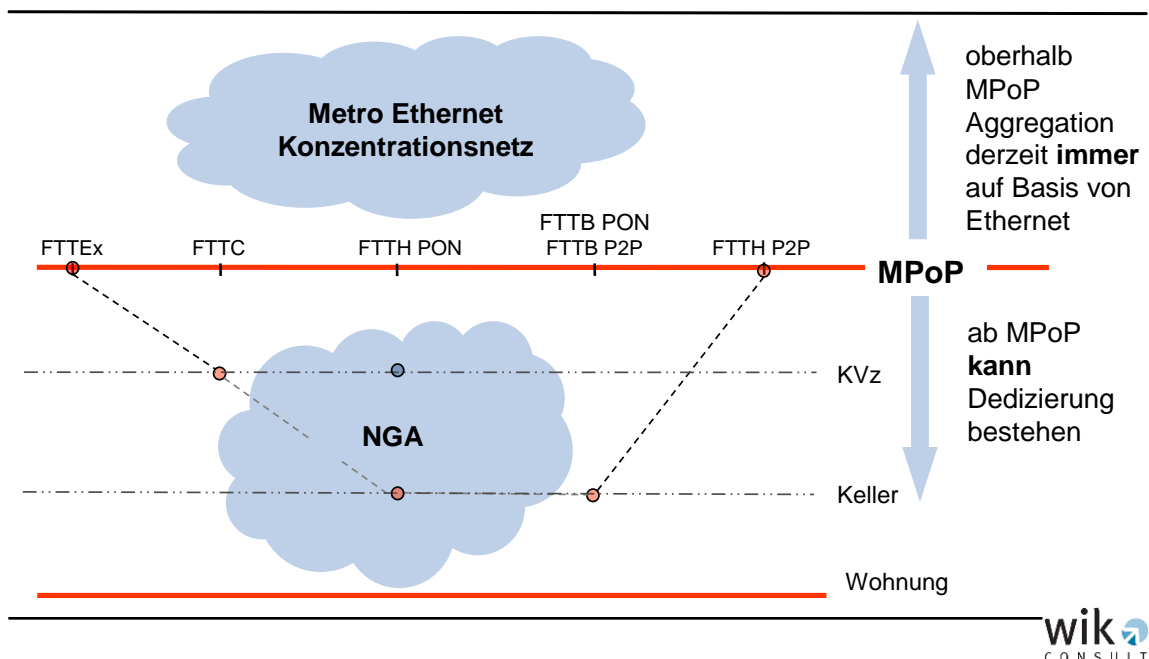
Der MPoP wird für die Modellierung des Konzentrationsnetzes als Standort der untersten Netzebene (Ebene 0) herangezogen. Mit dieser Vorgehensweise kann erreicht werden, dass – trotz einer Heterogenität der Lage der Demarkationspunkte – eine einheitliche Parametrisierung der Netzstruktur umsetzbar ist.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

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.

- Die Modellierung eines NGA 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.

Abbildung 2-9: MPoP als Standort der untersten Netzebene im Konzentrationsnetz



Ergänzend soll an dieser Stelle betont werden, dass die hier vorgenommene 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 regulatorisch-politische Frage nicht beantworten. – Wie oben ausgeführt, konzentrieren verschiedene NGA-Architekturen bereits unterhalb des MPoP. 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. Die linientechnische Realisierung des NGA bis zum MPoP wird bei diesem konzeptionellen Ansatz somit weiterhin dem Anschlussnetz zugerechnet. Eine Berücksichtigung und explizite Modellierung des teilnehmeranschließenden Equipments ist dabei immer dann erforderlich, wenn auf eine Konzentration der Verkehrsnachfrage auf Layer 2 am MPoP verzichtet wird. Aufgrund dessen findet in der Modellversion 2.3

des Referenzdokuments die Modellierung der MSAN (Multi Service Access Node) trotz ihrer Zuordnung zum NGA explizit Berücksichtigung, um die Kostentreiber für das Konzentrationsnetz quantifizieren zu können. Dabei ist die Nachfrage in den Anschlussbereichen sowie deren Zuordnung auf eine ebenfalls vorzugebende Anzahl von MSAN-Standorten Modellinput.

3 Nachfragemodellierung

Wie bereits einführend dargestellt, soll das Modell sowohl auf tatsächliche Nachfragedaten als auch auf unabhängige Nachfrageschätzungen anwendbar sein. Letztlich ist es ein zentrales Merkmal eines bottom-up Kostenmodells, Veränderungen der Nachfrage mit Blick auf die Kostenimplikationen zu untersuchen. Diesem Anspruch soll auch das hier zu spezifizierende Kostenmodell für das Breitbandnetz genügen. 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.

An dieser Stelle sei auch betont, dass gerade vor dem Hintergrund des technologischen Wandels und der zukünftig zu realisierenden Dienste eine **unabhängige Modellierung der Nachfrage** von zentraler Bedeutung ist. Nicht zuletzt auch, um unterschiedliche Szenarien miteinander vergleichbar zu machen.

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.

3.1 Nachfrage und QoS-Differenzierung

Ein zentraler Aspekt der hier vorzunehmenden Spezifikation eines Kostenmodells für das Breitbandnetz ist die Berücksichtigung von Quality of Service (QoS). Dies bedarf einer besonderen Erläuterung, da ein IP-Netz – aufgrund der Eigenschaften des TCP/IP¹⁴ – ein reines best effort Netz darstellt. 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.

Mit der Integration von Diensten auf IP-Netzen wurden die Beschränkungen des Netzes hinsichtlich der Realisierung von QoS deutlich. Dienstespezifische Anforderungen an

¹⁴ 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.

QoS-Parameter wie Latenz, Jitter oder Paketverlust können in einem best effort Netz zunächst nicht gewährleistet werden. – Da es dennoch als wirtschaftlich sinnvoll und technisch machbar angesehen wird, Dienste auf dem IP-Netz zu integrieren, wurden – neben der reinen Überdimensionierung des Netzes – Strategien zur Realisierung von QoS entwickelt, die über die 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 netzübergreifende (Betreiber übergreifende) Spezifizierung von Parametern und Protokollen nicht erfolgt ist.¹⁵ 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 scheinbar relevanter. IMS- und Softswitch-Architekturen beinhalten eine QoS-Realisierung beispielsweise für Sprachdienste.

Um den Anforderungen einer Kostenmodellierung nach Maßgabe von differenzierten Qualitätsklassen Rechnung tragen zu können, soll das Modell so formuliert werden, dass verschiedene Verkehrsklassen berücksichtigt werden können, die jeweils Dienste mit relativ homogenen Qualitätsanforderungen zusammenfassen. Verkehrsklassen werden anhand von festzulegenden Werten für Latenz, Jitter und Paketverlust definiert. Im Modell findet die Latenz explizite Berücksichtigung und ist für jeden Dienst bzw. jede Dienstegruppe über Inputparameter vorzugeben. 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).¹⁶

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

¹⁵ Dies sagt nichts über die Machbarkeit aus.

¹⁶ 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.

Da im Zuge der Konsultation zukünftig eine stärkere Differenzierung von Verkehrsklassen erwartet wurde, ist die maximale Anzahl von 6 auf 8 Verkehrsklassen erhöht worden.

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.

In Anhang 3 dieses Dokumentes wird ausführlich auf die Implikationen einer QoS-Differenzierung für die Netzdimensionierung eingegangen. Unter Rückgriff auf Modelle der Warteschlangentheorie wird gezeigt, dass Zuschlagfaktoren (mark-up Faktoren) auf die mittlere Bandbreite belastbar für die Dimensionierung herangezogen werden können.

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. Diese Zusammenhänge sind bereits aus dem Analytischen Kostenmodell für das nationale Verbindungsnetz [WIK-02] bekannt. 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.

Zentrale Größen der Netzdimensionierung des Breitbandnetzes sind

- Busy Hour-Verkehr, 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)¹⁷
- Verkehrsziele
- QoS-Anforderungen

Die Verkehrswerte leiten sich aus dem vom Nutzer induzierten Verkehr ab und werden hier allgemein mit dem Begriff der Verkehrsnachfrage oder des nutzerinduzierten Verkehrs beschrieben. Der noch im Schmalbandnetz verwendete Begriff des Quellverkehrs wird hier fallen gelassen, da in paketbasierten Netzen die Symmetrie der

¹⁷ [max s(t) mit $t \in [0, 24]$ in kbps]

An dieser Stelle sei betont, dass eine Netzdimensionierung nach Maßgabe der Spitzenlast in der Busy Hour (BH) zu erfolgen hat (und nicht nach Maßgabe des in der Busy Hour insgesamt durchgesetzten Datenvolumens). Bei der Busy Hour handelt sich um die globale Spitzenlast aus allen Diensten, allerdings wird bei Netzelementen, die nur vom Sprachverkehr in Anspruch genommen werden, die individuelle Busy Hour des Sprachdienstes verwendet. Der Unterschied wird durch einen Multiplikationsfaktor beschrieben. Die Werte für die Busy Hour des Sprachverkehrs dienen zudem zur Dimensionierung der Netzelemente für das Sprachnetz (z.B. Softswitch).

in Anspruch genommenen Übertragungskapazität verloren geht und daher der den Verkehr induzierende Nutzer nur für den upstream als technische „Quelle“ bezeichnet werden kann. 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 aggregiert.

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 der Anschlusstechnologie zu beschreiben¹⁸ – ist aus dem Analytischen Kostenmodell für das nationale 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 Kostenmodell Breitbandnetz wurde ein vergleichbarer Ansatz vorgesehen, der es erlaubt bis zu 36 verschiedene Anschlusstypen, denen spezifische Verkehrsnachfragen zugeordnet werden können, zu differenzieren. Auf diese Weise kann – sofern die berücksichtigten Anschlusstypen in der Fläche hinreichend unterschiedlich stark vertreten sind (Häufigkeit der Anschlusstypen je MPoP-Standort) – ein entsprechendes regional differenziertes Abbild der Nachfrage generiert werden. Die modelltechnische Umsetzung erfolgt in Form einer 6x6 MPoP Matrix für die busy hour Verkehrsnachfrage, die mit den standortgenauen Anschlusszahlen aus der MPoP-Liste verknüpft wird.¹⁹

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

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

Damit eine bottom up Bestimmung der Verkehrsnachfrage vorgenommen werden kann, sind im Modell die Verkehrseigenschaften der Dienste bzw. der Dienstekategorien zu parametrisieren. Letztlich greifen die Busy Hour Erlang Werte der im Modell berücksichtigten Anschlusstypen auf die durchschnittliche Bandbreite der jeweiligen Dienstekategorie, sowohl im upstream als auch im downstream, zurück.²⁰ Solange eine QoS-Differenzierung von Diensten im Modell vernachlässigt wird, sind die mittleren

¹⁸ 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“.

¹⁹ Siehe hierzu auch die tabellarische Darstellung der MPoP Matrix in Anhang 5.3.

²⁰ 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.

Bandbreiten hinreichend für die vorzunehmende Netzdimensionierung, siehe dazu auch Abschnitt 4.3.

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 dienstespezifisch 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.

Verkehrsziele²¹

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, die für das Kostenmodell die notwendigen Informationen zur Dimensionierung von Netzknoten und –kanten generieren kann.²²

Das von den Nutzern induzierte Verkehrsvolumen, projiziert auf die jeweiligen MPoP-Standorte, bildet die Ausgangsbasis für die Verkehrsverteilung. Im Rahmen des Analytischen Kostenmodells für das nationale Verbindungsnetz wurde ebenfalls eine Verkehrsverteilungsfunktion spezifiziert. Da es sich bei dem schmalbandigen Telefondienst um eine Ende-zu-Ende-Nachfrage zwischen den an das Netz angeschlossenen Endkunden handelt (sog. Client-Client Verkehrsrelation), bildet die Menge aller Verkehrsquellen (in diesem Modell durch die MPoP-Standorte abgebildet) gleichzeitig die Menge aller Ziele. Es galt daher für die Aufteilung des Verkehrs eine Gewichtung unter den Verkehrszielen vorzunehmen. Steuerungsparameter waren dabei der „Interne Verkehr“ (Quelle und Ziel sind identisch, d.h. die Teilnehmer sind an denselben MPoP bzw. HVt angeschlossen), das Verkehrsgewicht der Knoten sowie die Entfernung. 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. Auf dieser Basis wurde für das PSTN/ISDN eine vollständige Verkehrsmatrix generiert.

²¹ Siehe hierzu auch den Anhang 5.

²² Eine Sonderrolle nimmt hier der Dienst IPTV 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 IPTV und seine Berücksichtigung im Modell gesondert eingegangen.

Die Grundstruktur dieser Vorgehensweise wurde auf das Breitbandnetz übertragen. Die Anwendung einer Quelle-Ziel Matrix wurde für sämtliche Dienstekategorien im Kernnetz implementiert. Bei den Ende-zu-Ende Verbindungen wird als Verteilungsschlüssel das Knotengewicht herangezogen. 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.²³

Mit dem Verzicht auf eine clusterbezogene Verkehrslenkung am Rande des Kernnetzes – wie mit der MSAN-BNG-Architektur verbunden – wird regionaler Verkehr zu größeren Teilen auf die obere Kernnetzebene geführt. Im Modell wird diese zusätzliche Inanspruchnahme von Übertragungswegen durch zusätzliche Parameter berücksichtigt.

Wie bereits angedeutet, ist zu beachten, dass die Verkehrsbeziehungen nicht nur zwischen Teilnehmern realisiert werden (Ende-zu-Ende oder Client-Client Beziehungen), sondern zu einem Großteil durch sogenannte Client-Server Verkehrsrelationen charakterisiert werden. Wir unterscheiden²⁴ daher zwischen den dienstespezifischen Verkehrsrelationen

- Ende-zu-Ende und
- Client-Server

Für die Modellierung der Verkehrsnachfrage sind daher die Standorte der Server sowie ihre Anzahl von Bedeutung. Wie später in Abschnitt 4.2.2.1 ausgeführt, werden diese dienstespezifischen Serverstandorte über Eingabeparameter in das Modell eingepflegt (siehe Anhang 7.4.2). 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 QoS-Anforderung und hinsichtlich gleicher Zielstandortmenge zusammenzufassen,²⁵ und dann für diese Dienstekategorien jeweils spezifische Verkehrsverteilungsfunktionen zu parametrisieren, so dass eine Verkehrsmatrix abgeleitet werden kann. Die Darstellung der Inputparameter zu den Verkehrszielen findet sich in Anhang 2 bei den Routing Characteristics). 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.

²³ Es ist selbstredend, dass eine Intra-Cluster Verkehrsverteilung im Konzentrationsnetz nicht auf client-server Relationen Anwendung finden kann.

²⁴ Neben reinen Punkt-zu-Punkt-Relationen sind im Breitbandnetz auch Punkt-zu-Multipunkt-Relationen von Bedeutung.

²⁵ 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.

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 – wie bereits erwähnt – 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.²⁶ In Abschnitt 3.4 wird die Berücksichtigung von IPTV 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. Diese Zusammenhänge werden an späterer Stelle in diesem Dokument (Abschnitt 4.3) thematisiert und in Anhang 3 methodisch begründet.

Die nachfolgend dargestellte Verkehrsmatrix fasst die Informationsanforderungen an die Bestimmung der Verkehrsnachfrage zusammen. Idealtypisch werden diese Informationen (Busy Hour Verkehrswerte) vom zu betrachtenden Netzbetreiber bereitgestellt. Liegen diese Informationen nicht 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 3-5 in Abschnitt 3.3.2.

²⁶ 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 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

Neben den allgemeinen Dienstekategorien findet die Zusammenschaltung von Sprachverkehr (als Vorleistungsprodukt) 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 beispielsweise für den Sprachzusammenschaltungsverkehr die verschiedenen Tarifstufen local, single und double) ein eigenes Vorleistungsprodukt im Breitbandkostenmodell. Zum einen sind für den Interconnection-Verkehr (IC-Verkehr sowohl für Sprach- als auch IP-Zusammenschaltung) 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, sind entsprechende Routing-Regeln für die verschiedenen Tarifstufen zu implementieren.

Zusätzlich erfordert die Modellanwendung die Festlegung der zugehörigen Anteile (Verkehrsvolumina) der Tarifstufen. Die Modellierung sowohl des eingehenden als auch des ausgehenden IC-Verkehr soll anteilig am gesamten Sprachverkehr erfolgen. Siehe hierzu auch den Abschnitt 4.2.3.

3.3 Bottom-up Bestimmung der Verkehrsnachfrage

Eingangs wurde bereits ausgeführt, dass die Modellanwendung 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 werden kann. Vielmehr soll es möglich sein, von allgemeinen Nachfragedaten auszugehen, die dann einer entsprechenden Transformation bedürfen, um die für die Modellierung notwendigen Verkehrswerte generieren zu können.

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 der Illustration und sollen insbesondere 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 Anschlusstypen – auf die definierten Dienstekategorien angewendet.

Die Ableitung eines standortspezifischen Mengengerüsts erfordert

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

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

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.

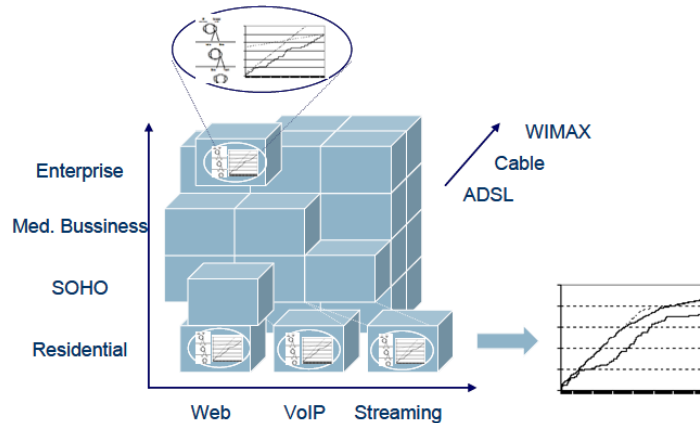
D.h., die Verkehrsnachfrage der Nutzer bzw. Anschlusstypen wird durch ein Mengengerüst aus Diensten, Anschlusstechnologien und Nutzertypen abgeleitet. Damit wird ein Szenario über die von den Nutzern generierte Verkehrsnachfrage durch ein Werte-Triple aus drei Attributen gebildet:

- 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 Model²⁷ 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.

²⁷ 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. Die Ausführungen zu einer Anschlusstyp-Festlegung auf Basis von Nutzertypen und Anschlusstechnologien findet sich im Anhang 5. Nachfolgend werden die Kategorien Nutzertyp und Anschlusstechnologie zu der Variablen Anschlusstyp zusammengefasst.

3.3.1 Dienstmodell

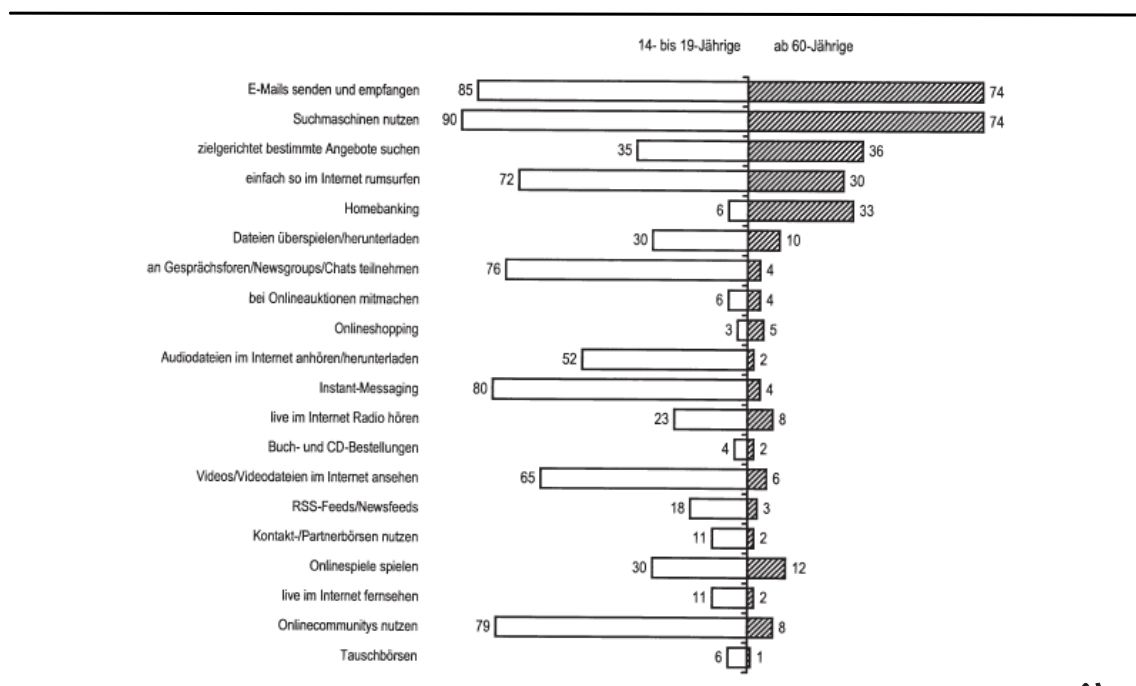
Dieser Abschnitt gliedert sich in 3 Unterabschnitte. Im Ersten werden die bestehenden und zukünftigen Kommunikations- und Multimediadienste klassifiziert und verbal beschrieben. Im Zweiten werden die modellierungsrelevanten Eigenschaften der Dienste zusammengefasst. Abschließend wird ein vereinfachtes Dienstmodell beschrieben, das die verkehrsspezifischen Eigenschaften der Dienste/Dienste-kategorien illustriert. Eine explizite Betrachtung des Dienstes VoIP erfolgt wegen seiner Bedeutung für das Kostenmodell ausführlich sowohl quantitativ als auch qualitativ auf der Basis der bestehenden Standards im Anhang 4.

3.3.1.1 Verbale Beschreibung aktueller Dienste

Das NGN stellt eine Transport-, Kontroll- und Dienstzugang-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 durch 2 Altersklassen.²⁸

Abbildung 3-3: Online-Nutzung in Deutschland



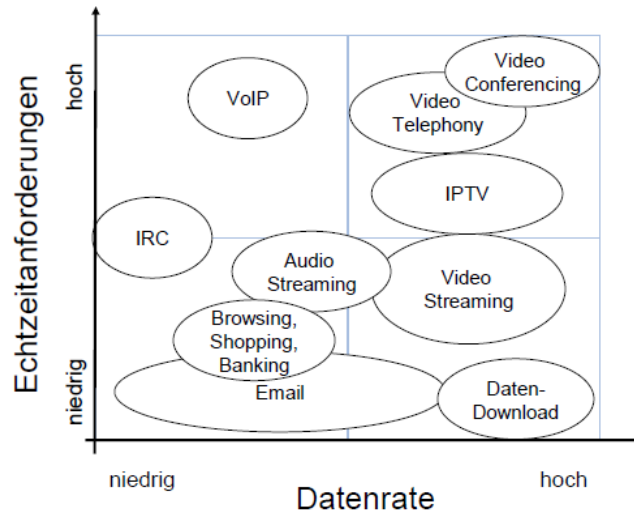
Quelle: [Eimeren-09]

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 auch Bandbreitenanforderungen haben. Dagegen rangiert VoIP in seinen Bandbreitenanforderungen eher an hinterer Stelle.²⁹

²⁸ Auch wenn mit der mittleren Altersklasse der größte Teil der Online-Nutzer ausgeblendet bleibt, illustriert die Abbildung die Vielzahl von Online-Diensten.

²⁹ Um das Verkehrsaufkommen eines Dienstes am Gesamtverkehr zu beurteilen, ist letztlich auch die Häufigkeit der Nachfrage von Bedeutung.

Abbildung 3-4: Korrelation zwischen Bandbreitanforderung 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.

3.3.1.2 Modellierungsrelevante Eigenschaften der Dienste

Für die Modellierung sind die in der nachfolgenden Tabelle 3-1 dargestellten Attribute für jede Dienstekategorie zu parametrisieren, siehe hierzu auch den Anhang 1, wo die dienstespezifischen Parameter aufgelistet sind.

Tabelle 3-1: Numerische Beschreibung von Diensten

Attribut-Name	Werte
Mittlere Bandbreite up	[kbitps]
Mittlere Bandbreite down	[kbitps]
Mittlere Paketlänge up	[kbitps]
Mittlere Paketlänge down	[kbitps]
Qualitätsklasse	z.B. 1 – 8
mittlere Verzögerungszeit	[ms]

Für jeden Dienst sind neben den Bandbreitanforderungen oder Angaben, aus denen die Bandbreite berechnet werden kann, die jeweiligen Qualitätsanforderungen zu

klassifizieren. Im Kostenmodell ist dazu eine maximale Anzahl von Verkehrsklassen (acht) definiert.

Eine Anwendung dieser Grundsätze zur detaillierten Beschreibung von Diensten wird am Beispiel von VoIP im Anhang 4 dargestellt.

3.3.1.3 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 3-1 zuzuweisen. Im Modell sind bis zu 12 Dienstekategorien vorgesehen. In Tabelle 3-2 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 Verkehrsursprung oder Ziel, und dass dieser Wert die mittlere Bandbreite auf IP-Ebene darstellt.

Die in Tabelle 3-2 angegebenen Bandbreitenwerte sind letztlich beispielhafte Eingabeparameter zur Abbildung von Verkehrsszenarien pro Dienstekategorie. 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.³⁰ Den Werten liegen u.a. folgende Annahmen zu Grunde:

- In den einzelnen Dienstekategorien sind Premium-Business-Dienste VPN (ursprünglich basierend auf FR oder ATM) einschließlich digitaler Mietleitungen auf virtueller Basis (Pseudowire) enthalten.

³⁰ 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].

- Für Sprachdienste wurden Werte nach G.711 verwendet, da dieser genau die Sprachdienste aus dem PSTN/ISDN abbildet.³¹
- 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- (2 Mbps) als auch High-Definition-TV (8 Mbps) angesetzt. Nachfolgend wird ein Mix von 4:1 betrachtet, woraus sich ein durchschnittlicher BW-Wert von 3,2 Mbps ergibt.

Tabelle 3-2: Dienstekategorien im vereinfachtem Dienstmodell und ihre zugehörigen Attributwerte

Name	BW Down [kbps]	BW up [kbps]	Ursprung	Ziel(e)	Verkehrsklasse
Premium Business Dienste	512,5	512,5	user	user	
Sprachdienste	95,2	95,2	user	user	
Konferenzdienste	1260,6	420,2	user	Konferenzserver	
VoD Dienste	2880,2	25	user	VoDServer	
IPTV (STV) pro Kanal	2000	0	IPTVServer	user	
IPTV (HDTV) pro Kanal	8000	0	IPTVServer	user	
Business Data Dienste	442,4	320	user	user	
P2P	336,3	336,3	user	user	
Sonstige best effort Dienste	128	64	user	Internet Server	

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 für up- und downstream repräsentieren die am Netzeingang (Konzentrationsnetz) entstehende Bandbreitenanforderung und beinhalten daher die erforderlichen Overheads der zur Anwendung kommenden Übertragungstechnologien. Diese sind letztlich auch in den von Netzbetreibern erfassten Daten zur Erfassung der Kapazitätsnachfrage enthalten.

³¹ 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.

3.3.2 Berechnung der Verkehrsnachfrage

Bei der Anwendung des Casual-Modells zur Bestimmung der Verkehrsnachfrage ist eine Standortmenge festzulegen (MPoP-Liste), auf der 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 Anschlusstypen
- 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. Beispielhaft siehe hierzu auch Anhang 6.

Nachdem die Anzahl der Anschlusstypen festgelegt sind (ggf. beschrieben durch Nutzertyp und Anschlusstechnologien und die potenziell in Anspruch zu nehmenden Dienste (siehe Anhang 5)), ist abzuschätzen, **in welchem Umfang ein Nutzer während einer Breitbandverbindung die jeweiligen Dienste in Anspruch nehmen wird.** Dies wird auf Basis des vereinfachten Dienstmodells und deren Dienstekategorien nach Tabelle 3-2 vorgenommen. – An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Möglichkeiten der Netzbetreiber, die von den Endkunden genutzten Dienste zu beobachten, sich in den letzten Jahren wesentlich verbessert haben. War es früher 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 3-3 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 Nutzer über die Busy Hour einen Dienst in Anspruch nimmt; z.B. ergibt sich aus Tabelle 3-3, dass von 1000 SOHO-Nutzern durchschnittlich ein Nutzer einen Konferenzdienst während der gesamten Busy Hour in Anspruch nimmt, bzw. von 500 Nutzern ein Nutzer über 30 Minuten. Die hier angegebenen Werte sind illustrativ.³²

Die Abbildung der Nachfrage nach IPTV ist in dieser Darstellung nicht enthalten. Die Beschreibung findet sich in dem separaten Abschnitt zur Implementierung von IPTV (siehe Abschnitt 3.4). Im Anhang sind die entsprechenden Inputparameter dargestellt, siehe Anhang 7.3.

Tabelle 3-3: Beispiel für eine Verkehrszuweisung je Nutzer und Dienstekategorie in Erlang/Busy Hour³³

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

Aus diesen Busy Hour Verkehrswerten können dann unter Rückgriff auf die Bandbreitenwerte für jede Dienstekategorie aus Tabelle 3-2 die Bandbreite je Nutzer nach down- und upstream und deren Summenwerte berechnet werden. Tabelle 3-4 zeigt beispielhaft für die Werte aus Tabelle 3-3 und Tabelle 3-2 die sich daraus ergebenden Bandbreitenwerte. Es ist zu beachten, dass die Multicast-Verkehre nicht proportional von der Nutzerzahl abhängen und daher separat bestimmt werden.³⁴ Sie

³² Eine ausführlichere Darstellung zu den Nutzertypen findet sich in Anhang 5. Die Darstellung im Hauptteil des Referenzdokuments beschränkt sich ansonsten auf Anschlusstypen. Um jedoch das Beispiel „realitätsnäher“ und damit nachvollziehbar zu gestalten, wurde in der Darstellung hier auf stilisierte Nutzertypen zurückgegriffen.

³³ 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.

³⁴ Dies bedeutet, dass - mit Ausnahme von IPTV – sämtliche Verkehre als „Nutzerverkehre“ modelliert (d.h. als beim Nutzer ausgehenden Verkehr) werden.

sind daher nicht in der nachfolgenden Tabelle enthalten und müssen nachträglich aufgeschlagen werden (siehe Abschnitt 3.4.2).

Tabelle 3-4: Bandbreitenwerte [kbps] je Nutzer in der Busy Hour entsprechend den Beispielwerten aus Tabelle 3-2 und Tabelle 3-3

Name	Trad.	Standard	Premium	SOHO	SME	LE
Premium Business Dienste	0	0	0	0	307,50	1537,50
Sprachdienste	4,76	7,14	9,52	14,28	142,80	476,00
Konferenzdienste	0	0	0	1,26	6,30	12,61
VoD Dienste	0	28,80	57,60	0	0	0
Business Data Dienste	0	0	0	44,24	221,20	2212,00
Sonstige Best effort Dienste	12,80	25,60	64,00	25,60	64,00	640
P2P	134,52	269,04	672,60	0	0	0
Total downstream	152,08	330,58	803,72	85,38	741,80	4.878,11
Premim Business Dienste	0	0	0	0	307,50	1.537,50
Sprachdienste	4,76	7,14	9,52	14,28	142,80	476,00
Konferenzdienste	0	0	0	0,42	2,10	4,20
VoD Dienste	0	0,25	0,50	0	0	0
Business Data Dienste	0	0	0	32,00	160	1600
Sonstige Best effort Dienste	6,40	12,80	32,00	12,80	32,00	320
P2P	134,52	269,04	672,60	0	0	0
Total upstream	145,68	289,23	714,62	59,50	644,40	3.937,70
Total down+upsteam	297,76	619,81	1.518,34	144,88	1.386,20	8.815,81

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 nutzer-induzierten 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 angeschlossen hat. Damit ergeben sich aus den Verkehrswerten von Tabelle 3-4 Nutzerwerte und Bandbreiten pro MPoP, die in Tabelle 3-5 gezeigt werden. Für den beschriebenen MPoP ergibt sich ein gesamter Bandbreitenbedarf (down-stream) von 13,982 Gbps. Dem sind die Bandbreiten für die IPTV-Dienste zuzu-

schlagen³⁵, womit sich ein durchschnittlicher Gesamtwert von rund **14,382 Gbps** am MPoP ergibt.

Tabelle 3-5: Beispiel für die Bandbreiten (downstream) an einem MPoP nach Nutzertypen bzw. Dienstkategorien, Werte in [Mbps/Busy Hour]

Name	Trad.	Standard	Premium	SOHO	SME	LE	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							100	
Anzahl HDTV Kanäle							25	
Premium Business	0	0	0	0	461,25	138,38	599,63	4,29%
Sprachdienste	4,76	42,84	19,04	6,71	71,40	14,28	159,03	1,14%
Konferenzdienste	0	0	0	0,59	3,15	0,38	4,12	0,03%
VoD-Dienste	0	172,81	115,21	0	0	0	288,02	2,06%
Business-Data	0	0	0	20,79	110,60	66,36	197,75	1,41%
Sonstige Best effort	12,80	153,60	128,00	12,03	32,00	19,20	357,63	2,56%
P2P	538,08	6.456,96	5.380,80	0	0	0	12.375,84	88,51%
IP TV SD							200	
IP TV HD							200	
Summe ohne IPTV	555,64	6.826,21	5.643,05	40,13	678,40	238,59	13.982,02	100,00%
Relativer Anteil ohne IPTV [%]	3,97%	48,82%	40,36%	0,29%	4,85%	1,71%	100%	

Die im Beispiel gewählten Werte für die Anzahl der Nutzer sind illustrativ. Im Anhang 1 wird ein systematisches Modell beschrieben, das eine flexible Berechnung der Verkehrsnachfrage gestattet und ein breiteres Spektrum von Werten untersucht.

³⁵ Es werden in diesem Beispiel 100 Kanäle mit SDTV à 2Mbps und 25 Kanäle HDTV à 8 Mbps angesetzt. Zu der, von der Nutzerzahl abhängigen Modellierung der Bandbreitenwerte für IPTV siehe Abschnitt 3.4.2.

3.4 Berücksichtigung von IPTV im Breitbandkostenmodell

Im Breitbandkostenmodell ist es möglich, die Kostenimplikationen von IPTV 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 IPTV ausgegangen, die mit dem NGN lediglich separate Glasfasern auf gleichen Kabelabschnitten in Anspruch nehmen. Die zweite Realisierungsform, als „Inband“ bezeichnet, beinhaltet eine Realisierung von IPTV 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 IPTV – Outband

Bei der Outband-Implementierung von IPTV im Modell wurde unterstellt, dass in jedem physikalischen Ring, in dem ein MPoP mit IPTV 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 IPTV 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 IPTV 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 IPTV versorgt werden. Darüber hinaus sind auf Grundlage der vom Netzplanungsmodul abgeleiteten netzstrukturellen Daten folgende Informationen bereitzustellen:

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

Auf dieser Basis lässt sich der Anteil von IPTV 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 IPTV zu den von den für Layer 3, Layer 2 und Layer 1 Dienste benötigten Fasern zuzüglich der IPTV Fasern ergeben:

Tabelle 3-6: Durchschnittlicher Kostenanteil von IPTV 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 IPTV Angebot gewährleistet ist, darf der Reduktionsfaktor lediglich auf die betroffenen Ringe angewandt werden.

Auf Basis der Informationen über die mit IPTV versorgten MPoP generiert das Netzplanungsmodul die Information über den Anteil der Ringe mit IPTV, differenziert nach Netzsegmenten. Dieser Modelloutput hat die in Tabelle 3-7 dargestellte Struktur:

Tabelle 3-7: Anteil der Ringe mit IPTV 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 IPTV berechnet werden (multiplikative Verknüpfung der Kostenreduktion mit der Häufigkeit), auch wieder differenziert nach Netzsegmenten:

Tabelle 3-8: Reduktionsfaktoren für die Layer 0 Kosten bei Berücksichtigung von IPTV

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

3.4.2 IPTV – Inband

Im Unterschied zur Outband-Lösung werden bei der Inband-Lösung die gemeinsam mit anderen Breitbanddiensten genutzten Netzelemente dimensioniert. Entsprechend werden im Modell folgende Aspekte berücksichtigt:

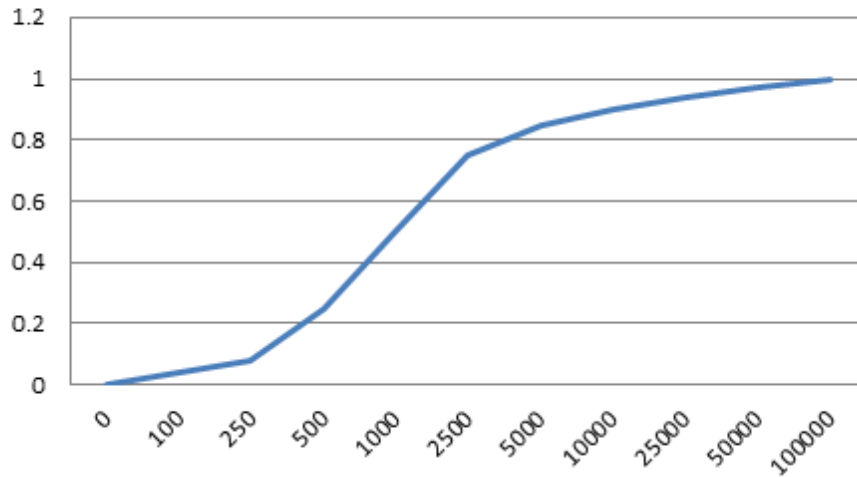
- MPoP-spezifische IPTV Nachfrage
- Multicast Charakter des Verkehrsstroms
- Zahl der übertragenen Programme als eine Funktion der Zahl der IPTV Nachfrager (MPoP spezifisch)
- Beschreibung der dienstespezifischen Verkehrseigenschaften (Bandbreite, Paketlänge, maximale Verzögerungszeit, etc.) unter Berücksichtigung sowohl von HDTV als auch STV
- maximale Anzahl an gleichzeitigen Programmen (differenziert nach HDTV und STV).³⁶

Obwohl IPTV aufgrund seiner Multicast Eigenschaften eine andere Bestimmung der Verkehrsnachfrage an Knoten und Kanten bedarf als die sonstigen Breitbanddienste, da der IPTV 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 IPTV versorgten Anschlusstypen 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.

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 - die Zahl der gleichzeitig aktiven Anschlüsse und den daraus resultierenden Netzverkehr bestimmt. Die Stufenfunktion erlaubt dabei über Inputparameter zu steuern, wie sich mit zunehmenden aktiven IPTV-Anschlüssen die Zahl der gleichzeitig zu übertragenden Programme verändert. 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 IPTV im Falle der Übertragung aller Programme realisiert wird. Auf der Abszisse findet sich die Zahl der gleichzeitig aktiven Anschlüsse.

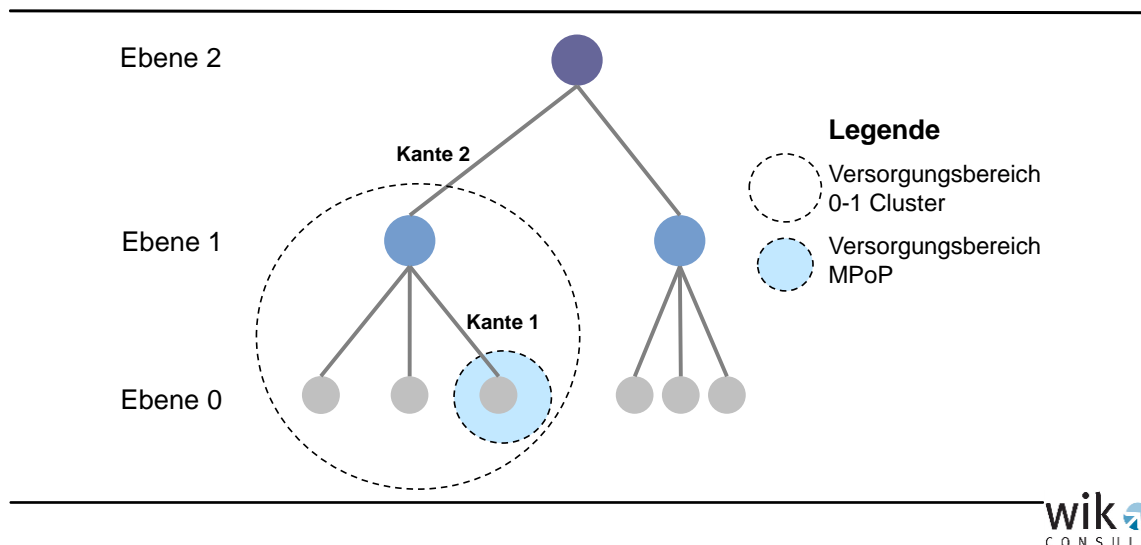
³⁶ Siehe hierzu den Inputparameter Bdk in Anhang 7.2, der das maximale Übertragungsvolumen beschreibt.

Abbildung 3-5: Traffic Transformation Function



Bei der Verkehrsführung von IPTV 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 IPTV 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 zugrunde zu legen. Diese Vorgehensweise setzt sich hierarchisch nach oben fort. Die in Abbildung 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 IPTV 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 IPTV Server geführt und die Netzelemente auf dem Weg dorthin entsprechend dimensioniert.

Für die BNG-Architektur wird der Multicaststrom zwischen IPTV Server und BNG auf die maximale Bandbreite des Programmangebots ausgelegt. Damit stehen am BNG sämtliche Programme direkt zur Verfügung.

Für das Segment MSAN-BNG werden zusätzliche Eingabeparameter berücksichtigt, die es erlauben, die durchschnittliche busy hour IPTV Nachfrage zu parametrisieren. Denn auf diesem Netzabschnitt gibt es keine oben beschriebene Multicast-Funktion, sondern es wird jedem Kunden nur das von ihm gerade abgerufene Programmangebot zugeführt. Dieses ist begrenzt durch die Kapazität seiner Anschlussleitung. Typischerweise werden jedem Kunden maximal 4 Programme zeitlich parallel zugeführt.³⁷

3.5 Spezifische Layer 2, Layer 1 und Layer 0 Nachfrage

Wie bereits in Abschnitt 2.4.1 ausgeführt, sind sämtliche Nachfragen im Netz für die Dimensionierung zu berücksichtigen. In den Abschnitten 3.1 bis 3.3 wird die

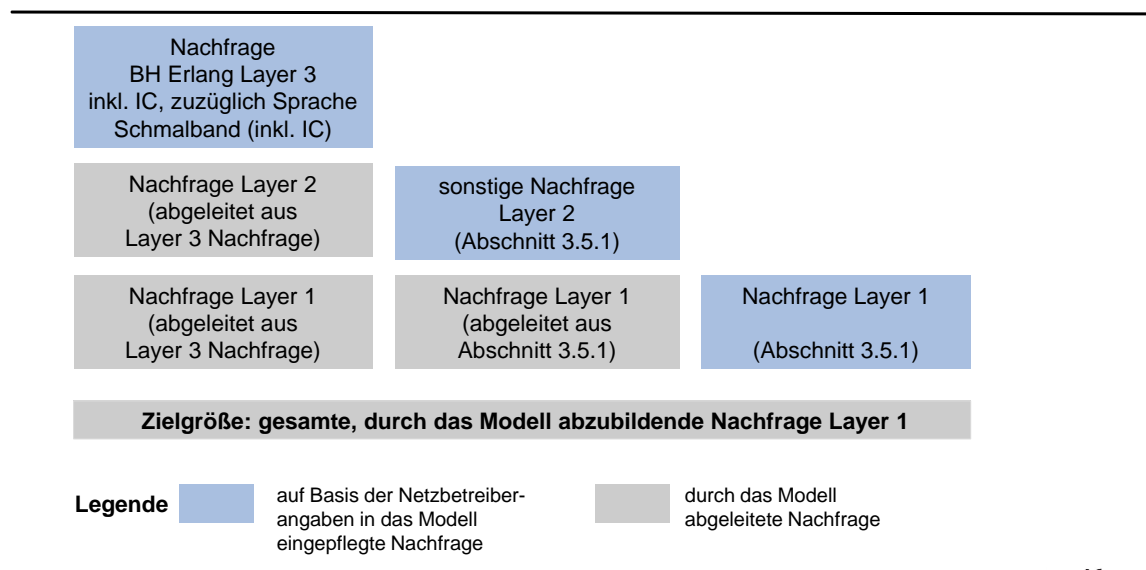
³⁷ Diese Steuerung übernimmt der BNG auch für den IP-Bitstrom, nicht jedoch für den Layer 2 Bitstrom. Hier muss die Steuerung durch den Wholesale-Nachfrager erfolgen. Da aber auch hier die Anschlussleitung die Bandbreiten-begrenzende Funktion hat und sich an dem Maßstab der maximal 4 parallelen Programme nichts ändert, kann grundsätzlich für IP-TV mit denselben Ansätzen gerechnet werden.

Bandbreitennachfrage 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. 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 Produkte ergeben. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass nach Maßgabe des Total Element Ansatzes die Größen- und Verbundvorteile im Netz adäquat abgeschätzt werden. Die in der mittleren und rechten Säule dargestellten Nachfragen (Abbildung 3-7) sind nachfolgend beschrieben.

Die Modellierung der spezifischen Kosten der Kapazitätsnachfrage – zu der auch die Mietleitungen gehören – wurde am 7. Mai 2014 zunächst als Anhang 10 zum Referenzdokument zur Konsultation³⁸ gestellt und ist nun in überarbeiteter Form diesem Dokument als Anlage 3 beigefügt.

Abbildung 3-7: Kapazitätsnachfrage auf Layer 1 und abgeleitete Kapazitätsnachfrage aus Layer 2 und Layer 3³⁹



³⁸ [WIK-14c], Anlage 3 Version 2.3 [WIK-16e]

³⁹ Aufgrund der Unterteilung des Netzes in ein Layer 2 basiertes Konzentrationsnetz und ein Layer 3 basiertes Kernnetz ist zu beachten, dass ein Ende-zu-Ende Transport von spezifischen Layer 2 Nachfragen nicht uneingeschränkt auf Layer 2 erfolgen kann. Im Kernnetz ist ein Tunneln im IP erforderlich, woraus sich auch eine abgeleitete Layer 3 Nachfrage aus der spezifischen Layer 2 Nachfrage ergibt.

3.5.1 Kapazitätsnachfrage auf Layer 2 und Layer 1

Für die Nachfragen auf Layer 2 und Layer 1, die eine Aggregation und ein Multiplexen erlauben, erfolgt die Modellierung auf Basis der standortbezogenen Nachfrage an den MPoP.

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 Nachfrage ergibt) abstrahiert der Modellierungsansatz von der Vielzahl der existierenden Angebote an Übertragungskapazitäten (E1, E3, STM-n, 1GB 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 inkrementelle Einrichtungen benutzen, bevor diese Kapazitäten über eine weitere Schnittstelle mit den ADM oder CCX Einrichtungen des IP- und Ethernet basierten Breitbandnetzes integriert werden.⁴⁰ – 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 (siehe Anhang 7.2, Service Input) auch hinsichtlich der durchschnittlichen Paketlänge spezifiziert, da diese Kapazitätsnachfrage über die Einrichtungen der logischen Netzschicht realisiert wird und somit geschwitched bzw. geroutet wird.

⁴⁰ Eine solche Realisierungsform ist immer dann sinnvoll, wenn die Anzahl der nachgefragten Kapazitäten hinreichend groß ist und ein separates Management dieser Einrichtungen auch für die Steuerung oder Entstörung nahelegen.

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.

3.5.3 Berücksichtigung der Kapazitätsnachfrage aus dem Mobilfunknetz

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

Dennoch, die Mobilfunknetze können Funktionen eines Breitbandnetzes (ALL-IP, auch NGN) nutzen. So kann der IP-Daten- und Internetverkehr an den Core-Standorten des Mobilfunknetzes in das Breitbandnetz übergeben werden und 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 ist bei der Nachfrageparametrisierung das aus Zusammenschaltungsstandorten mit dem Mobilfunknetz entstehende Verkehrsvolumen zu berücksichtigen.⁴¹

Es ist davon auszugehen, dass die Zahl der Core-Layer Standorte des Festnetzes die des Mobilfunknetzes übersteigt. Da in beiden Netzen die Zugehörigkeit zum Core Layer über die Verkehrsstärke der Knoten bestimmt wird, ist die Vermutung naheliegend, dass die Core-Layer Standorte des Mobilfunknetzes eine Teilmenge der Core-Layer Standorte des Festnetzes sein werden, so dass die Zusammenschaltung der Netze zur Übergabe des Verkehrs innerhalb dieser Kollokationsstandorte über einfache Inhaus Verbindungen zu lösen wäre. Aber auch für den Fall, dass die Standorte modellendogen nicht kongruent gewählt würden, ließe sich die Zusammenschaltung darstellen (entweder Erzwingung der Kongruenz über exogene Vorgabe von Standortfunktionen oder Übergabe des Verkehrs am nächstgelegenen MPoP).

⁴¹ Die flexible Definition von Anschlusstypen in der Matrix der MPoP Liste erlaubt beispielsweise die Zuweisung einer Zelle für diesen IC-Mobilfunkverkehr.

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.

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.⁴²

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 2.4 anhand von Abbildung 2-4 illustriert wurde. Auf der Grundlage dieser Netzhierarchie ist die Verkehrsnachfrage von ihrem Ursprung zu ihren Zielen aufzuteilen, was durch eine zugehörige Verkehrsmatrix beschrieben wird (siehe hierzu auch Anhang 2).

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.

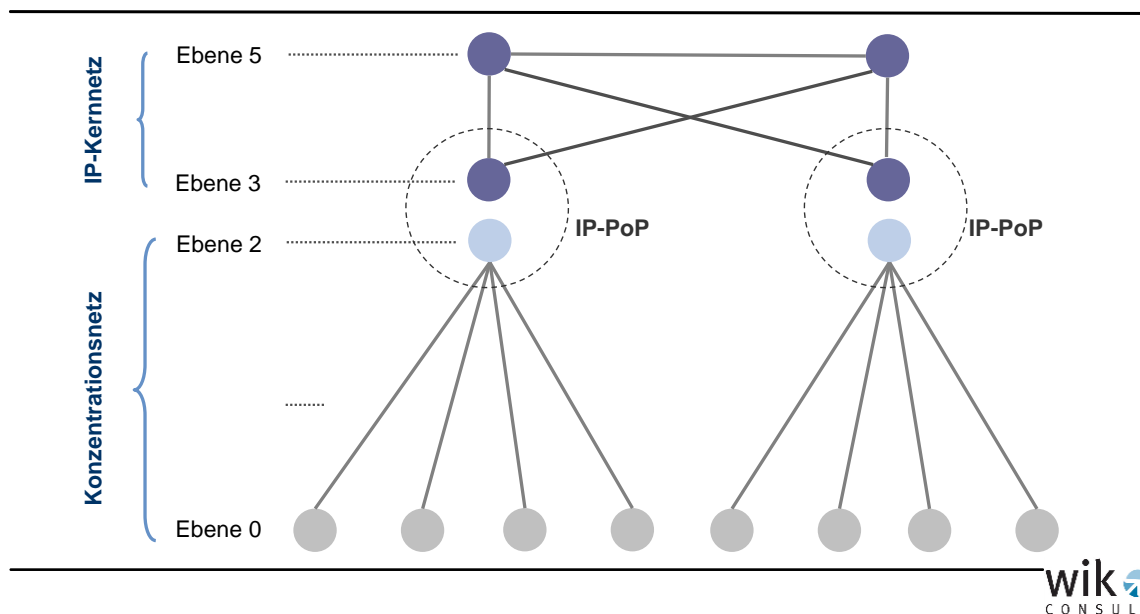
⁴² Auf die Kontrollschicht wird in Abschnitt 6 eingegangen.

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 eingeführt wurde – ist eine Netzhierarchie mit 4 Ebenen schematisch dargestellt. Im Kontext der BNG-Architektur ist die Anzahl der maximal modellierbaren Ebenen auf 4 festgelegt.

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 veränderbaren Modellinput dar. Diese Standorte werden als Geo-Koordinaten über eine zugrunde liegende Datenbank in das Modell eingelesen (siehe auch die Ausführungen in Abschnitt 3.3.1.3 sowie den Anhang 7.6).

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 enthält jeder Netzknoten Funktionen der untersten Netzebene⁴³ (Modellimplementierung), unabhängig davon, ob er zusätzlich höheren Netzebenen zugeordnet wird. Die Anzahl der Netzknoten 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 bestimmt.

Im Modell werden sowohl Kriterien der Knotenstärke als auch Abstandskriterien hinterlegt, wobei der anzuwendende Mindestabstand zwischen den Knoten einer Ebene im Modell parametergesteuert ist (und somit auch eliminiert werden kann, wenn er einen Wert nahe Null annimmt).⁴⁴ Damit wird eine Verteilung der Funktionen höherer Netzebenen auf die verkehrsstärksten Netzknoten ermöglicht und gleichzeitig eine Akkumulation der Knoten der höheren Ebenen in einigen dicht besiedelten Gebieten vermieden (siehe auch hierzu die Inputparameter im Anhang 7.4).

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.⁴⁵

Die Knotenstärke wird im Modell über die zugehörige Verkehrsnachfrage aller an den Standort angeschlossenen Nutzer bestimmt (siehe Abschnitt 3.3.2). Diese ergibt sich 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.

Diese 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-Ansatzes⁴⁶ vorzunehmen. Zu den dienstspezifischen Routingvorgaben sind entsprechende Inputparameter vorgehalten, siehe hierzu die Darstellung in Abschnitt 3.3, 3.4 und 3.5.1 sowie die entsprechenden Inputparameter in Anhang 4. In der nachfolgenden Abbildung 4-2 stellt dies schematisch für ein Netz mit zwei Ebenen im Konzentrationsnetz und zwei Ebenen im

⁴³ Dabei handelt es sich um das teilnehmeranschließende Equipment im MPoP.

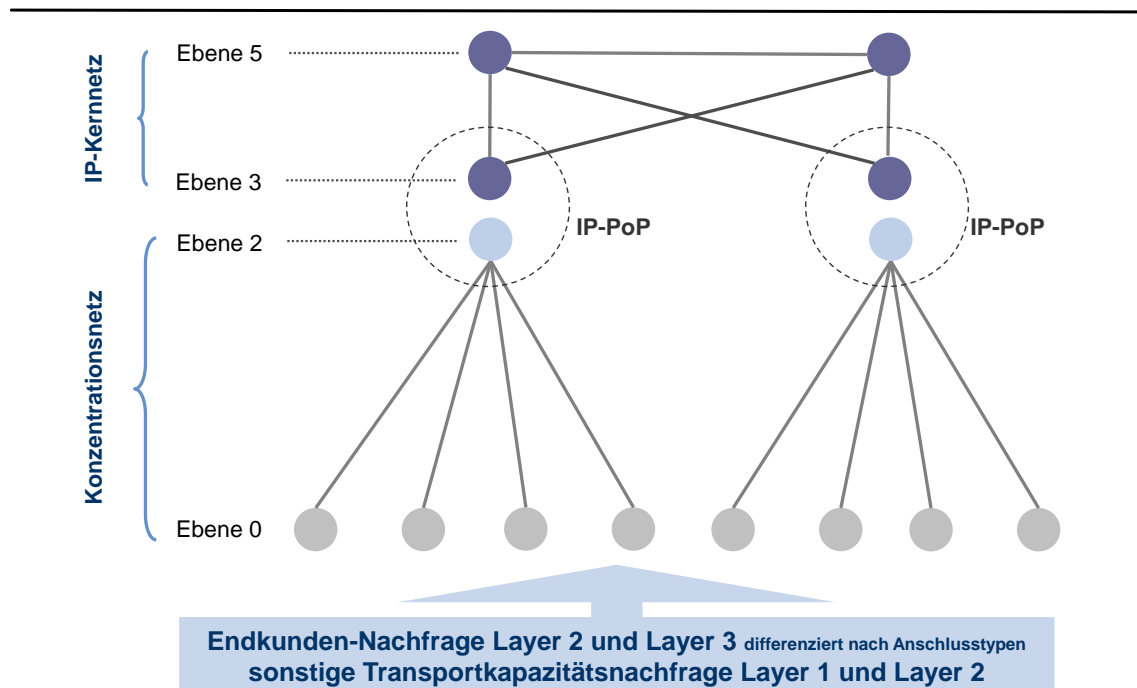
⁴⁴ Diese Auswahlkriterien nehmen bereits eine erste Optimierung des physikalischen Netzes vorweg, als dass darauf abgestellt wird, dass Verkehre aus verkehrsstarken Knoten nicht über weite Entfernungen durch ein Konzentrationsnetz zum Kernnetz geführt werden müssen.

⁴⁵ 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.

⁴⁶ 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.

NGN-Kernnetz dar, wobei die oberste Ebene des Konzentrationsnetzes mit den Standorten der untersten Ebene des NGN Kernnetz übereinstimmt.

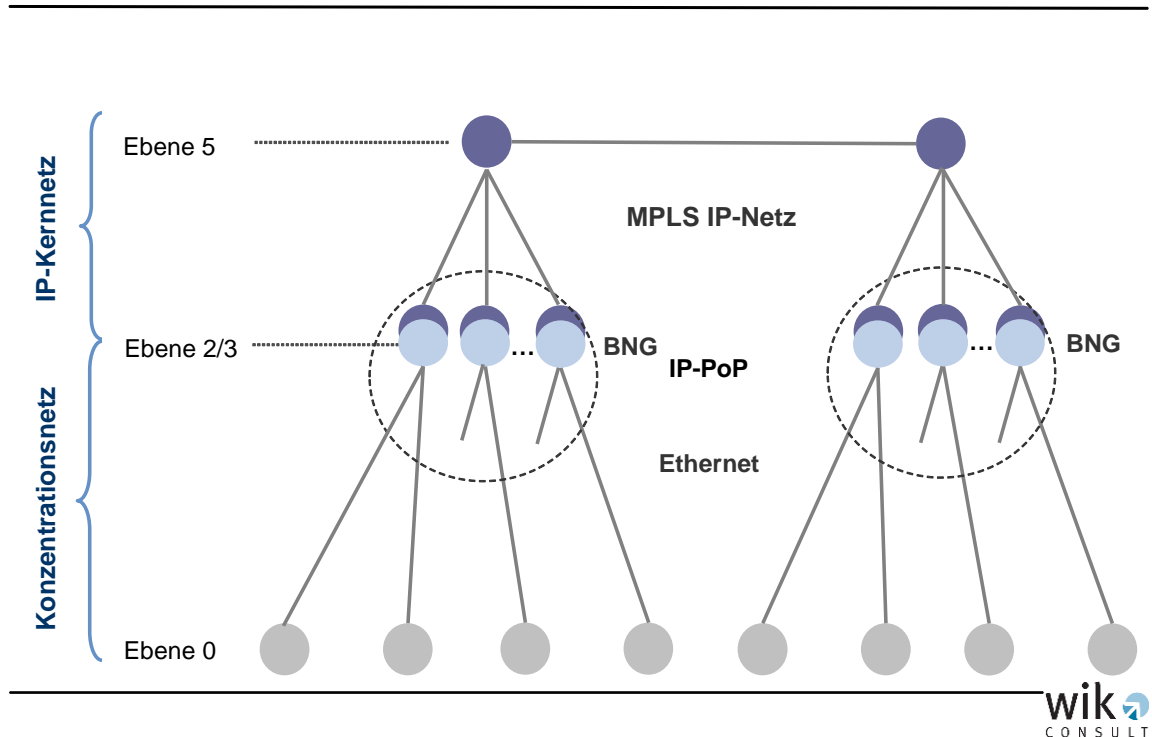
Abbildung 4-2: Nachfragegetriebene Netzmodellierung



Diese skizzierte Vorgehensweise zur Modellierung der Netzhierarchie und der Parameter gesteuerten Veränderbarkeit der Anzahl der Netzebenen sowie der Knotenanzahl je Netzebene hat sich im Kostenmodell für das nationale Verbindungsnetz in der Vergangenheit bewährt.

Für die Modellimplementierung wurde die Anzahl von Netzebenen auf vier festgelegt. Die unterste Netzebene hat, dem scorched node Ansatz folgend, ca. 8000 MPoP, die mittleren Netzebenen ca. 900 Standorte (gleichfalls scorched node als effizient angenommen), und die oberste Netzebene hat derzeit 12 Standorte (Tabelle 4-1). Dies ist zum einen der Entwicklung der BNG als integrierte L2/3 (Ethernet Switch mit integriertem LER etc.) geschuldet, zum anderen aber auch dem Abbau des PSTN-Netzes zugunsten eines reinen VoIP Sprachübertragungsnetz. Abbildung 4-3 zeigt eine Modifikation der vorhergehenden Abbildungen, bei denen die Integration von L2 Aggregationsswitch und LER in einem System im IP-PoP dargestellt ist, dem Standort, der zuvor schon beiden Netzteilen als gemeinsamer Standort diente.

Abbildung 4-3: BNG-Architektur auf 4 Ebenen, 2 Ebenen fallen im IP-Pop zusammen.



Aufgrund der Dienstentwicklung und vor allem der technischen Entwicklung der Einrichtungen erfolgte eine Reduzierung der Anzahl an Standorten in den höheren Netzebenen (gegenüber dem PSTN) bzw. der Verzicht auf eine intermediäre Netzebene 4 im Kernnetz. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass Ebene 2 und Ebene 3 den IP-PoP bilden und daher die gleiche Standortzahl aufweisen müssen.

Tabelle 4-1: Beispiel für 4 Netzebenen und die Anzahl zugehöriger Standorte für ein Breitbandnetz in Deutschland, Stand 2016

Studie für die BNetzA 2006			
Bezeichnung	Ebene	absolut	Relation Ebenen
Grundmenge (MPoP-Standorte)	0	8.000	
Konzentrationsnetz obere Ebene	2	900	8,9
Kernnetz untere Ebene	3	900	
Kernnetz obere Ebene	5	12	75

Quelle: WIK, angelehnt an [Hackbarth-06]

Die Reduktion der Anzahl der Knotenstandorte im Kernnetz 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 Kernnetz und wieder zurück). D. h., klassische Sprachdienste werden tendenziell besser durch eine größere Anzahl von Kernnetz-Standorten – und damit stärker regional – abgewickelt. Die Sprache hat jedoch einen immer geringer werdenden Anteil am Gesamtverkehr und die NGN-Integration und der Preisverfall bei den vermittelnden und steuernden Systemen gegenüber PSTN wiegen diesen Nachteil mehr als auf.
- Auf der anderen Seite sind die stark wachsenden 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. Verkehre aus VPN resultieren in der Regel vornehmlich aus den Standorten des Kernnetzes.⁴⁷

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

- Konzentrationsnetz und
- IP-Kernnetz.

Für jedes der Segmente wurde eine **maximale Anzahl von zwei Hierarchieebenen** implementiert.⁴⁸ Dabei ist hervorzuheben, dass die Anzahl der Netzebenen bundesweit einheitlich gilt, d.h. in jeder Region und in jedem Cluster. Die resultierenden Strukturen sind letztlich Ergebnis der Strukturvorgaben für die Netzhierarchie, die auf die MPoP-Liste mit den zugehörigen Teilnehmern wirken. Das Modell generiert daraus regional unterschiedliche und dem Verkehrsbedarf angepasste Strukturen unter Berücksichtigung der vorgegebenen Ebenen.

⁴⁷ 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.

⁴⁸ 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.

4.2 Logische Netzstruktur und Verkehrsführung

Nachdem die Netzhierarchie gemäß Abschnitt 4.1 vollständig bestimmt ist, sind im nächsten Schritt die „logischen“ Netzstrukturen⁴⁹ 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 das Konzentrationsnetz betrachtet und im Zweiten die Hierarchie für das Kernnetz. Da für jedes Netzsegment eine maximale Anzahl von 2 Netzebenen implementiert ist, wird der Modellierungsansatz für zwei Netzebenen beschrieben und auf die Relevanz und Besonderheiten von Netzen mit nur einer Netzebene eingegangen. Der dritte Unterabschnitt betrachtet Szenarien für die Verkehrsführung von und zu Zusammenschaltungspunkten.

4.2.1 Konzentrationsnetz

Im Kostenmodell sind für das Konzentrationsnetz zwei Hierarchieebenen vorgesehen. Die Konzeption eines Ein-Ebenen-Netzes für das Konzentrationsnetz ist auszuschließen, da diese mit keiner Konzentration einherginge, sondern lediglich den Verkehr im IP-PoP (der gleich dem MPoP wäre) von Ethernet auf IP übergeben würde.⁵⁰ Entsprechend werden nachfolgend nur die logischen Strukturen für ein 2-Ebenen Konzentrationsnetz dargestellt.

- Für das Konzentrationsnetz wurden aus heutiger Sicht logische Sternstrukturen implementiert. Diese Sternstrukturen ergeben sich dabei bereits implizit aus der Berechnung der Netzhierarchie, welche unter Berücksichtigung von Verkehrsstärke und Abstandskriterien erfolgt.
- Die aggregierten Verkehre am MPoP und deren zugehöriger Bandbreitenbedarf (für das Kernnetz am IP-PoP) bilden den Ausgangspunkt für den Entwurf der Hierarchie des logischen Netzes.

⁴⁹ Der Begriff logische Netzstruktur wird verwendet, um von der physikalischen Struktur zu unterscheiden. Im PSTN/ISDN wurde die logische Netzstruktur durch die digitalen Vermittlungseinrichtungen und die sie verbindenden Leitungen in Form von E1-Gruppen beschrieben. Im Konzentrationsnetz sind dies nach heutiger Technologie die Ethernet-Konzentratoren, Ethernet Metro Switches bzw. BNG und die sie verbindenden Leitungen in Form von 100Mb, 1Gb, 10Gb. Im Kernnetz sind dies Routereinrichtungen und die sie verbindenden elektrischen bzw. optischen Signale (STM-N bzw. OXC).

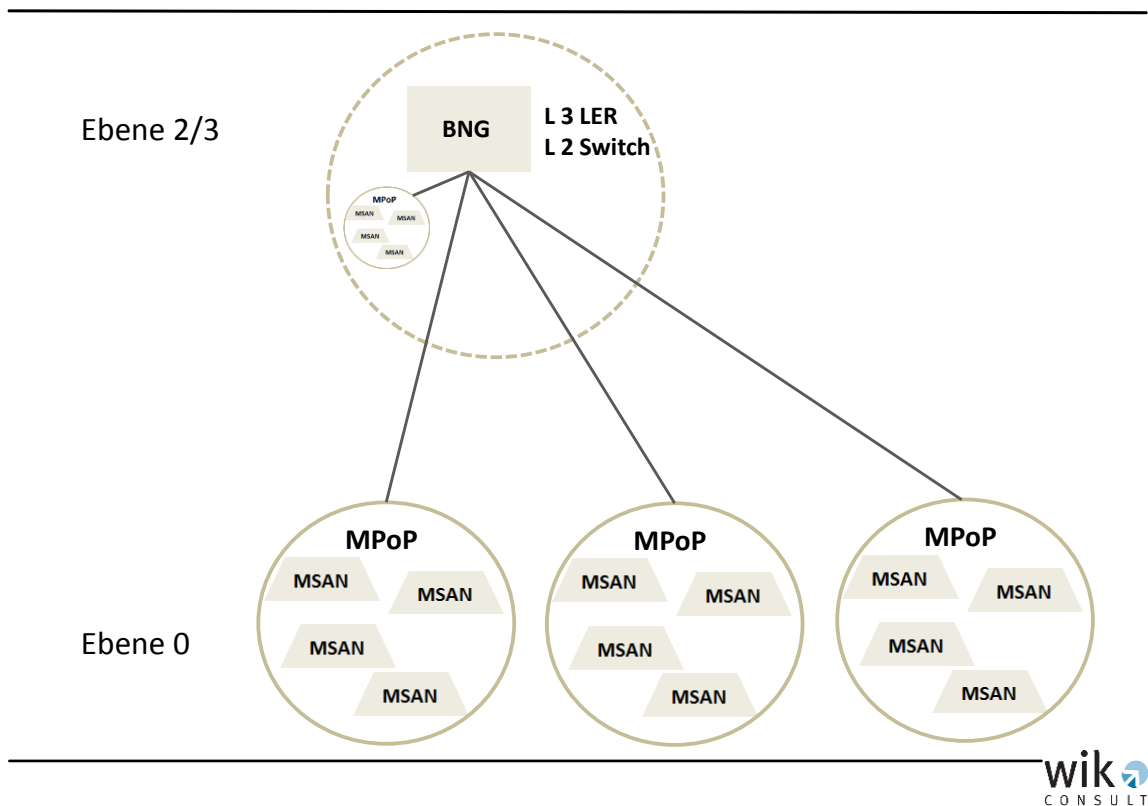
⁵⁰ Letztlich erlauben auch Ethernet Switches und MSAN im MPoP oder KVz eine Vorkonzentration (wenn sie unmittelbar auf die LER aufgeschaltet werden), da diese Systeme die Mengen der Kunden verwalten.

- An den MPoP-Standorten oder gar vorgelagert, derzeit in Deutschland typischerweise im KVz, befindet sich das teilnehmeranschließende Equipment. Wie bereits in Abschnitt 2.4.3 dargestellt, werden die Teilnehmer in Abhängigkeit der zugrunde liegenden FTTx-Strategie direkt oder bereits vorkonzentriert am MPoP an das Transportnetz übergeben. Da die Modellierung des Konzentrationsnetzes neutral gegenüber der NGA-Architektur sein soll, wird die netzseitige Schnittstelle zur Anbindung an die Layer 1 Einrichtung des Transportrings auf der untersten Netzebene (MPoP) als erstes Netzelement des Konzentrationsnetzes betrachtet (siehe dazu auch Abschnitt 7). – Es sei noch einmal betont, dass letztlich jeder Standort – egal welcher Netzebene er zugeordnet ist – einen MPoP repräsentiert und dort Teilnehmer an das (Konzentrations-)Netz angebunden werden. Dieses Teilnehmer anschließende Equipment wird wiederum an die am jeweiligen Standort vorgesehenen Einrichtungen angebunden.

Im Abschnitt 4.1 wurde die Bildung der Netzhierarchie erläutert. Daraus geht bereits die hierarchische Anbindung von Knoten der unteren Ebene an Knoten einer höheren Ebene heraus hervor. In diesem Abschnitt wird nun darauf aufbauend ausgeführt, auf Basis welcher Einrichtungen und Strukturen, die Umsetzung der vorgestellten Hierarchie erfolgt.

Das Modell ist in der Lage bis zu 2 Konzentrationsnetzebenen abzubilden. Grafisch stellt sich dies wie in der nachfolgenden Abbildung 4-4 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).

Abbildung 4-4: Sternstruktur im 2-Ebenen Konzentrationsnetz



Aus der grafischen Darstellung geht hervor, dass auf allen Netzebenen teilnehmeranschließendes Equipment angesiedelt ist (dargestellt durch den MPoP, realisiert i.d.R. über einen MSAN, OLT oder im Fall von Verbindungsnachfragen auf Layer 2 über einen Ethernet-Konzentrator). Selbst auf Ebene 2/3 werden die Teilnehmer über das Konzentrationsnetz spezifische Equipment indirekt an das IP-Kernnetz (LER-Funktion des BNG) angeschlossen.

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 MPoP und den zugeordneten IP-PoP ab.

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

determiniert.⁵¹ 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 2 Ebenen vor, so dass die Möglichkeit der Abbildung hierarchischer Strukturen für die Kostenberechnung erlaubt wird, wobei davon ausgegangen wird, dass die Verkehrsmengen in der höheren Ebene größer sind, als in der darunter liegenden Ebene (dem Prinzip der Hierarchiebildung nach Verkehrswerten folgend).

Damit ergeben sich folgende Strukturen im logischen Netz:

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

Im Modell werden im hierarchischen Fall keine direkten Verbindungen zwischen unteren Standorten im logischen Netz betrachtet. Gleiches gilt für „Überlaufverbindungen“ von einem unteren 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

⁵¹ [WIK-05; 30ff.]. Diese (und nachfolgende) Ausführungen finden sich zum Teil bereits im Referenzdokument für ein analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz 2005.

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 Datagram-Protokolls vorgenommen. Vielmehr werden derzeit Router verwendet, die über das MPLS-Protokoll virtuelle Verbindungen von einem Eingangs- zu einem Ausgangsrouter aufbauen, vgl. [Black-02]. Die Eingangs- und Ausgangs-Router werden als „Label Edge Router“ (LER) – die Router in den Zwischenknoten der Verbindung demgegenüber als „Label Switch Router“ (LSR) bezeichnet.⁵²⁵³

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 auch LER vorgehalten werden, die die Verkehre von und zu den Servern führen. Zudem sind die Standorte der LSR zugleich oft auch zentrale Punkte für Verbindungen zu anderen Netzen für den Sprach- und IP-IP-Video- oder Daten-Verkehr bzw. zu den so genannten Internet Exchange Points IxP bzw. öffentliche NAPs. Für die Verbindungen zu anderen Netzen werden gleichfalls LER, die im Modell von den BNG separiert sind, in diesen Kernnetzstandorten genutzt.

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

Tabelle 4-2: Optionen für die logische Struktur eines 3-Ebenen Netzes

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

⁵² 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, wodurch ein wesentlich erhöhter Durchsatz bei gleichzeitig verringertem Delay und Jitter erreicht wird.

⁵³ Sinngemäß gilt dies auch für das GMPLS-Protokoll, einer Erweiterung des MPLS vor allem für den Einsatz in optischen Transportnetzen, vgl. [Mannie-04.]. MPLS wird vor allem unter elektrischen Schicht 2-Schnittstellen wie ATM, FR oder Ethernet verwendet während GMPLS als eine Erweiterung von MPLS für den Einsatz von NG-SDH und OTN eingesetzt wird. GMPLS erlaubt eine generische Interpretation des Labels um Paketströme über gleiche Einheiten zu lenken, wobei eine solche Einheit z.B. einen optischen Weg (eine entsprechende Wellenlänge) beschreibt, vgl. [Shukla-07].

Im Falle eines

- rein flachen Ein-Ebenen-Netzes existiert nur die in Tabelle 4-2 dargestellte obere Ebene
- hierarchischen Zwei-Ebenen-Netzes existieren die in Tabelle 4-2 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 im allgemeinen Fall jeweils an nur einer Untermenge der Standorte des Kernnetzes direkt angeschlossen.

Für jeden der Nutzer-Server-Dienste ist die Anzahl der Server 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 diejenigen mit größtem Verkehrs-Gewicht auswählt. Im Fall einer überschießenden Zahl von Server- bzw. IC-Standorten wird diese Verteilung auf der nächst niedrigeren Netzebene fortgeführt.

Prinzipiell kann argumentiert werden, dass je betrachtetem Dienst lediglich 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

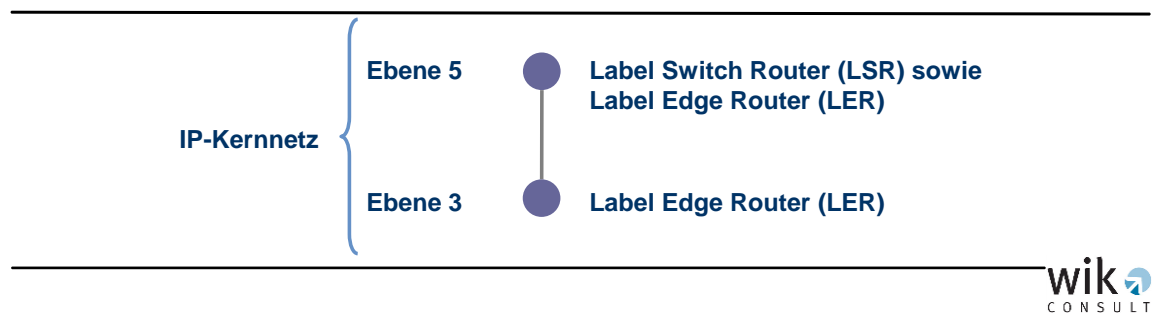
Den Funktionen eines jeden Kernnetzstandortes entsprechend sind auf der untersten Kernnetzebene LER vorzuhalten, die – in Zusammenarbeit mit dem BRAS (Broadband Remote Access Server), der im Rahmen der Kontrollschicht behandelt wird – den Eingang in das IP-Kernnetz steuern. Diese Funktionen (und die des Ethernet Aggregators) sind im vorliegenden Modellrelease im nunmehr marktverfügbaren BNG zusammengefasst. Auf dieser hierarchisch niedrigeren Kernnetzebene gibt es nur die LER-Funktion, aber keine LSR. Eine direkte Kommunikation zweier BNG (LER) eines Standortes untereinander ist nicht möglich oder vorgesehen. Die Installation eines LSR

zu diesem Zweck entspricht nicht der hier vorgesehenen hierarchischen Ausrichtung. Derartiger Verkehr muss daher über die obere Kernnetzebene (LSR) geführt werden.

Eine standortbezogene Verkehrslenkung im Sinne einer Bedienung sämtlicher Anschlüsse, die diesem Standort untergeordnet sind, ist mit dieser Architektur daher nicht im IP-PoP, sondern erst ab einer höheren Kernnetzebene unter Einsatz von LSR möglich. Auf Ebene des BNG kann lediglich eine Bedienung innerhalb der Gruppe der direkt an den BNG angeschlossenen MSAN erfolgen. Für die Modellierung ergibt sich daraus die Notwendigkeit, neben der Hierarchiebildung auf Basis der MPoP die aus der MSAN-BNG Zuordnung entstehende Hierarchie ergänzend zu berücksichtigen.

In der oberen Ebene sind sowohl dedizierte LER- als auch LSR-Einrichtungen installiert. Die LER werden durch interne Verbindungen innerhalb des Standortes an die LSR angebunden.

Abbildung 4-5: Einrichtungen im 2-Ebenen-Kernnetz (IP-Kernnetz)

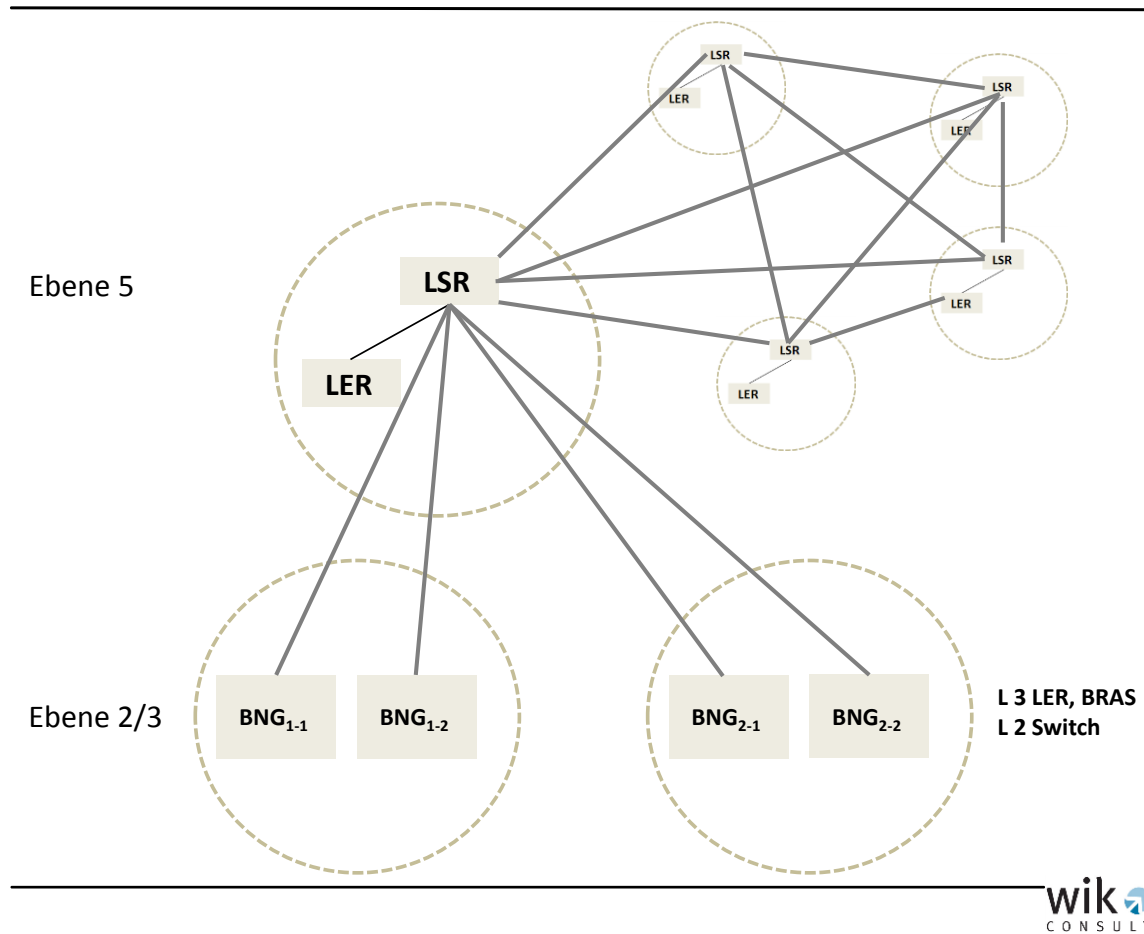


Die Standorte der unteren Ebene werden an jeweils einen Standort der oberen Ebene angebunden.⁵⁴

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

⁵⁴ I.d.R. wird diese Anbindung an den geografisch nächstliegenden oberen Standort vorgenommen, wobei Abweichungen möglich sind, um die Standorte gleichmäßiger zu verteilen.

Abbildung 4-6: Logische Netzstruktur eines hierarchischen 2-Ebenen Kernnetzes



Die vorgenannten Netzstrukturen, die auf der Basis von LER- und LSR-Einrichtungen beschrieben wurden, bleiben auch gültig, wenn Router-Einrichtungen wegen des hohen Verkehrsstroms im Kernnetz nicht mehr auf der Basis des MPLS, sondern zukünftig auf Basis neuer Protokolle (so z.B. dem GMPLS⁵⁵) die Lenkung der Paketströme vornehmen würden. Letztlich können diese Protokolle als „technikneutral“ hinsichtlich der Netzstrukturen bezeichnet werden.

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

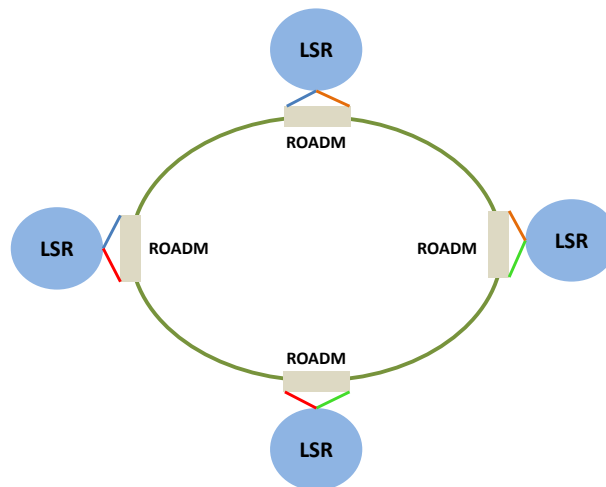
Im Modell werden die logischen Netzstrukturen im 1-Ebenen Kernnetz (flaches Kernnetz) durch die Strukturen in der oberen Ebene des hierarchischen Kernnetzes

⁵⁵ Vgl. Fußnote 53

abgebildet. Daraus ergibt sich für das 1-Ebenen Kernnetz die Besonderheit, dass an allen Standorten nicht nur LER, sondern zusätzlich auch LSR vorgehalten werden.⁵⁶

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. Diese über das MPLS realisierte Form des Switching erlaubt es, den physikalischen Grad der Vermaschung (auf Ebene der logischen Ports) durch den Einsatz von LSR zu reduzieren. So könnte z.B. die logische vollständige Vermaschung von Knoten einer Ebene durch einen physikalischen Stern abgebildet werden. Da dies zu Redundanzproblemen führen würde, ist die einfachste Form der Realisierung Netzebene 5-5 daher ein logischer Ring, bestehend aus LSR-Einrichtungen, der gleichzeitig eine Zwei-Wege-Führung erlaubt.

Abbildung 4-7: Einsatz von LSR im Ring



Ebenso kann im 1-Ebenen Kernnetz eine explizite Berücksichtigung einer Vermaschung erfolgen. Um dies im Modell umzusetzen ist es notwendig, dass mindestens zwei unabhängige Pfade von einem LSR ausgehen, über die die übrigen Zielknoten erreicht werden können. Zu diesem Zweck wird bereits auf der logischen Schicht eine Aufteilung der Verkehrsnachfrage auf zwei unabhängige Pfade vorgenommen. Entsprechend sind in der logischen Schicht (mindestens) zwei Ports auf beiden Seiten des LSR vorzusehen, wobei – in Abhängigkeit von der Absicherung –

⁵⁶ 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 5) erfüllten.

entweder jeweils 50% oder 100% der Verkehrsnachfrage zur Dimensionierung der Ports vorgesehen wird.

4.2.3 Verkehrsführung von und zu Zusammenschaltungspunkten

Wie schon in Abschnitt 3 gezeigt, werden an den MPoP des Breitbandnetzes eines nationalen Netzbetreibers auch Nutzer angeschlossen, die vertraglich von alternativen Netzbetreibern versorgt werden. Deren Verkehre werden, abhängig von der Tiefe der Infrastruktur des alternativen Betreibers, an entsprechenden Netzzugangs- oder Zusammenschaltungspunkten ab- bzw. zugeleitet (Bitstromzugang). Diese Zusammenschaltungspunkte bzw. Netzzugänge können sowohl im Kernnetz als auch im Konzentrationsnetz im Kostenmodell berücksichtigt werden. Auf diese Weise wird im Modell eine flexible Lösung bereitgestellt, die prinzipiell eine Zusammenschaltung an allen Standorten des Breitbandnetzes vorsieht (sowohl für Netzzugang im Sinne von Bitstrom als auch für Sprachzusammenschaltung, wobei für Sprache und IP-Bitstrom primär die Zusammenschaltung auf die Standorte des oberen Kernnetzes (Ebene 5) beschränkt ist und für den Layer 2 Bitstrom die Zusammenschaltung primär an den oberen Konzentrationsnetzstandorten (Ebene 2) erfolgt, an jedem BNG).

Das Model erlaubt, Layer 2 Bitstrom an den BNG auszurouten, Layer 3 (IP) Bitstrom an den LER des oberen Kernnetzes, ebenso die Sprachverkehre und den IP-Verkehr mit anderen Netzen. Sollten zusätzliche Übergabepunkte auf niedrigeren Netzebenen vorgesehen werden (z.B. 73 Standorte für IP-Bitstrom, 474 Standorte für PSTN-Sprachzusammenschaltung), so kann dies über Backhauling der zusätzlichen Standorte an die im Modell geplanten Übergabepunkte umgesetzt werden. Dies geschieht in der dienstespezifischen ergänzenden Rechnung.

Für den Netzzugang im Sinne von Bitstrom sieht das Modell vor, MPoP-spezifisch die Anschlusszahlen der Teilnehmer differenziert nach Netzzugangsebene anzugeben. 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 4-3 dargestellt.

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

Zusammenschaltungsszenario	BNG = 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	1
An allen IP-PoP	0	0,3	0,7
An allen IP-PoP und oberste Ebene im Konzentrationsnetz	0,2	0,3	0,5

Der Anteil von Interconnection-Verkehr ist vor allem Ausdruck der Marktstruktur und insbesondere in einem regulierten Markt nicht in der Kontrolle des nationalen Netzbetreibers. Aus diesem Grund wird der Umfang des Interconnection-Verkehrs durch den Modellanwender über Inputparameter als Anteile der Verkehrsnachfrage gesteuert. Dabei sind hier die nachfolgenden, im Modell implementierten Parameter genannt:

Im Modell soll eine individuelle Parametrisierung für IC-Sprachverkehr einerseits TDM-basiert und andererseits IP-basiert vornehmbar sein. Diese Differenzierung auf der Nachfrageseite ist verbunden mit einer entsprechenden Differenzierung der Standortwahl (Anzahl der Standorte für die jeweilige Zusammenschaltungsart: TDM bzw. IP, können sich unterscheiden).

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

Abweichend davon ergibt sich der Layer 2 Bitstromverkehr je BNG aus der Zahl der Layer 2 Bitstromkunden, die je BNG über die MSAN bei ihm aggregiert werden und die Zahl der Zusammenschaltungs-Anschlüsse aus der Zahl der einschlägigen Wholesale-Nachfrager. Eine aggregierte Ausleitung für alle Nachfrager mit nachgelagerter Trennung des Verkehrs je Nachfrager ist nicht vorgesehen.

Bezüglich des allgemeinen IP-Interconnectionverkehrs ist mit Blick auf die Modellparametrisierung 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 ON- oder OFF-Net, von zentraler Bedeutung für den Umfang des sowohl aus- als auch 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- und Zusammenschaltungsstrukturen unverhältnismäßig vergrößert.

Wir haben uns entschieden, an einer Inputparameter gesteuerten Festlegung des ein- und ausgehenden Interconnection-Verkehrs festzuhalten und Implikationen einer ggf. relevanten Volatilität dieser Verkehre über Sensitivitätsrechnungen abzuschätzen. Diese Vorgehensweise verlagert die Schwierigkeit der Festlegung angemessener Werte auf den Modellanwender. Letztlich gilt auch hier, dass die Qualität der vom Modell generierten Ergebnisse ein Reflex der Eingabedaten ist.⁵⁷

4.3 Redundanzen in logischer und physikalischer Netzstruktur

Um die Verfügbarkeit des Netzes zu erhöhen, können verschiedenste Maßnahmen ergriffen werden. Dazu zählen

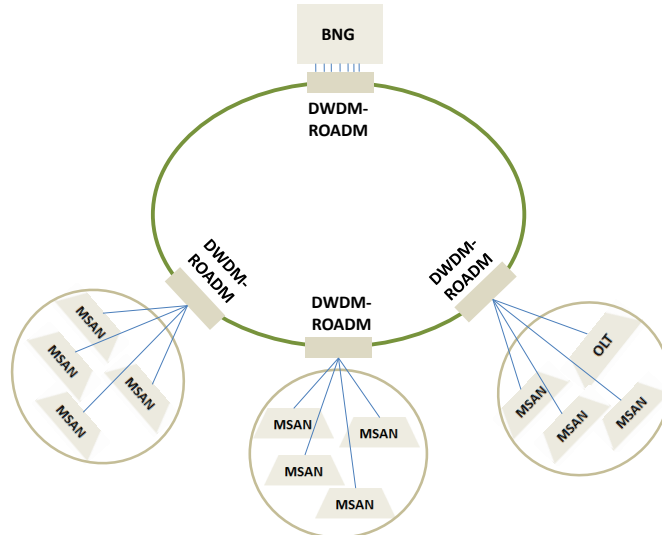
- (1) Mehrwegeführung im Ring oder in vermaschten Netzen und angepasste Dimensionierung der bereitgestellten Übertragungswege
- (2) Redundanzen in der Bereitstellung technischer Einrichtungen sowohl der logischen als auch der physikalischen Schicht (z.B. Doppelung von Systemen (Plug-in-Units) und zugehörigen 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 der höheren Ebene.

Eine Mehrwegeführung wird im Modell grundsätzlich berücksichtigt. Diese wird dabei über die physikalischen Topologie realisiert (physikalische Netz"struktur"), siehe hierzu auch Abschnitt 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.⁵⁸

⁵⁷ Eine Darstellung zur Modellierung der Sprachzusammenschaltungsverkehre findet sich in der Anlage 1 [WIK-16c].

⁵⁸ Siehe hierzu auch Abbildung 5-2, anhand der die physikalische Realisierung einer logischen Sternstruktur durch eine Ringtopologie illustriert wird.

Abbildung 4-8: Ring als Grundform der Mehrwegeführung am Beispiel des 2-Ebenen Konzentrationsnetzes

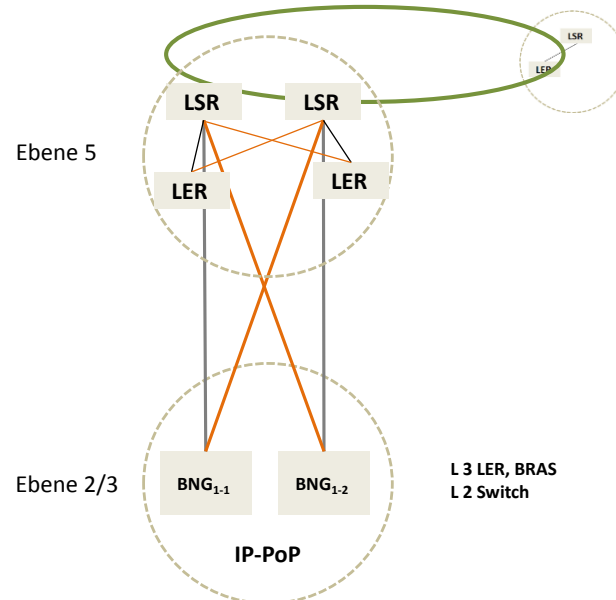


Neben der standardmäßig vorgehaltenen 2-Wege-Führung wird im Modell ein Steuerungsparameter für die im Ring vorgehaltene Kapazität bereitgestellt (ring protection). Diese kann den Wert 50% oder 100% annehmen. Bei 50% kann im Falle einer Ringunterbrechung lediglich 50% des Verkehrs geführt werden, bei 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 wird.

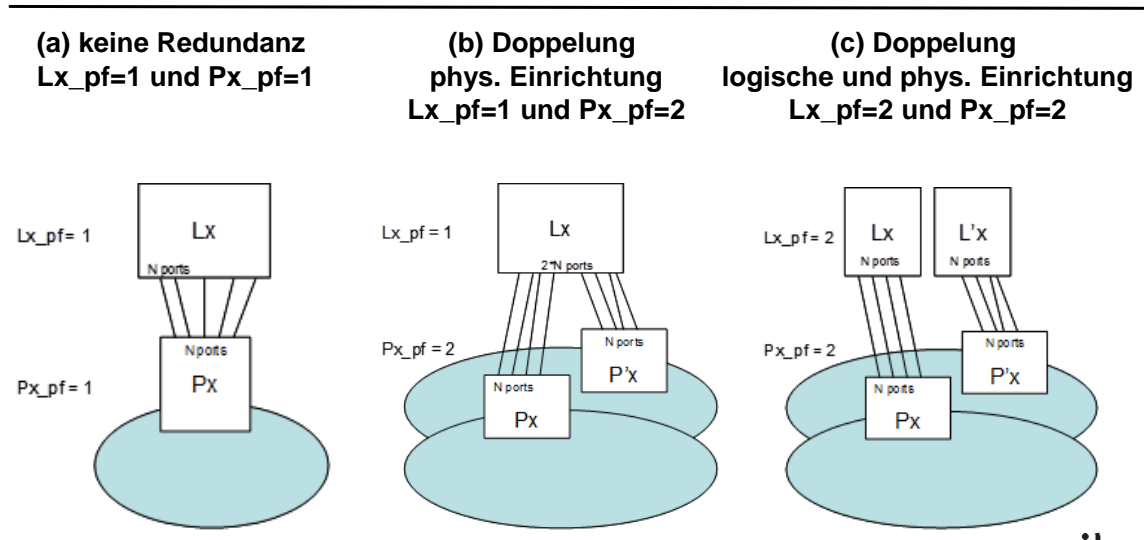
Die Bereitstellung von Redundanzen bei technischen Einrichtungen stellt eine weitere Absicherungsstrategie dar. Die Doppelung von logischen Einrichtungen im 2-Ebenen-Kernnetz auf Ebene 3 und 5 wird anhand der nachfolgenden Abbildung 4-9 illustriert. Die entsprechende einfache Ausführung der logischen Systeme findet sich in Abbildung 4-6.

Abbildung 4-9: Doppelung von logischen Einrichtungen im 2-Ebenen-Kernnetz auf Ebene 3 und 5



Ebenso können Redundanzen auf Ebene der technischen Einrichtungen des physikalischen Netzes vorgesehen werden. In der nachfolgenden Abbildung 4-10 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 (siehe Anhang 7.5.1).

Abbildung 4-10: Doppelung von technischen Einrichtungen des physikalischen Netzes (Px)



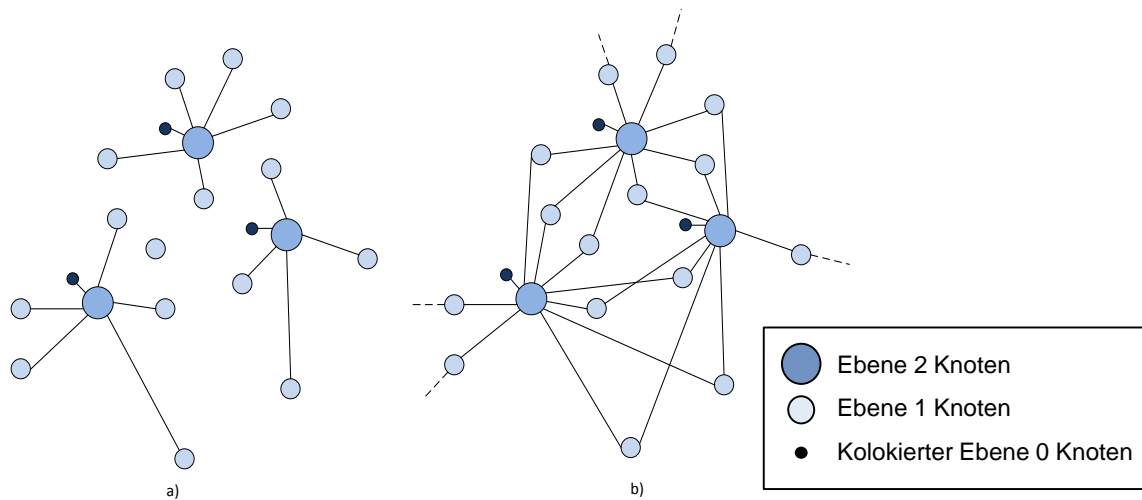
Aufgrund der Vielzahl von Absicherungsmöglichkeiten und den damit verbundenen Kombinationen ist im Modell lediglich eine Auswahl der möglichen Absicherungsformen der technischen Einrichtungen des logischen und physikalischen Netzes vorgesehen. Grundsätzlich werden die Auswahlmöglichkeiten zur Absicherung umso umfangreicher, je höher in den Netzebenen man sich befindet, um die Auswirkungen einzelner Fehler in auf die Menge betroffener Teilnehmer (Störwirkbreite) oder gar die Auswirkungen einer Kombination von gleichzeitig auftretenden Fehlern gering zu halten. Die im Modell implementierten Varianten für das physikalische Netz sind dabei in Abbildung 4-10 dargestellt. Die Absicherung der Einrichtungen des logischen Netzes wird in Zusammenhang mit dem nachfolgend darzustellenden Aspekt der Standortabsicherung dargestellt.⁵⁹

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 (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

⁵⁹ Eine ausschließliche Doppelung von technischen Einrichtungen des logischen Netzes (ohne Doppelung der entsprechenden Einrichtungen des physikalischen Netzes, wie in Abbildung 4-9 dargestellt) ist im Modell nicht vorgehalten.

nachfolgende Abbildung illustriert sowohl die Einfachanbindung (a) single assignment) als auch die Doppelanbindung (b) double assignment).

Abbildung 4-11: Standortabsicherung: Clusterbildung bei Einfach- (a) und Doppelanbindung (b)



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 4-9 dargestellt ist). In der nachfolgenden Tabelle zeigen wir für ein Beispiel-Szenario, welche Auswirkungen diese Redundanzen mit Blick auf Einrichtungen und Standorte auf die Verkehrsanteile und damit letztlich auf die Auslastung der Einrichtungen haben.

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

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 für die obere Netzebene vorgesehen. Die Berücksichtigung der Standortabsicherung (Wahl zwischen Einfach- und Doppelanbindung) erfolgt parametergesteuert (siehe Anhang 7.4.2) 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).

Aus der Vielzahl von Funktionen zur Absicherung, die im Modell einen großen Umfang eingenommen hatten, haben wir im Hinblick auf die Marktrelevanz bzw. den Stand der Technik im vorliegenden Release eine Beschränkung auf die wesentlichen Funktionen durchgeführt: Eine Dopplung logischer Systeme ist nur für die obere Ebene der Kernnetzstandorte möglich. Alle physischen Verbindungen werden zumindest im Ring geführt. Eine Doppelabstützung ist nur für das Kernnetz in der Anbindung der unteren an die obere Netzebene wählbar. Für diesen Fall kann auch eine Dopplung der Ringe und eine 50%ige oder 100%ige Führung der Kapazität im Fehlerfall ausgewählt werden. Für das Konzentrationsnetz ist generell eine 100%ige Führung der Kapazität im Fehlerfall im gesamten Ring vorgesehen.

4.4 Netzdimensionierung

Nach Festlegung der Hierarchie sowohl für das Konzentrationsnetz als auch für das Kernnetz und der Berechnung der Verkehrswerte aus der in den MPoP aggregierten Verkehrsnachfrage (gehend und ankommend) sind die Verkehrsnachfragen entsprechend ihres Ursprungs und ihrer Ziele zu führen. Nach Abschluss der Verkehrsführung 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 Verbindungen⁶⁰ berechnet werden. Siehe hierzu auch die Darstellung in den Anhängen 1 und 2.

⁶⁰ Dies können, wie im fünften Kapitel dargestellt, je nach verwendeter Netzarchitektur traditionelle VCn n=1,3,4 für das SDH/SONET, optische Signale für das optische Transportnetz OTN (ODUx x=1,2,3) bzw. direkte photonische Signale in Form von Wellenlängen (λ) auf der Basis von 10Gbps bzw. 40Gbps sein.

4.4.1 Dimensionierung und QoS-Realisierungsform

Die Verkehrsführung wird i.d.R. auf dem kürzesten Weg in der logischen Netzstruktur erfolgen, um die Anzahl der Zwischenknoten und damit auch die Anzahl der Schnittstellen in den LSR zu minimieren.⁶¹ Diese 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.⁶²

- 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.⁶³
- 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.

⁶¹ Im wahlweisen Fall von paritätischer Mehrwegeführung in der logischen Netzebene sind die zwei knotendisjunkten Wege mit minimaler Anzahl von Zwischenknoten zu berechnen. Entsprechende Algorithmen sind aus der Literatur seit Längerem bekannt, für eine Übersicht vgl. [Hackbarth-82]

⁶² 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. 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.

⁶³ 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].

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, die in diesem Netz realisiert werden, richtet. Zu diesem Zweck wurde in Abschnitt 3 die Verkehrsnachfrage bestimmt sowie in Abschnitt 3.5 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 ausgehen, um die Netzkapazitäten festlegen zu können. Eine angegebene Busy Hour Nachfrage eines Netzbetreibers kann daher immer nur einen statistisch ermittelten Wert reflektieren. In Abhängigkeit der Schwankungen der Nachfrage in der Spitzenlast des Netzes kann es daher angezeigt sein, zusätzliche (Reserve-)Kapazitäten vorzuhalten, die eine Überlast vermeiden 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 (siehe die Ebenen spezifischen Inputparameter [gmuf()] im Anhang 7.4.2).

Wie im ersten Absatz geschildert, bilden die aus der Verkehrsnachfrage abgeleiteten Verkehrsmatrizen mit den Werten der mittleren Bandbreite die Grundlage für die Netzdimensionierung. Sofern diese Nachfragen differenziert nach Verkehrsklassen vorliegen, können ihre Anforderungen bei der Netzdimensionierung Berücksichtigung finden. Ob dienstspezifische QoS-Anforderungen eingehalten werden können, hängt – wie bereits erwähnt – letztlich von charakteristischen Parameterwerten der Verkehrsnachfrage ab (siehe hierzu die Mean EndToEnd delay in [ms] in Anhang 3). 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 Bandbreitenwerte 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]. Eine ausführliche Darstellung der Zusammenhänge von QoS-Anforderungen und sog. mark-up Faktoren zur Bestimmung der äquivalenten Bandbreite findet sich in Anhang 3.

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 Prozessorkapazität beanspruchen.

Nachfolgend werden die Möglichkeiten der Anwendung von mark-up Faktoren (Zuschlagfaktoren) zur Dimensionierung sowohl von Knoten als auch Kanten erläutert. (Die methodische Begründung für ein Anwenden dieser Zuschlagfaktoren findet sich in Anhang 3). Im Anschluss 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 und den mittleren Paketverlust 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.⁶⁴ Dabei werden die mark-up Faktoren auf Basis der zulässigen Verzögerungszeit und Paketlänge modellendogen ermittelt. Die nachfolgende Tabelle zeigt Beispiele für die Werte sowie die Zuordnung von Diensten zu den QoS-Klassen auf der Basis einer definierten Zahl von Verkehrsklassen (k_n).

⁶⁴ Siehe u.a. [Rendon-09].

Tabelle 4-5: 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	1,65
Interner Verkehr aus OAM und Signalisierung ⁶⁶							
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.⁶⁷

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.⁶⁸ Beispielhafte Werte sind in Tabelle 4-5 in der zweiten Zeile beschrieben. Bei einer entsprechenden Zuordnung kann gezeigt werden, dass Dienste mit zeitkritischen QoS-Parametern und limitiertem Paketverlust höhere mark-up Faktoren erfordern als „Massenkonsumdienste“.⁶⁹

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 unter Rückgriff auf

⁶⁵ 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.

⁶⁶ 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.

⁶⁷ Aus internen Quellen eines großen europäischen Netzbetreibers wird über die Anwendung von bis zu vier Verkehrsklassen berichtet.

⁶⁸ Aus den bisherigen Untersuchungen ergibt sich, dass der mark-up Faktor mit steigenden Werten der aggregierten Bandbreite abnimmt und im Grenzfall gegen eins konvergiert.

⁶⁹ Argumente für die Anwendbarkeit von M/M/1-Modellen werden in der Auswertung der Stellungnahmen zum Referenzdokument Breitbandnetz, Kommentaraufforderung 4-12, aufgeführt [WIK-10a.]

die Verkehrsklassen die jeweilige zulässige Laufzeitverzögerung festzulegen (Inputparameter, siehe Anhang 7.2). Auf diese Weise wird den tatsächlichen Gegebenheiten mit Blick auf die Verkehrsverteilung Rechnung getragen.

Dazu kann im Modell für jede Dienstekategorie die Aufteilung 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.⁷⁰

Nach Bestimmung der äquivalenten Bandbreite für jede Verkehrsklasse wird die gesamte Bandbreite, die eine logische Verbindung vom physikalischen Netz anfordert, durch einfache Summation 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.⁷¹ Es soll auf diese Weise eine Obergrenze in der Auslastung implementiert werden.

Einen Einfluss auf die Wahl des konkreten Parameterwertes hat letztlich auch die für das Netz zugrunde 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 Paketebene⁷². 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

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

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

72 Im BA-ISDN unter ATM wurden dazu eine „Connection-Admission-Control- (CAC) und eine User-Parameter-Control-Funktion(UPC) definiert, vgl. [Händel-98].

den Nutzern implementierte TCP steuert⁷³ 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, der in den Modellrechnungen mit den dienstespezifischen mark-up Faktoren abgeglichen und entsprechend ausgelegt wird. Bisherige Erfahrungswerte haben gezeigt, dass die von Netzbetreibern erhobenen globalen Mark-up Faktoren im Modell für die Netzdimensionierung bestimmend sind. Diese Feststellung konnte auch dann aufrechterhalten werden, wenn die Anforderungen an die tolerierbaren Verzögerungszeiten merklich erhöht wurden.

Knoten

Für eine Dimensionierung der Knoten wäre – dem Kostentreiber folgend – die Berücksichtigung der Paketzahl zugrunde 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 nach folgender Formel:

$$\alpha_k = BW_k / (L_k * 8)$$

mit

α_k mittlerer Paketstrom für eine Verbindung in der Dienstkategorie k [kp/s]

BW_k mittlere Bandbreite für eine Verbindung in der Dienstkategorie k [kbps]

L_k mittlere Paketlänge in der Dienstkategorie k [oktets]

Die mittlere Paketlänge je Dienstekategorie ist ein Eingabeparameter und ist auf der Basis der Schicht 2 des OSI-Modells anzugeben, im Anhang zeigt Tabelle A 4-2 ein Beispiel für VoIP-Dienste. Der totale Paketstrom für jede Dienstkategorie ergibt sich dann aus dem mittleren Paketstrom für eine Verbindung multipliziert mit dem totalen Verkehrswert.

⁷³ 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.

$\lambda_k = \alpha_k * A_k$ mit

λ_k mittlerer Paketstrom je Dienstekategorie

α_k mittlerer Paketstrom für eine Verbindung in der Dienstekategorie k

A_k gesamter abgewickelter Verkehr in der Busy Hour für Dienstekategorie k

Auch bei der Routerdimensionierung ist zu beachten, dass entsprechende Prozessoren nicht unter Volllast betrieben werden dürfen und 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 (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

Wie schon im letzten Kapitel beschrieben, teilt sich die Transportschicht in Telekommunikationsnetzen in eine logische- und eine physikalische Netzschicht.

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 2.4.1). 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 Einrichtungen⁷⁴
- 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

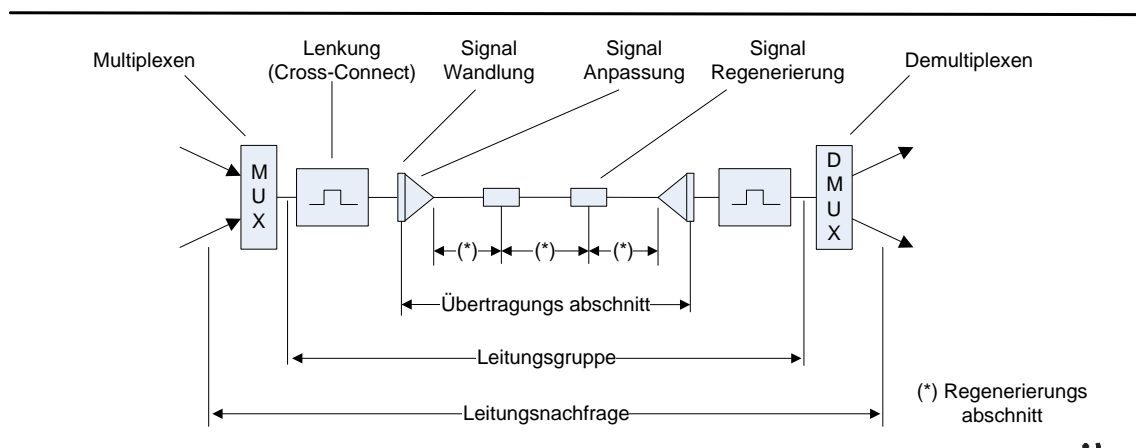
⁷⁴ Im Prinzip ist eine Cross-Connector-Einrichtung ein Switch auf elektrischer bzw. optischer Basis. Im Unterschied zur klassischen Vermittlungsstelle bzw. einem Ethernetswitch oder einem IP Router werden die Einstellungen in den Cross-Connector-Einrichtungen durch den Betreiber mittels seines Netzverwaltungsplanes in der Regel für längere Zeiträume vorgenommen, während die Vermittlung von Leitungen, Ethernet Rahmen oder IP Paketen in Echtzeit verläuft und entsprechende Verbindungen durch Netzsignalisierung vorgenommen werden.

Darüber hinaus sind Funktionen der Bereitstellung, Überwachung und Sicherung der Transportkapazitäten⁷⁵ 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 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.

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 ausführlich betrachtet werden.

⁷⁵ 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.

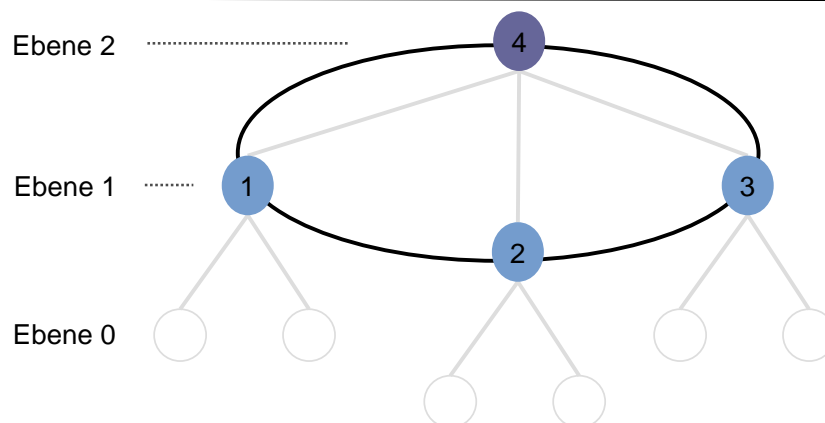
Tabelle 5-1: Entwicklung der Übertragungssysteme

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 5.1.4)	elektr.	elektr./optisch	elektr.-optisch	optisch
GFP über OTN (Abschnitt 5.1.5)	elektr.	elektr./optisch	elektr.-optisch	optisch
Optisches Wellenlängen multiplexen über DWDM (Abschnitt 5.1.6)	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. Dem 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 wenigstens zwei unabhängige Wege bereitstellen, was wenigstens eine Ringtopologie impliziert.

Daraus folgt, dass die Leitungsnachfragen, die die Struktur der logischen Netzschicht bestimmen, auf die Topologie der physikalischen Netzschicht abzubilden sind. Abbildung 5-2 zeigt als Beispiel die Abbildung der Sternstruktur 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 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, so dass in dieser der aktuellen Entwicklung angepassten Modellversion 2.3 auf SDH bzw. NG-SDH als Transporttechnologie verzichtet wird. Für die physikalische Ebene des Konzentrationsnetzes wird im neuen Modellrelease auf die Wahl zwischen NG-SDH und DWDM verzichtet, sondern nur noch DWDM eingesetzt. Dies bedeutet nicht, dass das Modell keine SDH-Mietleitungen mehr unterstützt. Dieser Dienst ist nach wie vor modellierbar.

Für die Transportschicht des Kernnetzes wird ebenfalls auf eine Technologieauswahl verzichtet und ausschließlich OTN verwendet. Nur diese Technik unterstützt den hohen Konzentrationsgrad effizient, der für das Kernnetz unterstellt wird.

Die Entwicklung der Dienstenachfragen vor allem aus Internet- und Multimediadiensten hat zu einer Weiterentwicklung des Transportnetzes geführt, die in diesem Kapitel ausgehend vom physikalischem Netz und dessen Beziehungen zum logischen Netz betrachtet wird. Dazu wird im ersten Abschnitt dieses Kapitels die Entwicklung des physikalischen Netzes in Korrelation mit der Entwicklung des logischen Netzes betrachtet und im zweiten Abschnitt werden die Konsequenzen für das Kostenmodell Breitbandnetz dargestellt. Im dritten Kapitel 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. SDH/SONET bleibt zwar für Layer 1 Mietleitungen als Technik relevant, die im Modell zur Anwendung kommen kann, für den Einsatz auf der Transportebene des Konzentrations- und Kernnetzes ist es jedoch veraltet.

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 vertieft diesen Aspekt unter dem Einfluss der Entwicklungen in der logischen Transportschicht sowohl für das Konzentrationsnetz auf der Basis von Ethernet als auch für das Kernnetz auf der Basis von IP.

Der vierte Unterabschnitt beschreibt die Entwicklung des Next Generation SDH/SONET (NG SDH), die durch die zunehmenden Anforderungen nach paketorientiertem Transport auf Ethernet erforderlich wurde. Auch hier gilt das zuvor gesagte. Das Modell berücksichtigt NG/SDH für Layer 1 Mietleitungen, aber nicht mehr für die Transportebenen im Netz.

Der fünfte Unterabschnitt beschreibt die Ergänzung bzw. Substitution des SDH/SONET-Konzeptes in Form eines standardisierten optischen Transportnetzes (OTN). Diese Technologie bekommt zunehmend eine Bedeutung aufgrund der hohen Kapazitäten, die es für viele Verbindungen zu transportieren erlaubt.

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 und es ist nur noch eine Glasfaserinfrastruktur neben den logischen Systemen erforderlich.⁷⁶

Der letzte Unterabschnitt gibt einen Ausblick auf Erweiterungen des Netzzugangs im Konzentrationsnetz.

5.1.1 SDH/SONET

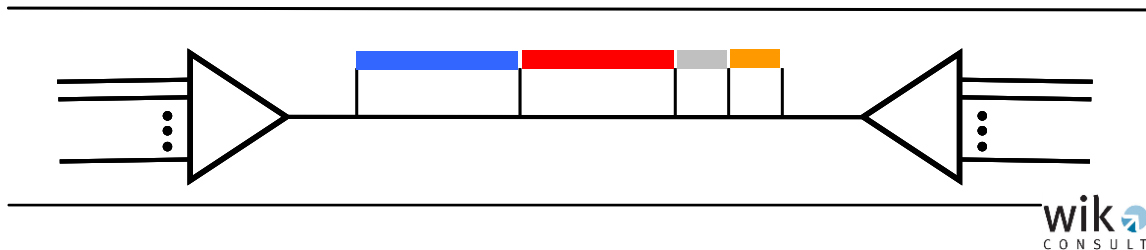
Der physikalische Teil eines Telekommunikationsnetzes hat die Aufgabe, die Kapazitäten, die aus der logischen Netzschicht resultieren, mittels entsprechender Übertragungssysteme und Medien zu übertragen. Dabei sind Glasfaserkabel auf der Basis von Monomode-Fasern das wichtigste Medium in Weitverkehrsnetzen. Alle großen Netzbetreiber haben traditionell als Übertragungssystem Einrichtungen aus dem SDH/SONET-Standard⁷⁷ implementiert. Dieser Standard erlaubt es, die unterschiedlichen Bandbreitenanforderungen (Leitungsnachfragen) aus den verschiedenen logischen Netzen (bisher z.B.: PSTN/ISDN, IP, ATM) zu integrieren. Dazu werden die aus den logischen Netzen resultierenden Digitalsignale unterschiedlich großer fester Kapazität, E1, E3, E4, ..., in Form von virtuellen Containern (VC-n, n=1,3,4) zusammengefasst und in einem Rahmen eingeschlossen. –

⁷⁶ Diese kann bei Bedarf durch eine DWDM Funktion ergänzt werden.

⁷⁷ SONET ist der ANSI-Standard, der in den USA angewendet wird, während SDH der entsprechende ITU-Standard ist, der in Europa zur Anwendung kommt. Durch SDH/SONET wird die Integration sowohl der europäischen Digitalsignale (E1,E3,E4) als auch der amerikanischen Signale (DS1,DS2,DS3) in einem einheitlichem Standard erreicht, vgl. [Wilde-99].

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]. Der ITU-Standard hat dazu die Rahmen STM-n (n=1, 4, 16, 64, 256) definiert. 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.

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

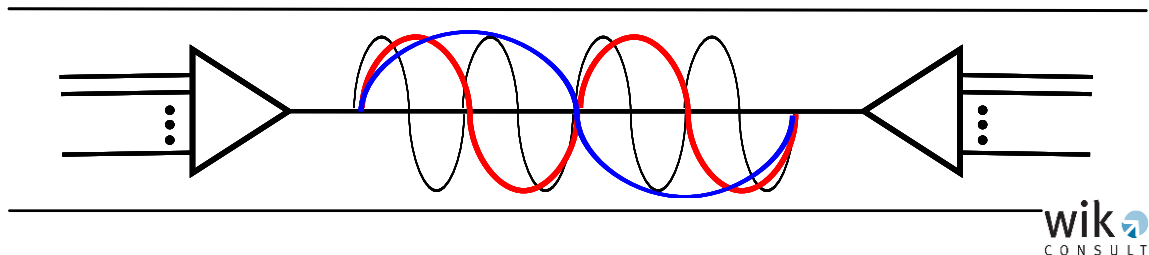
VC-Type	VC BW [Mbps]	VC Nutzlast [Mbps]	STM-n Typ
VC-4	150,336	149,760	STM-1
VC-4-4c	601,344	599,04	STM-4
VC-4-16c	2405,376	2396,160	STM-16
VC-4-64c	96221,504	9584,640	STM-64
VC-4-256c	38486,016	38338,560	STM-256

Auf der Basis des SDH/SONET-Standards wurden entsprechende Multiplexer-, Cross-connector- und Übertragungssysteme entwickelt, mit denen der Transport der aus den logischen Netzen resultierenden Bandbreitenanforderungen abgewickelt wird. Diese Einrichtungen wurden auch im Analytischen Kostenmodell für das nationale Verbindungsnetz berücksichtigt, vgl. [WIK-02].⁷⁸

⁷⁸ Die wichtigsten Einrichtungen sind Add and Drop Multiplexer, die es gestatten, E1, E3 und E4 Signale aus einem optischen STM-4 bzw. STM-16 Signal einzufügen bzw. herauszunehmen und elektrische Crossconnector-Einrichtungen (DXC), die es gestatten dieselben Signale in großem Maßstab ein- bzw. auszukoppeln bzw. im Transit zu switchen. DXC werden vor allem in der vermaschten Kernnetzebene und ADM in der Access- und Aggregation Netzebene in Form von Ringtopologien eingesetzt, vgl. [Wilde-99].

Mit steigender Verkehrsnachfrage – vor allem aus dem best effort Internet – stoßen die Kapazitäten der SDH/SONET-basierten physikalischen Transportplattform und die entsprechende Glasfaser-Infrastruktur an ihre Grenzen. In einem ersten Schritt wurden mittels optischer Multiplexer (WDM/DWDM) die Kapazitäten der Glasfasern vergrößert und es wurde gezeigt, dass für Verbindungen oberhalb von 200 km das optische Multiplexen von 4xOC48⁷⁹ zu einem optischen Signal von OC-192 wirtschaftlicher ist, als die entsprechende elektrische Verkettung, vgl. [Coltro-97]. Die nachfolgende Abbildung illustriert das optische Multiplexen.

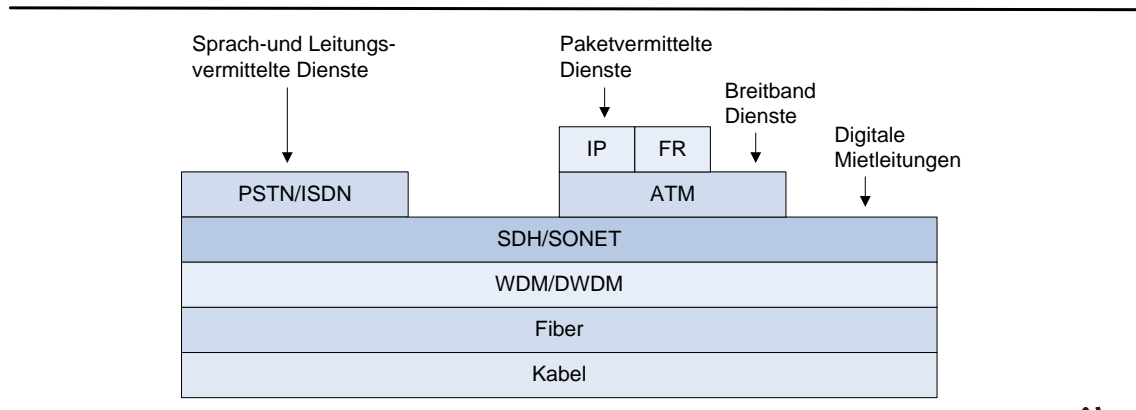
Abbildung 5-4: Optisches Multiplexen (Frequenzmultiplex)



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 5-5 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.

⁷⁹ OC-x ist die SONET-Bezeichnung im SDH/SONET-Standard, wobei einem STM-n Signal ein OC-x Signal mit $x=3*n$ entspricht.

Abbildung 5-5: 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 Alarmer, 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).⁸⁰ 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

⁸⁰ 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].

werden.⁸¹ Daraus folgt eine strikte Trennung der Netzverfügbarkeit im logischen und physikalischen 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 Weiterentwicklungen des SDH/SONET-Modells

Das traditionelle SDH/SONET-Modell wurde sowohl durch Anforderungen aus den oberen logischen Netzen als auch auf der darunter liegenden optischen Ebene erweitert. Ersteres ergab sich dies durch die Einführung des MPLS-Protokolls in der logischen Ebene von IP-Netzen und dessen Erweiterung durch das verallgemeinerte MPLS-Protokoll (GMPLS⁸²), aber auch aus der zunehmenden Integration von Ethernet-Datenströmen – vor allem für Layer2-VPN (L2VPN). D.h., es waren neben leitungsvermittelnden Nachfragen auch vermehrt paketvermittelnde Nachfragen im physikalischen Netz zu realisieren.

Die Erweiterung auf der optischen Ebene wird durch die zunehmenden Bandbreitenanforderungen erforderlich und durch die entsprechenden systematischen Arbeiten der ITU zur optischen Erweiterung des SDH/SONET mittels OTN spezifiziert. Damit sind aus Sicht der Standardisierung drei verschiedene Standardisierungs-Institutionen involviert, die im Folgenden betrachtet werden, vgl. Tabelle 5-3 für eine Übersicht.

81 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 jedem 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.

82 Bei MPLS ist nur ein Objekt zum Switchen definiert (IP-Pakete oder Ethernet-Rahmen d.h. Pakete aus der dritten OSI Schicht bzw. Rahmen aus der zweiten OSI Schicht). Bei GMPLS können verschiedene Objekte sowohl Pakete oder Rahmen auf der dritten bzw. zweiten OSI-Schicht wie bei MPLS aber auch Objekte aus den physikalischen Unterschichten wie VC für SDH/SONET, photonische Signale λ bzw. Glasfasern verwaltet werden, vgl. [Mannie-04].

Tabelle 5-3: Standardisierungs-Institutionen zur Erweiterung der physikalischen Transport-Plattform im NGN

Bezeichnung	Netzschiicht	Institution	Arbeitsgruppe	Standard	Letzte Version (Stand 2010)
MPLS/GMPLS	2-3	IETF	Network Working Group	RFC3945	Okt. 2004
40/100Gb Ethernet	1-2	IEEE	Higher Speed Study Group	IEEE.803ba	2010
OTN	1	ITU	SG15	G.709	März 2003
ASON	1-3	ITU	SG15	G.8080	Juni 2008

5.1.3 Entwicklungen in der logischen Netzschiicht (IP als auch Ethernet) und deren Einfluss auf die Entwicklung der physikalischen Plattform

Die Arbeiten der IETF zur Integration von IP in NGN wurden zunächst durch das MPLS-Protokoll beeinflusst, welches einen verbindungsorientierten Transport der IP-Pakete ermöglicht und im Zusammenhang mit anderen Protokollen (DiffServ, RSVP/IntServ) eine Differenzierung der IP-Ströme unter anderem nach Qualitätsklassen erlaubt und damit den bisherigen „best effort“-Transport erweitert. Dieses Protokoll wurde verallgemeinert, um eine Führung von optischen Signalen 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 (ASON⁸³) anzupassen, für eine Übersicht siehe [Tomic-04].

Im Weiteren wird gezeigt, dass der Transport von IP/MPLS auf einer SDH/SONET-Infrastruktur die klassische Trennung von logischer Schicht und von der physikalischen Schicht mit deren hohen Zuverlässigkeitsstandard beibehält.

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 (LAN, MAN, WAN) eingesetzt wird. Dazu wurden die Bandbreiten und die Leistungsfähigkeit systematisch erhöht, und zwar in Zehnerschritten bis hin zu 100Gb Ethernet (im Gegensatz zu den Viererschritten der

⁸³ 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.

SDH- und OTN-Hierarchie). Die Arbeiten der IEEE HSSG, die sich mit der Definition von 40/100Gb-Ethernet beschäftigten, sind abgeschlossen, vgl. Tabelle 5-3. Eine Übersicht zu der Entwicklung von Ethernet-Standards bis hin zum 100Gb-Ethernet und deren möglichen Einsatzfelder findet sich bei [VDE-08], [Rizvi-09].

Wenngleich der Einsatz von Ethernet in der Vergangenheit schwerpunktmäßig im Bereich von Business-Anwendungen und im Campus- und WAN-Bereich von Universitäts- und Wissenschaftsnetzen lag, wird nunmehr vor allem Gigabit- und 100Gb-Ethernet zunehmend auch von Netzbetreibern – vor allem im Bereich der Konzentrationsnetze zur Verkehrs-Aggregation und als Metro-Switch – eingesetzt, vgl. [Fang-08]. Dazu wurden vom Metro Ethernet Forum (MEF) „Carrier-Grade-Dienste“ definiert (vgl. [cienna-09], [Juniper-09]) und entsprechende Schnittstellen zum SDH- sowie OTN-Transportnetz in Zusammenarbeit mit der ITU entworfen. Derzeit arbeitet das MEF in Richtung eines Globalen Nationalen Carrier Grade Ethernets, vgl. [VDE-08], und untersucht die Ausweitung von Ethernet auch in den Kernnetzbereich. Die Standardisierung von 40- bzw. 100 Mbps Schnittstellen ist mittlerweile abgeschlossen. Das Modell berücksichtigt in seiner Ausgangsparametrisierung bereits Einrichtungen mit Ports aus diesen Schnittstellen.

Die Anwendung von Ethernet in öffentlichen Netzen wird auf der Basis des sog. „Carrier Grade Ethernet“ vorgenommen, 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, vgl. [Fujitsu-08] und Tabelle 5-4, die diese Entwicklung schematisch darstellt.

Um die „Carrier Grade“-Leistungsmerkmale zu erfüllen, kann entweder MPLS/Ethernet oder der Standard 802.1Qay, auch als „Provider Backbone Bridges Traffic Engineered“ (PBB-TE) bezeichnet, eingesetzt werden. Beide Methoden gestatten es, Ethernet verbindungsorientiert einzusetzen und eine Infrastruktur bereitzustellen, die in Kombination mit Reconfigurable Optical Add and Drop Multiplexer Einrichtungen (ROADM)⁸⁴ mit den Merkmalen von SDH/SONET vergleichbar ist und damit SDH/SONET ersetzen kann, vgl. [Juniper-09]. In den Jahren 2010 und 2011 wurde zudem die Standardisierung von MPLS-TP weitestgehend abgeschlossen,⁸⁵ das die schnellen Ersatzschaltungen 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.

Nach Aussagen einer Studie ergeben sich für MPLS/Ethernet höhere Kosten sowohl im CAPEX als auch OPEX Bereich gegenüber PBB-TE, vgl. [NSP-09]. Auf der anderen Seite wird in [Juniper-09] die Kostenreduktion von CAPEX und OPEX unter MPLS/Ethernet hervorgehoben. Aus Sicht der Kontrollschicht wird mit MPLS/Ethernet eine Architektur verwendet, die mit der des Kernnetzes identisch ist und damit eine

⁸⁴ Vgl. Abschnitt 5.2 .

⁸⁵ Vgl. IETF RFC 5921, RFC 6372, RFC 6373, RFC 6378

Integration der Netz- und Kapazitätsverwaltung beider Netzbereiche begünstigt. PBB-TE verwendet in der Kontrollschicht als Industriestandard „Ethernet Traffic Engineering and Ressourcenmanagement E-Term“, und damit eine vom Kernnetz unterschiedliche Kontrollschicht.

Welche der Ethernet-Technologien von einem Betreiber tatsächlich eingesetzt wird, hängt neben der CAPEX- und OPEX-Optimierung von einer Vielzahl von technischen und betrieblichen Aspekten ab, vgl. [Fang-08].⁸⁶

Im Netz, dass in diesem Modellrelease Berücksichtigung findet, hat das Ethernet-Protokoll nur eine eher untergeordnete Rolle zum Transport der Daten zwischen den Knoten der Ebenen 0 und 2.

Tabelle 5-4: Entwicklung des Ethernet zum „Carrier Ethernet“

Standard	Adressverwaltung	Skalierung	Ersatzschaltung	QoS	Traffic-Eng.	OAM	Kurzbezeichnung
802.1	X	x	x	x	x	x	
802.1Q	X	x	x	x	x	x	Virt. LAN
802.1ad	X	(x)	x	x	x	x	Q in Q
802.1ah			x	x	x	x	PBB
802.1Qay			1)	x	1)	2)	1) mittels traffic engineering and resource management 2) mittels 802.1ag&Y.1731

5.1.4 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 5-5 zusammengefasst dargestellt sind. Für eine ausführliche Übersicht vgl. [Caballero-04].

⁸⁶ PBB-TE hat in seiner Standardisierung durch die Insolvenz von Northern Telecom einen wesentlichen Förderer verloren, so dass das sich erst später entwickelnde MPLS-TP nun den Stand der Technik darstellt.

Tabelle 5-5: 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 5-6. Damit wird eine Erweiterung des traditionellen SDH/SONET erreicht, das nun eine kontinuierliche Verkettung, auf Englisch „contiguous concatenation (cc)“, gestattet. Tabelle 5-6 zeigt die Verbesserung in der Kapazitätsausnutzung von NG-SDH gegenüber dem traditionellen SDH/SONET bei Vollaustattung der Ethernet-Verbindungen.⁸⁷

Tabelle 5-6: Vergleich der Kapazitätsausnutzung zwischen NG-SDH (vc) und SDH/SONET (cc)

Transport Dienst	Bitrate [Mbps]	VC unter cc	Ausnutzung [%]	VC unter vc	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

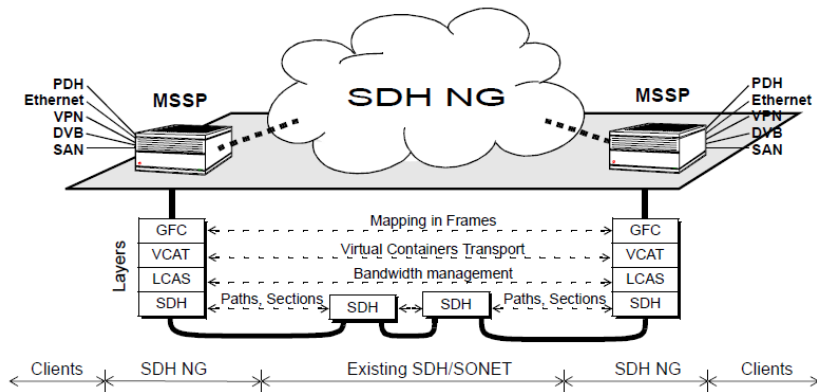
Optional besteht im NG-SDH die Möglichkeit, Kapazitäten mittels des Link Capacity Adjustment Scheme (LCAS) dynamisch zu verändern (zuzuweisen bzw. freizuschalten), womit Datendienste mit variabler Bandbreite optimal in das NG-SDH eingefügt werden können (vgl. Abbildung 5-6).

Der große Vorteil von NG SDH liegt darin, dass entsprechende Einrichtungen,⁸⁸ 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 5-6.

⁸⁷ 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.

⁸⁸ Diese Einrichtungen werden in der Literatur als MultiService Switch Plattform (MSSP) oder aber auch als MultiService Provision Plattform (MSPP) bezeichnet, vgl. [Caballero-04].

Abbildung 5-6: Protokolle des NG-SDH und deren Realisierung in Form von MultiService Switch Plattform (MSSP)-Einrichtungen



Quelle: [Caballero-04]

5.1.5 Optisches Transportnetz (OTN)

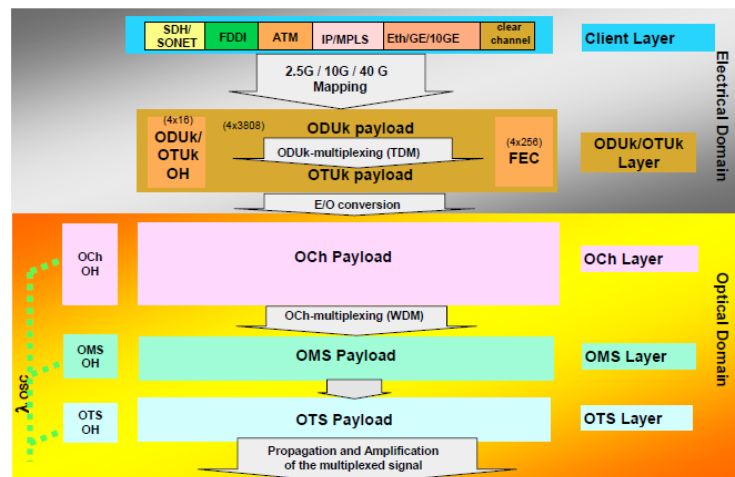
Wie bereits dargestellt, führten zunehmende Bandbreiten-Anforderungen – vor allem aus dem best effort Internet und von Business-Data-Anwendungen – zu der Notwendigkeit, die optische Ebene zu erweitern und ggf. kapazitätserweiternde optische Transportdienste schnell zur Verfügung zu stellen. Um die entsprechenden Übertragungssysteme zu normalisieren, wurden von der ITU entsprechende Empfehlungen entwickelt. 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].

Zusammenfassend ergibt sich, dass das OTN zunächst eine Erweiterung des SDH/SONET vor allem auf der optischen Ebene darstellt. Dazu werden nach der ITU Rec. G.709 elektrische „Client-Signale“ aufbereitet und in einen standardisierten Rahmen eingefügt. Neu ist, dass durch „Forward Error Correction“ Bitfehler, die bei der optischen Übertragung auftreten, am Ziel korrigiert – und damit größere Entfernungen ohne optisch-elektrische Regeneratoren überbrückt – werden können. Im Prinzip führt OTN SDH bzw. NG-SDH auf einer höheren Ebene und mit signifikant erweiterter Kapazität über viele parallele Wellenlängen fort.

Die OTN-Architektur beinhaltet sechs Schichten, drei elektrische und drei optische, vgl. Abbildung 5-7. Es 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 Kontrollschicht⁸⁹ 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 und 10Gb-Ethernet- und den neuen 40Gb/100Gb-Ethernet-Signalen durch die SG15 der ITU in Koordination mit der HSSG des IEEE (IEEE-802.3ba), vgl. [Ohara-09], [Winterling-09]. Diese Schnittstellen sind marktverfügbar. Das Modell berücksichtigt von daher die Ethernet-Schnittstellen 1Gbps, 10Gbps, 40 Gbps und 100 Gbps. Tabelle 5-7 zeigt die charakteristischen Daten entsprechender Einrichtungen.

⁸⁹ Die ITU sieht eine Klassifizierung in drei Netzschichten 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.

Tabelle 5-7: 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

Für die OAM-Funktionen werden sog. „Tandem Connection Monitoring“-Ebenen (TCM) festgelegt. Dabei wird eine Ende-zu-Ende-Bandbreitenanforderung⁹⁰ in Form einer Optischen Payload Unit als Nutzlast in die Rahmenstruktur „Optical Data Unit“ eingefügt und mittels des TCM-1 bzw. TCM-2 überwacht. TCM-3 wird auf der Ebene der Optical Transport Unit zwischen zwei benachbarten OXC eingesetzt, Abbildung 5-8 zeigt ein Beispiel für die OTN-Schichten in der Transportarchitektur und Abbildung 5-9 für die zugehörige TCM-Überwachung.

⁹⁰ Die Ende-zu-Ende-Bandbreitenanforderung ist im einfachsten Fall die Bandbreitenanforderung einer direkten Verbindung aus dem logischen Netz, kann aber auch eine netzübergreifende Bandbreitenanforderung aus einem Ende-zu-Ende-Nutzersignal eines Großkunden sein. Erstere definiert eine TCM-2 und letztere eine TCM-1.

Abbildung 5-8: Endpunkte der OTN-Schichten an einem Netzbeispiel

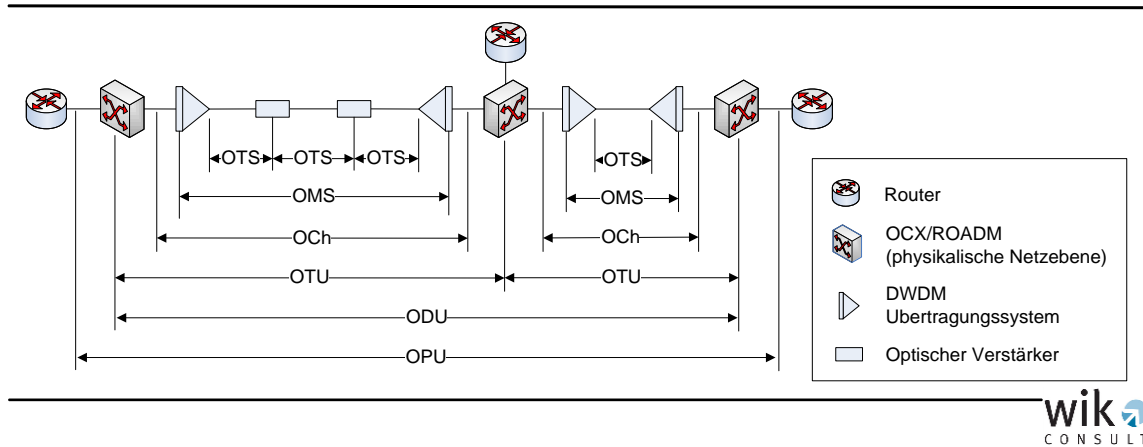
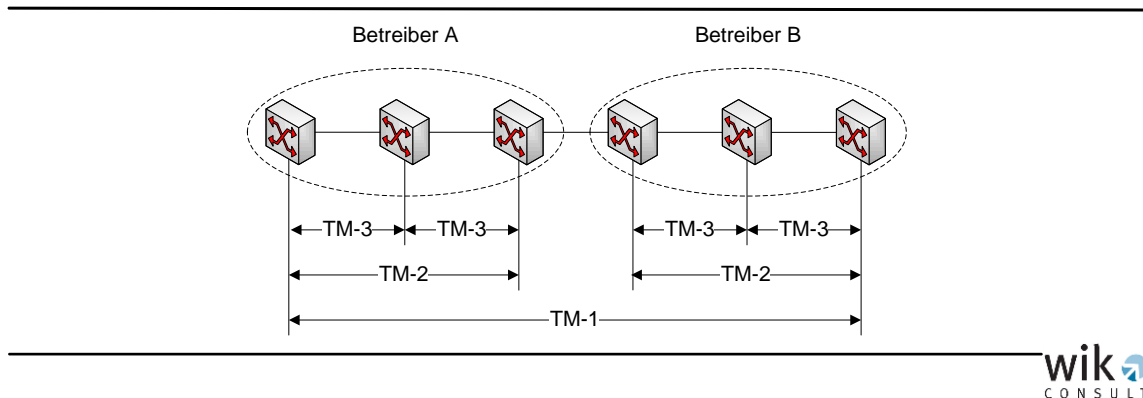


Abbildung 5-9: Abschnitte der TCM-Überwachung an einem Beispiel für eine Ende-zu-Ende-Verbindung über die Netze zweier Betreiber



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 Bandbreiten.

Die Nutzung von OTN-Einrichtungen im Kernnetz bringt aufgrund der Verbindungslänge und der benötigten Kapazität einen Kostenvorteil gegenüber traditioneller SDH/SONET-Technik, die insbesondere kapazitiv am Ende ihrer Leistungsfähigkeit ist und nur noch für bestehende Mietleitungen Verwendung findet, mit abnehmender Tendenz. Es wird daher OTN als die Technik der Wahl für das Kernnetz berücksichtigt.

Die Entwicklung neuer Telekommunikationssysteme wurde bereits in der Vergangenheit immer durch das Gesetz von der Wirtschaftlichkeit großer Mengen bestimmt. Ein solcher Kostenvorteil wurde zuerst von [Ellis-75] noch für analoge Übertragungssysteme auf der Basis von Frequenzmultiplex-Verfahren festgestellt. Dies wurde durch spätere Untersuchungen auch für SDH/SONET-Übertragungsein-

richtungen bestätigt, wobei eine Vervielfachung der Kapazitäten i.d.R. nur zu einer Doppelung der Kosten führte⁹¹.

5.1.6 Ethernet und IP over DWDM

Die Realisierung einer separierten physikalischen Transportschicht – sei es über NG-SDH/SONET in Kombination mit DWDM oder direkt über OTN – ist mit hohen Kosten verbunden. Von daher werden Lösungen entwickelt, 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].⁹²

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 5-10. 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 Verkehrslenkung 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

⁹¹ Daraus folgt, dass in erster Näherung die bandbreitenabhängigen Kosten eines Systems nicht linear, sondern nur mit der Quadratwurzel der Bandbreite steigen, was im Englischen als “economy of scale effect” beschrieben wird.

⁹² Weitere Einsparungen können vor allem für die Verkehre und zusätzlichen Bandbreiten erzielt werden, wenn diese nicht über Ethernet Switches, sondern nur über Ethernet Konzentratoren-Einrichtungen geführt werden. Dazu können kleinere Verkehrsströme am MPoP in einer sogenannten Ethernet Demarcation Unit [EDU] vorkonzentriert und im Metro-Switch-Standort mittels eines Ethernet Muxponders aggregiert werden, vgl. [Baldry-09], [Transmode-09], [Transmode-09a]. Allerdings ergeben sich für VLAN-Verkehre, die an Ethernet-Switch Standorten abzuleiten sind, u.U. hohe Leerkapazitäten, wenn die entsprechenden Verkehre die Kapazität eines 10Gps Virtual Link nicht füllen. Alternativ müssten diese Verkehre über den zugehörigen LER im Kernnetz geschaltet werden. Das gleiche gilt für Verkehrsströme resultierend aus der Nutzung anderer Netzbetreiber, wenn im Metro-Switch-Standort Zusammenschaltungspunkte installiert werden können. Von daher ist dies nicht im Modell berücksichtigt.

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

Abbildung 5-10: 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	

Dazu werden Protokolle mit Industriestandard verwendet, wie das MPLS Fast Reroute (MPLS FRR) bzw. MPLS-TP und das Segmented GMPLS (S-GMPLS), vgl. [Cisco-07]. Nur für das MPLS-TP existiert seit Oktober 2011 ein herstellerübergreifender Standard. Aus internen Quellen wird berichtet, dass einige Betreiber die Implementierung dieses Konzepts in Planung haben, vor allem, weil damit eine mögliche Reduzierung der Kosten sowohl im CAPEX als auch im OPEX erreicht werden kann. Allerdings liegt derzeit noch keine ausreichende Erfahrung über die Zuverlässigkeit im Rahmen großer öffentlicher Netze vor.

5.1.7 Erweiterung des Netzzugangs im Konzentrationsnetz

Abschließend soll an dieser Stelle noch auf Entwicklungen im Bereich der Zugangsnetze eingegangen werden, die einen Verzicht auf die logischen Einrichtungen im Layer 2 des Konzentrationsnetzes erlauben. Diese stehen in Zusammenhang mit den glasfaserbasierten und vorkonzentrierenden NGA-Architekturen.

Aktuelle Breitbandanschlusstechnologien wie PON oder GPON haben den Aktionsradius des Netzzugangs für die Endkunden von wenigen Kilometern auf mehr als 20 km zwischen dem Hausabschluss und dem optischen Verteiler am MPoP erweitert. Die gerade abgeschlossenen Standardisierungen für XGS-PON⁹³ und TWDM-PON⁹⁴ erweitern den Radius auf 40 km. Diese Reichweiten-Entwicklung, wird durch optisches Ultralambda-Multiplexen von mehr als hundert Wellenlängen (bis zu 1000) auf einer Faser erweitert. Damit verbunden ist auch eine erhöhte Reichweite von bis zu 100 km.

⁹³ ITU-T Rec. G.9807.1

⁹⁴ ITU-T G.989 Familie

Diese Technologien befinden sich derzeit noch im Laborstadium. Nach frühen Entwicklungen haben sich bedingt durch wirtschaftliche Probleme der Patentinhaber (Verkauf von Nokia Siemens Networks bzw. Ausgliedern von Coriant) die Entwicklungen verzögert, eine Standardisierung steht frühestens ab 2020 in Aussicht. TWDM-PON hat sich quasi dazwischengeschoben und den vorgesehenen optischen Frequenzraum blockiert.

Mit dieser Realisierungsform könnte die logische Netzschicht im Konzentrationsnetz durch ein rein physikalisches Netz auf der Basis von „high-density“ Wellenmultiplex ersetzt werden. Aus wirtschaftlicher Sicht wird dies interessant, wenn die entsprechenden Elemente wie tune-bare Laser und photonische Integration kostengünstiger sind als entsprechende Ethernet und Metro-Ethernet-Einrichtungen, da die Kosten der Infrastruktur vor allem durch die Kabelverlegung, aber nicht durch die Anzahl der Fasern im Kabel bestimmt sind, vgl. [Badstieber-10]. Entsprechende Untersuchungen werden derzeit in den F&E Laboratorien vorgenommen, u.a. in der Open-Lambda-Initiative koordiniert.⁹⁵

Wenngleich für das derzeitige Kostenmodell diese Arbeiten noch nicht relevant sind, ist diese Entwicklung im Auge zu behalten, um ggf. das Kostenmodell daran anzupassen, wenn die industrielle Entwicklung zur Produktreife gelangt und die Betreiber ihre Netze in dieser Richtung erweitern.

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 war zuvor charakterisiert durch die

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

Dies ist aus heutiger Sicht für den Transport im Konzentrations- und Kernnetz aus kapazitiver und damit zusammenhängend ökonomischer Sicht veraltet und wird ersetzt durch

- ROADM-DWDM

und der zweite durch die

- Führung aller Nachfragen direkt in Wellenlängen, Ethernet bzw. IPoDWDM, vergleiche Abbildung 5-10, d.h., es wird keine OTN-Transportplattform aufgebaut.

⁹⁵ <http://www.openlambdainitiative.org/>

Die Verfügbarkeit der Kapazitäten im physikalischen Netz hängt von der Zuverlässigkeit der Einrichtungen ab, aber auch von der Möglichkeit, Ersatzschaltungen über bereitgestellte Reservekapazitäten zu aktivieren. Bei Anwendung der Ersatzschaltung ist auch die Zeitspanne zu beachten, die zwischen der Störerkennung und der Bereitstellung der neuen Kapazitäten vergeht. Klassische SDH bzw. NG-SDH Technologie haben hier einen Standard gesetzt. Die Ersatzschaltung im Störfall, z.B. durch Kabelbeschädigung, wird in einer Zeitspanne von unterhalb 50 ms vorgenommen, womit sichergestellt ist, dass bestehende Verbindungen i.d.R. nicht unterbrochen werden und ein erneutes „Hochfahren“ oder Umrouten des Netzes in höheren Schichten vermieden werden kann.

Die OTN Technologie und entsprechende Einrichtungen basieren auf einem ITU Standard, der 2001 verabschiedet wurde, vgl. [ITU-01]. Entsprechende Geräte sind seit diesem Zeitpunkt am Markt und Untersuchungen von Herstellern zeigen, dass bei korrekter Dimensionierung und Bereitstellung von ausreichenden Ersatzkapazitäten hohe Verfügbarkeits- und Zuverlässigkeitswerte für die bereitgestellten Bandbreiten erreicht werden können, vgl. [Alcatel-09a]. Damit ist ein Einsatz von OTN ohne Verwendung einer darüber liegenden SDH bzw. NG-SDH Schicht aus Verfügbarkeitsgründen möglich und muss nur unter Wirtschaftlichkeitsaspekten betrachtet werden. OTN integriert die NG-SDH Funktionen in seinen optischen Transport Units.

Die Verwendung von IPoDWM bringt auf der einen Seite die Eliminierung des Layer 1 mit sich und damit reduziert sich die Fehlerwahrscheinlichkeit, da prinzipiell auch ausfallgefährdete Einrichtungen entfallen, weil im physikalischen Netz nur noch eine optische Transportschicht bereitgestellt werden muss, die von den Routern durch GMPLS oder aber durch einen herstellerabhängigen Industriestandard realisiert wird. Dem steht gegenüber, dass eine Schicht verloren geht, die bisher Ersatzschaltungen im Falle von Kabelunterbrechungen vorgenommen hat. Es entstehen somit sowohl organisatorische als auch technische Probleme im Network Management durch den Verlust der Unabhängigkeit von logischer und physikalischer Schicht, vgl. [Juniper-10]. Außerdem müssen die Mechanismen zur Ersatzschaltung, die DWDM oder OTN in sehr zuverlässiger Weise bereitstellen, durch die jeweiligen Ethernet- bzw. Router-Einrichtungen vorgenommen werden. Dies ist vor allem im Falle der Unterbrechung einer Glasfaser beziehungsweise eines ganzen Kabelabschnittes von Bedeutung. Man beachte, dass die Wahrscheinlichkeit dieser Ausfälle in der Vergangenheit immer höher war, als der Ausfall von Systemkomponenten.

Abbildung 5-11 zeigt schematisch die heute übliche Lösungen beim Einsatz von OTN beispielsweise im Kernnetz.⁹⁶

⁹⁶ Zum Anpassung von Rahmen aus paketvermittelten Netzen (IP bzw. Ethernet) ist GFP dem OTN vorzuschalten was auch als P-OTN bezeichnet wird, vgl. [TPACK-08].

SDH/SONET wird nur noch für die bestehenden und ggf. zukünftigen digitalen Mietleitungen verwendet⁹⁷. Eine hybride Lösung in Richtung IPoDWDM könnte besonders zuverlässigkeitsrelevante Leitungsnachfragen noch über das OTN führen, während der Rest direkt in Form von IPoDWDM realisiert wird.

Die Führung über OTN ggf. mit darüber liegendem NG/SDH für Mietleitungen hat den Vorteil, dass eine ggf. vorhandene NG-SDH-Aggregationsplattform weiterverwendet werden kann. Hinzu kommt, dass die reichhaltigen und gut erprobten Sicherungsmechanismen zur Ersatzschaltung gestörter Verbindungen aufrecht erhalten werden können und – bei korrekter Dimensionierung – Verbindungen im physikalischen Netz innerhalb von 50 ms ersatzgeschaltet werden können. D.h., dass bestehende Verbindungen nicht unterbrochen werden und das Netz nach der Ersatzschaltung nicht wieder abschnitts- und kundenweise „hochgefahren“ werden muss.

Wie im letzten Abschnitt gezeigt wurde, können die Bandbreitenanforderungen aus dem logischen Netz direkt über die sechs Schichten des OTN geführt werden, ohne Einschaltung von SDH bzw. NG-SDH. Die drei elektrischen Schichten gestatten es, die Signale zu überwachen und die optischen Schichten können durch sog. Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer (ROADM) und optische Crossconnector-Einrichtungen (OXC) gesichert werden. Die entsprechenden Signale zur Steuerung sind durch eine Kontrollschicht zu realisieren, die entweder separat für das OTN oder aber durch das GMPLS/ASON implementiert wird (womit das OTN mit dem SDH/SONET vergleichbare Leistungsmerkmale zur Ersatzschaltung gestörter Verbindungen bereitstellt), vgl. [Perrin-09]. Abbildung 5-11 zeigt das entsprechende Schichtenmodell.

Abbildung 5-11: Schichten bei der Führung der Leitungsnachfragen aus den logischen Netzen ausschließlich mittels OTN

Aggregation / Metro	Kernnetz
-	IP
MPLS bzw. E-Term	MPLS / GMPLS
GB / 10 GB Ethernet	-
GFP	
OTN	
Fiber	
Kabel	

⁹⁷ Im Prinzip können digitale Mietleitungen durch Pseudowiredienste realisiert und damit in die logische Schicht integriert werden, es ist aber unklar, ob Pseudowiredienste tatsächlich die gleichen "Service-Level Arragements" wie digitale Mietleitungen erfüllen und von daher zumindest in einem mittelfristigen Zeitrahmen weiterhin Bedarf nach SDH/SONET Diensten besteht.

Es ist weiterhin zu beachten, dass bei OTN und einer Integration durch GMPLS die Kontrollfunktion und das Kapazitätsmanagement vollständig in den Routern bzw. Switching-Einrichtungen vorgenommen werden. D.h., GMPLS/ASON steuert Verkehrslenkung und Sicherungsmaßnahmen und Restauration **aus Einrichtungen des logischen Netzes** (dies wird auch als Crosslayer-Management bezeichnet). Dies steht, wie schon vorher gezeigt, im Gegensatz zu den traditionellen Netzen, wo in der logischen Ebene nur Verkehrslenkung und in der physikalischen Ebene Kapazitätslenkung vor allem im Störfall in jeder Ebene selbstständig und unabhängig vorgenommen wurde. Hinzu kommt, dass Protokolle verschiedener Standardisierungsinstitutionen zusammen wirken müssen, die von ihrer Arbeitsweise und Protokoll-Philosophie derzeit noch sehr verschieden bis gegensätzlich sind, vgl. [Larkin-02]. Dieser Gesichtspunkt wird beispielsweise in einem Paper von Ericsson als kritisch angesehen⁹⁸, vgl. [Ericsson-09].

Die Implementierung von IPoDWDM verschärft diesen zuletzt genannten Aspekt, weil

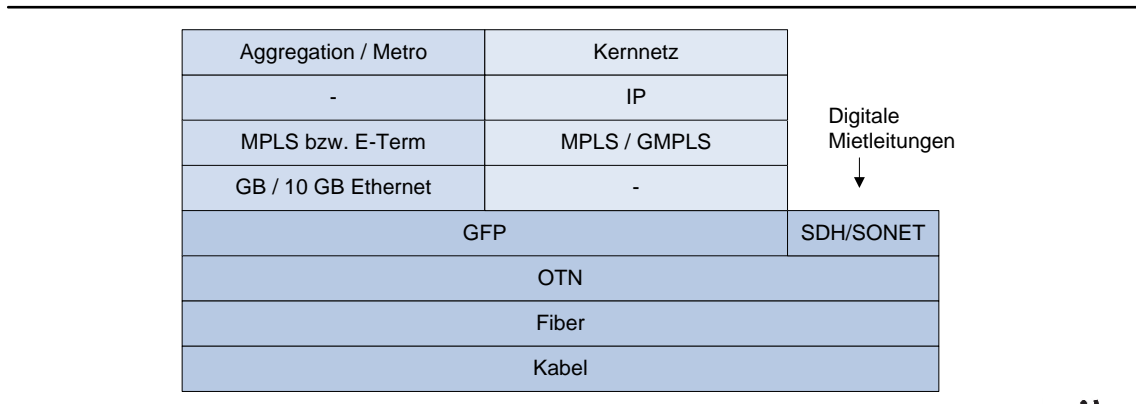
- weder eine separat steuerbare Transportschicht auf elektrischer Ebene,
- noch eine entsprechende Kontrollschicht implementiert wird.
- Hinzu kommt, dass Protokolle nach Cisco-Industriestandard wie MPLS Fast Reroute oder MPLS-TP und Segmented GMPLS verwendet werden, für die derzeit erste herstellerübergreifenden Standards in Form von RFC zwar existieren, vgl. [RFC-6378-11], für deren Anwendung und entsprechender Implementierung jedoch noch keine ausreichenden Erfahrungen vorliegen, die deren Einsatz in einem "carrier-grade" Netz rechtfertigen. Diesen Nachteilen steht ein möglicher Kostenvorteil gegenüber, der sich aus der Einsparung optisch-elektrischer Umwandlungen (OEO) ergibt, vgl. [Cisco-07].

Es bleibt noch die Berücksichtigung von 40/100Gb Ethernet über die erweiterte Standardisierung im OTN zu betrachten. Da die derzeitigen Standardisierungen sowohl in der SG15 der ITU als auch in der HSSG für den IEEE 802.3ba Standard noch recht neu sind, ist es abzuwägen, ob 40/100Gb-Ethernet-Verbindungen derzeit in das Kostenmodell Breitbandnetz einbezogen werden. Aufgrund des generischen Charakters des Equipments ist es jedoch möglich, derartige Kapazitätserweiterungen von Einrichtungen über die Inputparameter des Modells zu steuern, siehe Abschnitt 7.

Um die Nachteile des „Crosslayer-Management“ zu vermeiden und bestehende digitale Mietleitungen zu integrieren, kann ein hybrides Modell, wie in Abbildung 5-12 gezeigt, verwendet werden und das Netzmanagement im OTN von Verkehrsmanagement im logischen Netz getrennt werden, Abbildung 5-12.

⁹⁸ Zitat: "In general, all-router networks – even those with duplicated routers and interconnections – struggle to beat 99.9 percent availability, 100 times worse than the 99.999 percent ("five nines," downtime of 6 minutes per year) typically achieved by lower layer transport " page 10.

Abbildung 5-12: Schichten bei der Führung der Leitungsnachfragen aus den logischen Netzen sowohl über OTN als auch SDH/SONET



Das Kostenmodell Breitbandnetz soll daher im Abschnitt der Systemzuweisung und Kostenberechnung ausreichend flexibel sein, um verschiedene Realisierungen zu untersuchen, schließt aber im neuen Release die Varianten um SDH bzw. NG-SDH als veraltet und unzureichend für das Transportnetz (nicht für Mietleitungen) aus.

Zusammenfassend existiert eine breite Vielzahl von Realisierungsmöglichkeiten sowohl im Konzentrationsnetz als auch im Kernnetz, die es bisher nahegelegt hatte, im Kostenmodell für das Breitbandnetz keine konkrete Architektur zu verwenden, sondern die Frage der Architektur und ihrer Einrichtungen durch eine generische Kostenfunktion abzubilden, wobei die Parameter dieser Kostenfunktion auf die Anwendung einer konkreten Architektur und ihre Einrichtungen jeweils anzupassen waren, vgl. Kapitel 7. Den seit 2010 beobachteten Entwicklungen sowie dem Anspruch des Kostenmaßstabs der Bestimmung effizienter Kosten folgend, wird eine Auswahl vollzogen, die „dem Stand der Technik“ entspricht.

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 Kostenmodule zu formulieren sind:

- 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 auch die Integration traditioneller SDH-Schnittstellen erlauben

IP over DWDM in der im Router integrierten Form schließen wir noch aus, da bisher noch keine Erfahrungen über die Zuverlässigkeit in großen „carrier-grade“ Netzen vorliegen. Gleiches gilt für den Verzicht auf eine rein physikalische Realisierung des

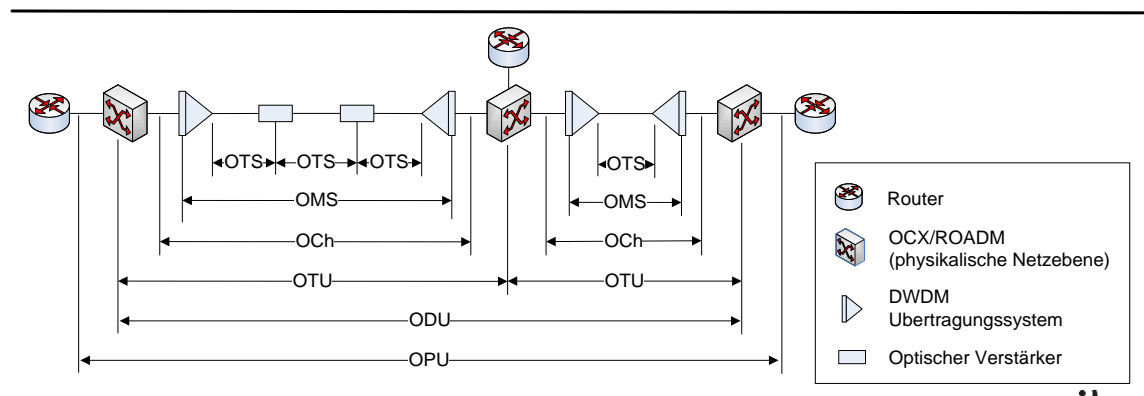
Konzentrationsnetzes, wie sie in Abschnitt 5.1.7 dargestellt ist. Diese Vorgehensweise hat darüber hinaus den Vorteil, dass die Berücksichtigung einer Layer 1 basierten Kapazitätsnachfrage (zusätzlich zu den Nachfragen aus dem logischen Netz (Ethernet und IP)) bei der Dimensionierung möglich ist.

5.3 Topologische Aspekte für das physikalische Netz

Im physikalischen Netzteil sind für jede Unterschicht entsprechende Netzstrukturen festzulegen. Ausgangspunkt ist die Struktur des logischen Netzes mit ihren Bandbreitenanforderungen je Netzkante, die zugleich die Struktur der ODU (obersten Schicht im OTN) abbildet.

Zur Illustration wird auf eine bereits in Abschnitt 5.1.5 eingeführte Abbildung zurückgegriffen:

Abbildung 5-13: Funktionen der OTN-Schichten⁹⁹



Die Struktur der OTU (unterste elektrische Schicht im OTN) ist mit der Struktur der Optical Channel (Och) und der OMS identisch und beschreibt die Signale zwischen zwei Standorten des physikalischen Netzes, die mit einer Netzkante verbunden sind, vgl. Abbildung 5-13.

Die OTS ist von der OMS nur insofern verschieden, als dass auf einer Netzkante zwischen zwei physikalischen Standorten optische Verstärker eingesetzt werden. Die OTS unterteilt somit eine physikalische Netzkante in Kantenabschnitte.

Die Topologie der Glasfaserinfrastruktur ist damit mit der OMS-Struktur identisch. Daraus folgt, dass aus den Breitbandnachfragen des logischen Netzes und den zugehörigen ODU die entsprechenden OTU bzw. Och in Form von (schwarz-weiß)

⁹⁹ In der Realisierung sind die DWDM Übertragungssysteme im OXC durch eine Schnittstellenkarte integriert und im ROADM durch die netzseitige Schnittstellenkarte der Einrichtung realisiert.

optischen Signalen abzuleiten und diese dann über die physikalische Topologie zu führen sind. Aus den auf den physikalischen Netzkanten aggregierten OCh können dann die notwendigen optischen Übertragungssysteme bestimmt werden.

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.

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

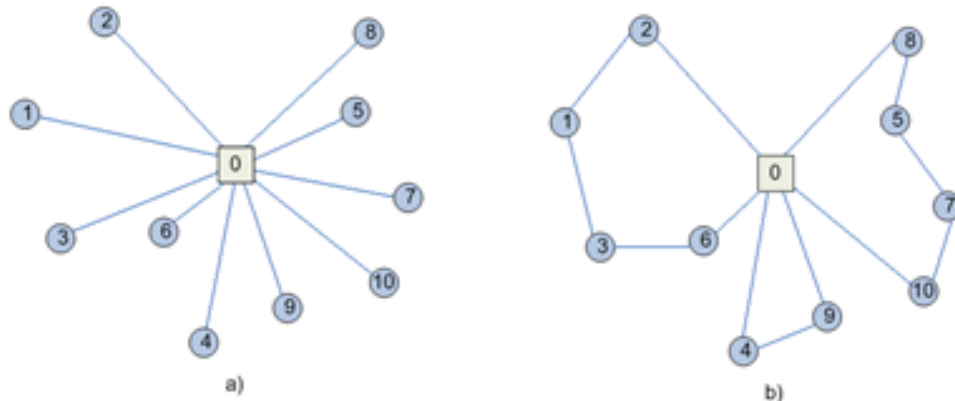
Die Topologie auf der Basis der Glasfaser-Infrastruktur wird in den hierarchischen Netzsegmenten zwischen den Ebenen (0-2, 3-5) durch Ringe bestimmt. Beispielsweise im Konzentrationsnetz werden für jedes IP-PoP-Cluster normalerweise Ringtopologien gebildet, die alle Nachfragen aus den MPoP aufnehmen und an den BNG bzw. im Fall von Layer 1 Kapazitätsnachfragen an den DXC abgeben, der am IP-PoP kolloziert ist.

Aus Gründen der Verfügbarkeit kann die Anzahl der Standorte pro Ring begrenzt werden; in diesem Fall sind pro Cluster mehrere Ringe zu berechnen. Die Bandbreitenanforderungen aus der logischen Ebene könnten dann über die Ringstrukturen zu 50% im Uhrzeigersinn und zu 50% in entgegengesetzter Richtung geführt werden, siehe dazu auch die Ausführungen im 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 auch kapazitiv vollständig abzusichern. Das Modell ist im Konzentrationsnetz auf 100% fest parametrisiert, weil andere, ergänzende Optionen ausgeschlossen sind. Im Kernnetz mit seinen zusätzlichen Optionen sind auch 50% einstellbar.

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 0-2 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 – anstelle einer Begrenzung von Standorten der unteren Ebene eines Clusters – eine Unterteilung in Sub-Cluster vorgenommen werden, die ihrerseits individuelle Ringe konstituieren. Dies ist in der nachfolgenden Abbildung 5-14 illustriert, wobei der linke

Teil der Abbildung (a) das Cluster darstellt und der rechte Teil die kleeblattartige Realisierung der Ringe.

Abbildung 5-14: 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 determiniert wird und damit weitestgehend von der geographischen Entfernung zwischen jeweils benachbarter Standorte im Ring abhängig ist. Daraus folgt, dass das Modell eine Ringbildung auf der Basis einer Längenminimierung vorsieht. Dies geschieht im Modell auf Basis des Algorithmus für das Travelling Salesman Problem (TSP), siehe [Lin-73].

5.3.2 Topologie und OCh-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).

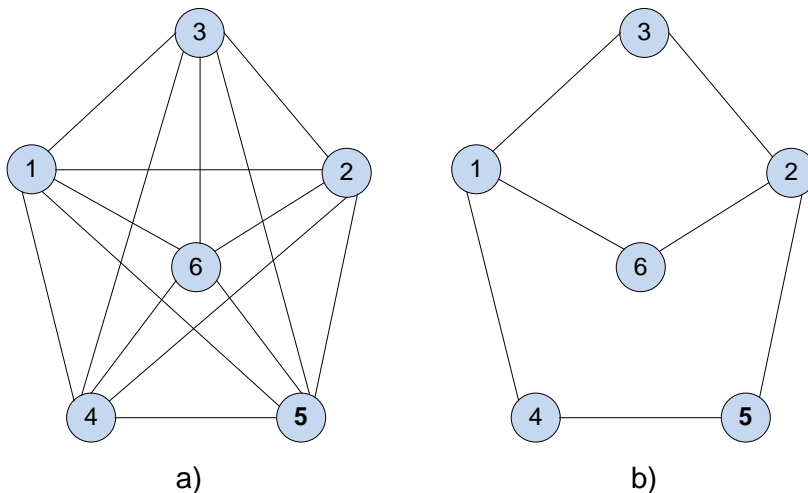
Für den Ring erfolgt eine Anbindung der LSR über die entsprechende Layer 1 Technologie (z.B. OTN), wie es bereits in Abbildung 4-7 dargestellt wurde.

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 Diameter¹⁰⁰ beachtet, d.h. vor Löschung einer logischen Kante wird geprüft, ob das verbleibende Netz noch ausreichend zusammenhängend, d.h. i.A. bi-connex¹⁰¹ ist und ein vorzugebender Maximalwert für den Diameter nicht unterschritten wird.

In der nachfolgenden Abbildung 5-15 sind logische Netzstruktur (a) und deren zugehörige physikalische Topologie (b) für das flache Kernnetz dargestellt, wobei die Knoten ausschließlich Standorte der oberen Kernnetzebene darstellen.

Abbildung 5-15: 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. OXC-Einrichtungen zum Einsatz, wobei in der Modellparametrisierung zu

¹⁰⁰ 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.

¹⁰¹ Bi connex meint dass zwischen jedem Knotenpaar mindestens zwei Wege bestehen, die keine gemeinsame Kante haben.

gewährleisten ist, dass das angegebene Equipment auch die Anforderungen an den Knotengrad erfüllen. Im Beispiel der Abbildung 5-15 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, diese sind Schicht 1 Systeme, Wellenlänge 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 ROADM- bzw. OXC-Einrichtungen, 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 lediglich, wie auch den beiden andern Fällen, zu einer Vergrößerung der Kabellängen. Die Vor- und Nachteile sowie die entsprechenden Kosteneinsparungen hängen stark von den aggregierten Bandbreitenanforderungen in beiden Ebenen ab. Im Modell werden diese Varianten nicht berücksichtigt.

Die vollständige Separierung wird auf der Basis von getrennten Kabeln in getrennten Trassen realisiert. In diesem Bereich sind relevante Kosteneinsparungen durch die Zusammenlegung geographisch benachbarte Kabelabschnitte 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 erfolgen kann, ist die Berücksichtigung von Verfügbarkeitsaspekten im Störfall zu berücksichtigen, weil bei einer totalen Unterbrechung aller Kabel, die in einem Kabelabschnitt gemeinsam geführt werden, die Ersatzkapazitäten unzureichend sein können.

Dieser Aspekt der 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 einer Layer 0 Kante und deren Führung über zwei andere bestehende Layer 0 Kanten ergibt, wobei ggf. Layer 0 Kanten, die eine Mehrwegeführung absichern, nicht zusammengefasst werden können, da bei einer Kabelzerstörung beide Wege ausfallen würden. In den Umwegfaktor fließen dabei die Implikationen sowohl von Trassenlänge als auch Kabellänge ein.

Dieser Algorithmus findet in zwei Bereichen Anwendung:

- auf die Cluster der hierarchischen Netzsegmente, welche über Ringe realisiert werden, und zwar individuell für jedes Cluster, welches 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. Gleiches gilt für die Anwendung auf die Netzsegmente 4-5 und 5-5 bzw. 3-5 und 5-5.

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, aber auch für die Signalisierungsnachrichten beim Aufbau, der Überwachung und dem Abbau von Verbindungen aus Echtzeitdiensten. Die Entwicklung der Architekturen der Kontrollschicht ist eng mit der Entwicklung der Telekommunikationsnetze verbunden.

In den traditionellen Telekommunikationsnetzen wurden für jede Dienstkategorie separierte Netze (PSTN/ISDN, paketvermittelnde Datennetze, Breitbandnetze) bereitgestellt, die jeweils eine eigene Kontrollschicht und eine eigene logische Transportschicht besaßen.

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. Damit kann das best effort Internet als ein System verteilter Intelligenz unter einem stark vereinfachten Transportnetz angesehen werden.

In diesem Kapitel wird im ersten Abschnitt 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 Entwicklung der Kontrollschicht des best effort Internet in Richtung eines „Next Generation Internet NGI“ untersucht. Im dritten Abschnitt werden beide Konzepte verglichen und deren Anwendung im Kostenmodell dargestellt.

6.1 NGN und IMS

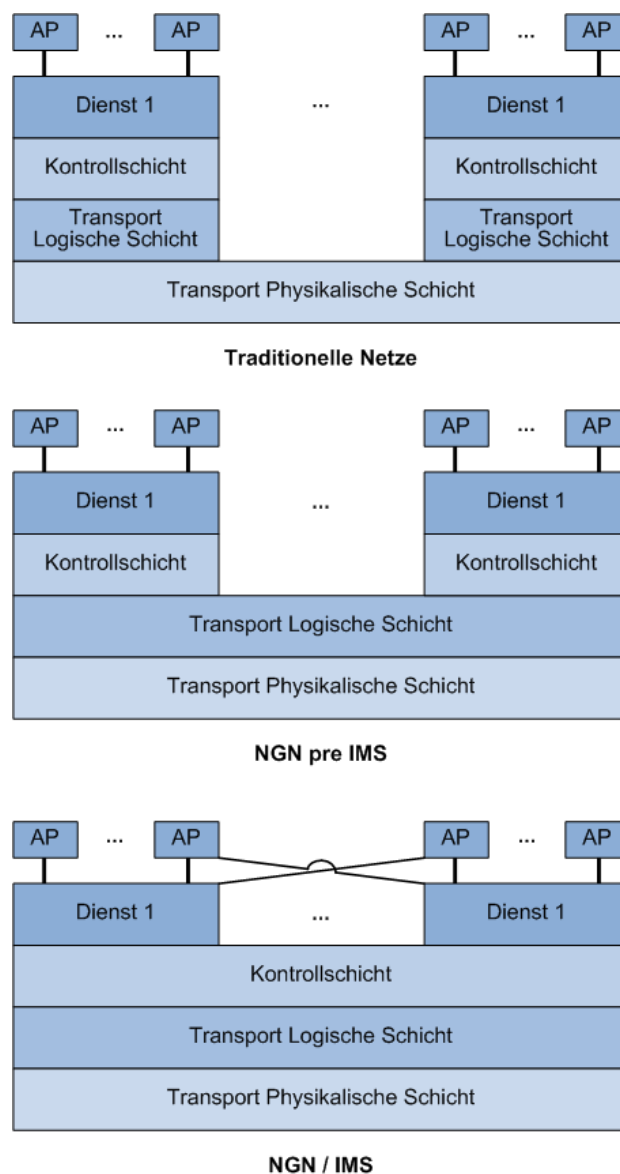
In den traditionellen Netzen ist die Implementierung der Kontrollschicht eng mit den Einrichtungen der logischen Schicht zusammengefasst und kann daher als verteiltes System angesehen werden.¹⁰² In einem nächsten Schritt wurden mit der Entwicklung der Netze zunächst unter einer ATM- und danach der IP Transportplattform mehrere Dienstekategorien unter einer gemeinsamen logischen Schicht integriert und die verschiedenen Dienste durch zentralisierte Diensteserver, auch als Softswitches bezeichnet, bereitgestellt.¹⁰³

¹⁰² So sind im PSTN/ISDN die Funktionen der Signalisierung aber auch die OAM Funktionen in den Vermittlungseinrichtungen integriert, aber von der logischen Transportschicht separiert, ein Beispiel ist das CCSSn⁰⁷ und dessen Implementierung in Form von „Signaling Points SP“ und Signaling Transfer Points STP“, vergleiche [Siegmond-01].

¹⁰³ Ein Beispiel ist Ericsson ENGINE Integral solution, die sowohl unter ATM als auch IP Sprachdienste mittels eines zugehörigen Servers (Softswitch) anbietet, vgl. [Ericsson-04].

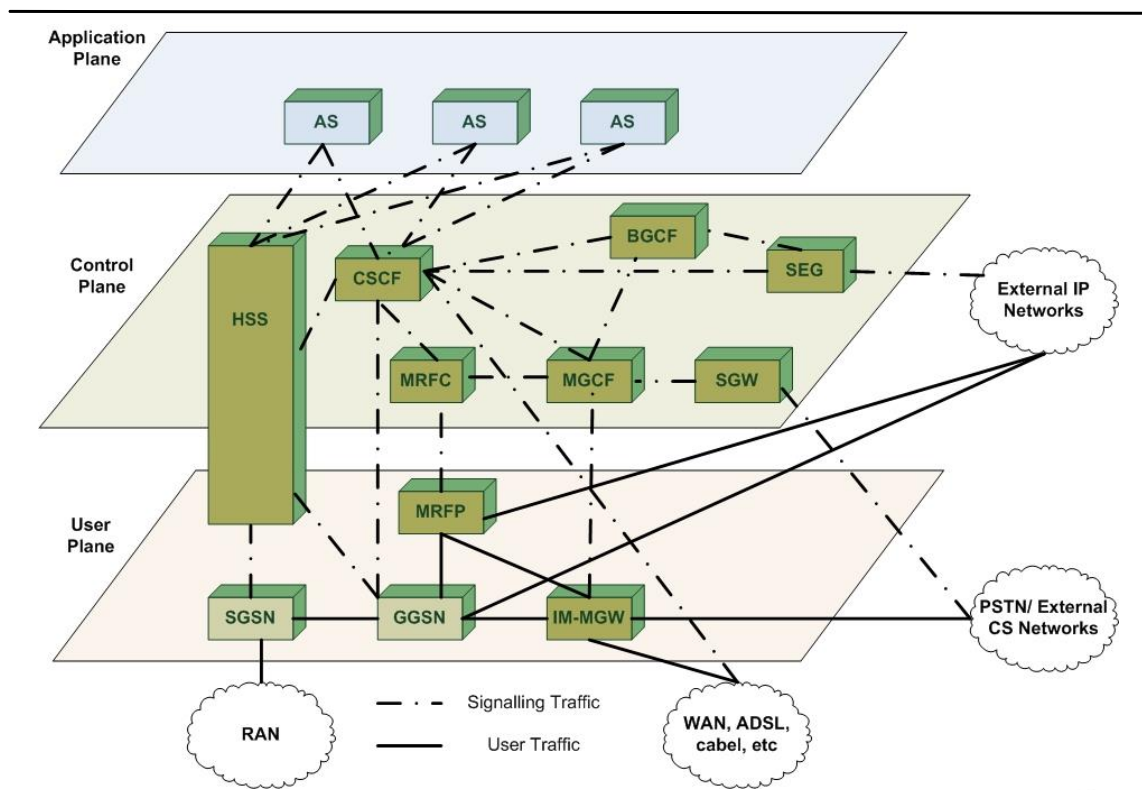
Als Weiterentwicklung dieses Konzepts wurde unter dem Namen IP Multimedia Subsystem (IMS) eine Architektur entwickelt, die es gestattet, unter einer gemeinsamen Kontrollschicht verschiedene Dienste anzubieten. Die zugehörigen Anwendungen können dabei aus Kombinationen standardisierter Dienste zusammengestellt 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.

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



IMS wurde in einem ersten Schritt von der 3GPP-Organisation entworfen¹⁰⁴, 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 TISPA-Netzes standardisiert, wobei beide Organisationen eng kooperieren. IMS beschreibt im Kern eine zentrale Kontrollschicht, die von allen Diensten gemeinsam verwendet 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 Resource Function Processor, SGSN Service GPRS Support Node, SGW Signaling Gateway

¹⁰⁴ www.3gpp.org.

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].

Man beachte, dass IMS vor allem den Aufbau und die Überwachung von Multimedieverbindungen sowohl intern als auch mit anderen Netzen unterstützt und damit auch von Bedeutung für die Zusammenschaltung von unterschiedlichen Netzen ist, 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	IPoOTN	IPoOTN	IPoDWDM
Logische Ebene	MPLS	GMPLS/ASON	MPLS FRR S-GMPLS
Physikalische Ebene	TCM aus OTN	GMPLS/ASON	--
Eigenschaften	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 minimale Dienstqualität kann nur durch eine reduzierte Auslastung der Server und Leitungsgruppen (d.h., 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 QoS Parameter zu differenzieren, wurden zusätzliche Protokolle entworfen, die das best effort Internet in Richtung eines diensteintegrierten 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-Infrastruktur vermieden werden kann. D.h., die im IMS zentralisierte Kontrollschicht wird

durch entsprechende Diensteserver und Bandwidth Broker 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 Dienstezugangs bereitgestellt werden können.¹⁰⁵

Die beiden Kontrollfunktionen Identifizierung und Autorisierung (NASS) und die Zuweisung von Netzkapazitäten (RACS)¹⁰⁶ sind im klassischen Internetzugang über DSLAM im sog. Broadband Remote Access Server (BRAS) integriert, der oft mit dem LER kombiniert ist und damit in der unteren Schicht des Kernnetzes liegt. Aus Kostengründen kann die BRAS Funktion auch auf weniger Standorte beschränkt werden. Hier zeigt sich auch der Unterschied zum NGN bzw. NGN/IMS, welches diese Funktionen des NASS und RACS über mehrere Funktionselemente verteilt und damit eine Optimierung und Priorisierung in der Zuweisung von Netzkapazitäten gestattet. Einige dieser Funktionen werden im NGN bis in den ersten Zugangspunkt des Nutzers verlegt, indem der klassische DSLAM durch einen Multi Service Access Node (MSAN) ersetzt wird. Für eine vertiefende Betrachtung vgl. [Schröder-05].

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.¹⁰⁷

Für die Kostenberechnung ist zu beachten, dass die beiden Protokolle MPLS-TE bzw. RSVP-TE im Transportteil der IP Netze durch entsprechende Software in den Router-einrichtungen implementiert werden, während die Signalisierung mittels des SIP Protokolls in externen SIP Servern vorgenommen wird.

105 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.

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

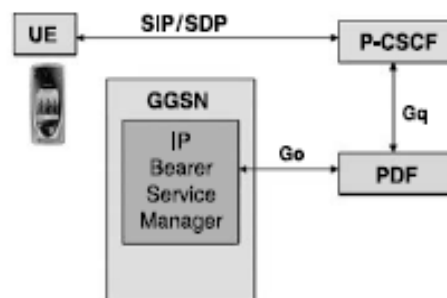
107 Ergänzend sei auf die Entwicklung eines neuen QoS-Konzeptes verwiesen. Dieses orientiert sich vornehmlich an der subjektiven Erwartung der Nutzer (insbesondere Privatnutzer) und wird mit Quality of Experience QoE bezeichnet, vgl. [Fielder-10], [Shaikh-10].

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 vorgenommen wird. Gemeinsamkeiten beider Konzepte ergeben sich aus der Tatsache, dass Protokolle aus dem NGI auch im IMS verwendet werden. So basiert die „Call State Control Function“ auf dem SIP Protokoll. Die mit dem P-CSCF verbundene „Policy Decision Function“ muss auf Mechanismen des DiffServ bzw. IntServ zurückgreifen, um abzusichern, dass die notwendigen Kapazitäten zur Erfüllung der QoS Parameter in der IP Transportschicht bereitgestellt werden, vgl. Abbildung 6-3. Hinzu kommt, dass auch im NGN-IMS die Funktion des P-CSCF in Servern implementiert werden kann, die über die Standorte des Netzes verteilt sind und damit mit den SIP Servern aus dem NGI vergleichbar sind. Dagegen ist zu erwarten, dass die Funktionen des I-CSCF und S-CSCF sowie des HSS aus Abbildung 6-2 i.d.R. an einem oder aus Sicherheitsgründen zwei zentralen Standorten aufgebaut werden.

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

Abbildung 6-3: Kapazitätsbereitstellung im IMS mittels der Policy Decision Function (PDF)



Quelle: [Mage-06]

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt stehen die in der Diskussion und Entwicklung befindlichen Systeme für die Kontrollplattformen der neuen Generation nicht vollständig zur Verfügung. Business data services werden als Layer 3 VPN oder Layer 2 VLAN mittels entsprechenden MPLS Tunneln 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). 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 ist entsprechend vom Modell-anwender das dazu erforderliche Equipment (Vorgabe der zu berücksichtigenden Funktionselemente) sowie die Anzahl der zugehörigen Standorte vorzugeben. Im Modell wird dabei davon ausgegangen, dass die Inanspruchnahme der Kontrolleinrichtungen gleich verteilt ist. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass Anfragen an die Kontrolleinrichtungen 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.

Im nachfolgenden Unterabschnitt sind die technischen Einrichtungen beschrieben, die im Rahmen der Systemspezifikation ausformuliert wurden und für die Modellanwendung verfügbar sind. Es handelt sich dabei um allgemeine Funktionselemente zur Steuerung des allgemeinen Netzzugangs. (Dienste-) Spezifische Funktionselemente sind in den entsprechenden Anlagen dargestellt (siehe Anlage 1 Kosten der Sprachzusammenschaltung und Anlage 2 Kosten von Bitstromzugang).¹⁰⁸ Der Modellierungsansatz ist dabei dergestalt, dass weitere Funktionselemente über vorgesehene Inputparameter (Systemparameter) eingepflegt werden können.

6.4 Allgemeine Funktionselemente im Breitbandnetz

Für die Steuerung des allgemeinen Netzzugangs werden verwendet:

- Broadband Remote Access Server (BRAS)
- Radius
- DNS

Die Funktionen des BRAS und des Radius sind seit dem vorliegenden Modellrelease im BNG zusammengefasst. Die Anzahl der Standorte, an denen diese Einrichtungen vorgesehen werden, werden von dem Modellanwender als Modellinput vorgegeben (Vorgabe der Anzahl von Standorten). Im Fall des BNG geben jedoch die BNG Kernaufgaben (Anzahl der MSAN-Anschlüsse) die Menge der Systeme an den

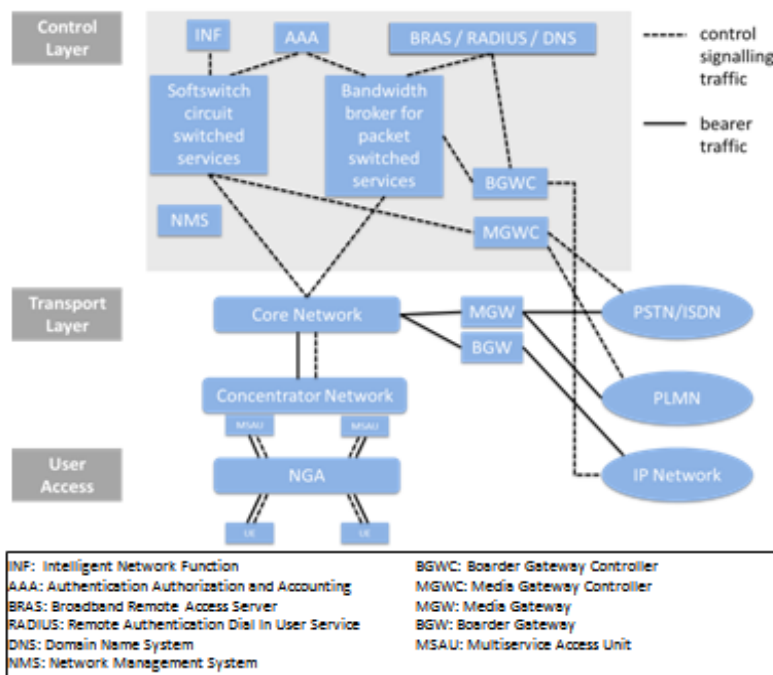
¹⁰⁸ [WIK-16c] und [WIK-16d].

Standorten vor. Somit können auch mehrere BNG-Systeme an einem Standort der Netzebene 3 erforderlich sein.

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) ausdrückt. Sie wird im Modell gleichmäßig über die Standorte dieser Einrichtungen verteilt. Bzgl. des DNS erfolgt die Dimensionierung ausschließlich auf Basis der dienstespezifischen Nachfrage und Aufgaben (Auflösung E.164 Adressierung, URL, ...) ¹⁰⁹. Zum einen gehen wir davon aus, dass der Umfang der Nachfrage eines Dienstes hinreichend ist, um derartige Einrichtungen auszulasten. Zum anderen müssten zur Bestimmung der gesamten 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.

In der nachfolgenden Abbildung 6-4 sind neben den allgemeinen auch die sprachspezifischen Funktionselemente dargestellt, die im vorliegenden Kostenmodell berücksichtigt werden.

Abbildung 6-4: Einrichtung der Kontrollschicht



¹⁰⁹ Für die Dimensionierung des DNS im Kontext der Kostenmodellierung der Sprachzusammenschaltung siehe Anlage 1 [WIK-16c].

In der sich anschließenden Tabelle 6-2 sind ergänzend die Kostentreiber der Einrichtungen der Kontrollschicht dargestellt. Dabei ist in der zweiten Spalte kenntlich gemacht, ob es sich um eine dezentralisierte Einrichtung handelt.

Tabelle 6-2: Kostentreiber der Einrichtungen der Kontrollschicht

Funktionseinheit	zentral/dezentral	Standort	Kostentreiber
Softswitch	zentral	begrenzte Anzahl an Kernnetzstandorten (Input Parameter je Netzebene und Anzahl Standorte)	BH Verbindungswünsche sämtlicher voice calls im Netz (egal ob IC oder ON Net traffic))
BRAS (in BNG integriert)	dezentral	Alle Kernnetzstandorte der Ebene 3	BH Breitbandsitzungswünsche / parallele Sessions, BNG aber nach User-Ports (MSAN) dimensioniert
IP Gateway	dezentral	An allen Standorten, an denen Interconnection zu IP-Netzwerken angeboten wird	BH IP Verkehr für IP Interconnection (Peering/Transit)
DNS server	zentral	An einem oder zwei Kernnetzstandorten	BH Verbindungswünsche Voice
Session Border Controller (SBC)	zentral	begrenzte Anzahl an Kernnetzstandorten (Input Parameter je Netzebene und Anzahl Standorte)	BH Verbindungswünsche (parallel) (für voice IC-calls – egal ob TDM oder VoIP Interconnection)

7 Systemzuweisung, Investitionswertbestimmung und Kostenberechnung

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).

Wir haben einen generischen Ansatz für die Modellierung der Systemzuweisung implementiert. Ausgangspunkt im Modell ist dabei die Auswahl der jeweiligen Technologie im Layer 1 (getrennt für Konzentrations- und Kernnetz). Auf Basis dieser 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

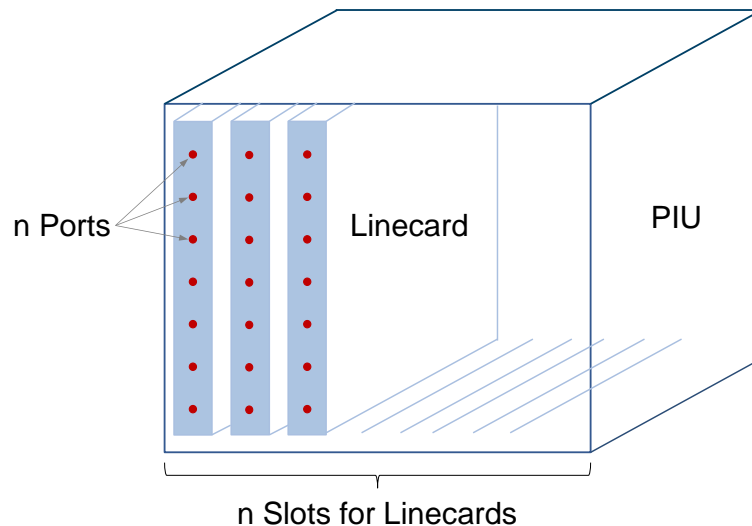
... abgeleitet aus den Verkehrsnachfragen der MPoP in Verbindung mit dem im Modell implementierten Routing der Dienste.

Für die Systemzuweisung sind im Rahmen der Modellparametrisierung 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



Dieser Aufbau der Einrichtungen ist unabhängig davon, um was für eine Einrichtung es sich 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 Aufbau. Dies geht auch aus der Darstellung der Inputparameter im Anhang Logical System Assignment 7.5.2 sowie Physical System Assignment 7.5.3 hervor.

Für Einrichtungen werden Linecards mit unterschiedlichen Portzahlen berücksichtigt (n Typen von Linecards). Die Portgröße ist dabei bezogen auf die jeweilige Linecard einheitlich. Für die Layer 2 und Layer 3 Einrichtungen sind die Linecards mit den PIU beliebig kombinierbar. Diese Flexibilität ist bei den Layer 1 Einrichtungen nicht gegeben. Vielmehr sind die Linecards nur für bestimmte PIUs verwendbar. Diese Einschränkung wird im Modell bei der Systemzuweisung berücksichtigt.

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

Bei der Ausgangsparametrisierung 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 des Datenrücklaufs im Zuge der Kostenstudie für verbindungsabhängige Zusammenschaltungsleistungen (2011) vorgenommen. Auf dieser Basis wurden Einrichtungen und zugehörige LineCards (in jeweils zweistelliger Größenordnung) in das Modell eingepflegt und bilden die Grundlage für die Systemzuweisung bei den Modellberechnungen. Bei den Transportsystemen sind dabei die folgenden Technologien berücksichtigt.¹¹⁰

- CWDM / DWDM
- OTN

Die Vorgehensweise bei den Systemen des logischen Netzes (Layer 2: Ethernet / Layer 3: Label Edge und Label Switch Router) erfolgt im Grundsatz analog. Für die Ausgangsparametrisierung wurden Systeme unterschiedlicher Leistungsfähigkeit ausgewählt, wie sie in den Angaben der Marktteilnehmer zu finden waren, und innerhalb ihrer Gruppen über die Leistungsfähigkeit 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 Ausgangsparametrisierung sind ebenfalls mehrere Einrichtungen und LineCards in das Modell eingepflegt und bilden die Grundlage für die Systemzuweisung bei den Modellberechnungen.

110 Für SDH-Mietleitungen kommen auch elektrische Schnittstellenkarten im Modell Standort intern zur Anbindung der logischen an die Layer 1 Einrichtungen zur Anwendung.

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 die Funktionen eines BRAS in denen eines IP-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. Vergleichbares gilt für die Funktion des Media Gateway Controllers: Diese 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 Ausgangsparametrisierung 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 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. Mit der Modellversion 2.3 werden diese beiden Funktionen im BNG in einem integrierten Gerät gemeinsam mit der LER- und der Aggregationsswitch-Funktion des Konzentrationsnetzes zusammengeführt. Für die Zuordnung des Equipmentpreises für diese kombinierte Funktion wurde der BNG in die Marktabfrage aufgenommen, um einen Mittelwert aus Angaben der Marktteilnehmer für das Gerät mit den integrierten Funktionen für Systeme am oberen Rand des marktüblichen Leistungsspektrums zu wählen. Somit wird an dieser Stelle von dem methodischen Ansatz, die Einrichtungen separiert nach ihren Funktionen zu dimensionieren, verzichtet. Diese Vorgehensweise ist – insbesondere mit Blick auf die LER und Aggregationsswitch-Funktion des Konzentrationsnetzes bezogen – mit Kosteneinsparungen durch den Verzicht auf die Doppelung von Einrichtungen am Standort und der damit verbundenen Schnittstellen verbunden.

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.

Darüber hinaus eignet sich diese Methodik, die Festlegung von Investitionsparametern unter Einbeziehung der Marktteilnehmer vorzunehmen, da aufgrund der Abstraktion der Systeme eines konkreten Netzbetreibers (und damit der jeweiligen Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse) die Wertansätze prinzipiell öffentlich diskutiert werden können.

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, Installation und Inbetriebnahme umfassen. Ferner geht der Modellierungsansatz davon aus, dass Funktionalitäten des equipmentspezifischen Netzmanagements ebenfalls in den Einrichtungen der Schichten 1, 2 und 3 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 und vorgelagerte/zugehörige MSANs
- Ebene 2 Einrichtung, im BNG mit
- Ebene 3 Einrichtung zusammengefasst
- Ebene 5 Einrichtung

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

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

Da es sich bei der MPoP/Ebene 0 Einrichtung um das Teilnehmer anschließende Equipment handelt, ist die zugrunde liegende Anschlusstechnologie ein zentraler Bestimmungsfaktor für die Systemzuweisung. Um die Technologieabhängigkeit herauszuarbeiten und auch die gewählte Vorgehensweise zu begründen, wird auf diesen Aspekt in einem 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 Teilnehmer anschließendes Equipment im MPoP – Systemzuweisung und Abgrenzung gegenüber dem NGA

Der MPoP wurde als Standort der untersten Netzebene des Konzentrationsnetzes definiert. Wie eingangs 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

1. **netzseitig immer** eine Aggregation derzeit **auf Basis von Ethernet**¹¹¹ vorgenommen wird sowie
2. **kundenseitig eine Dedizierung** der Anschlussleitung **vorliegen kann** (FttEx und FTTH P2P).

Die Aggregation auf Basis von Ethernet kann einerseits über einen dedizierten Ethernet Konzentrador (Layer 2 ChannelBank) auf Ebene 0 erfolgen (dies findet in der Modellversion 2.3 für Layer 2 Mietleitungen und verwandte Verkehre Anwendung) oder aber es werden die Ethernet-Ausgänge des NGA-Equipments (z.B. OLT und MSAN uplinks) unmittelbar über Fasern oder Wellenlängen über DWDM-ROADM auf die nächsthöhere Netzebene geführt. Auf eine darüber hinausgehende Aggregation der Layer 2/3 Nachfragen, wie sie bisher implementiert war, wird an dieser Stelle (Ebene 0)

¹¹¹ 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.

verzichtet. Auch werden die Layer 1 Mietleitungen unverändert über Layer 1 ChannelBanks aggregiert und dann auf die ROADM geführt. Die Integration sämtlicher Nachfragen beschränkt sich im MPoP daher auf die Schicht 1.

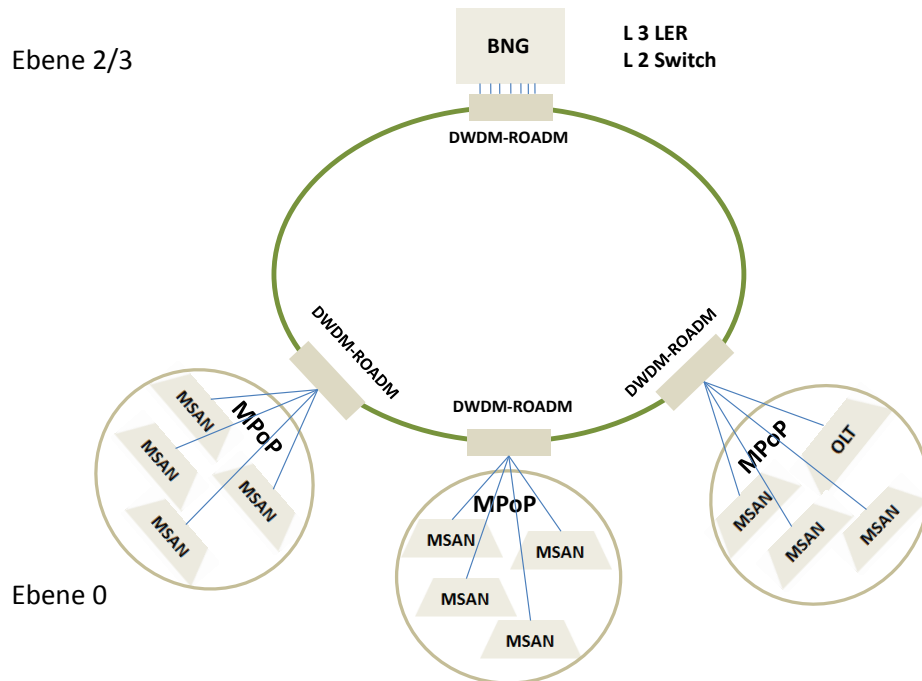
Hinsichtlich der Kostenzurechnung wurde traditionell das Kriterium der Dedizierung herangezogen, um darüber zu entscheiden, ob die Kosten der Netzelemente dem Teilnehmeranschlussnetz oder dem Verbindungsnetz zugerechnet werden sollten. **Mit der Wahl des MPoP als unterste Netzebene sollten alle NGA-Architekturen und damit nutzergetriebene Kosten vernachlässigt werden, um die Kosten des Konzentrationsnetzes unabhängig von der zugrunde 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.**¹¹²

Die Teilnehmer anschließenden Systeme werden im Modell mit ihren konzentrierenden Ethernetschnittstellen (in Deutschland derzeit typischerweise aus MSAN (FTTC) und GPON OLT (FTTB/H) bestehend) am MPoP unmittelbar über ein DWDM Transportnetz direkt auf den BNG geführt, welche die aggregierende logische Einrichtung konstituiert (Abbildung 7-2). Das diensteintegrierende Konzentrationsnetz beginnt mit der uplink Schnittstelle zum ROADM am MPoP, der die für die Modellierung gewählte Demarkationslinie zwischen NGA und NGN bildet. Die Integration auf der logischen Schicht (Layer 2) findet am nachgelagerten IP-PoP statt.¹¹³

¹¹² An dieser Stelle sei nochmals betont, dass hiermit keine regulatorische Empfehlung oder Festlegung verbunden ist, sondern eine pragmatische Abgrenzung, die sinnvolle Kostenvergleiche erlaubt.

¹¹³ Sofern die Schnittstellennachfrage am IP-PoP die -kapazitäten der BNG übersteigen, erfolgt die vollständige Aggregation sogar erst auf der obersten Kernnetzebene am LSR.

Abbildung 7-2: Anbindung der MSAN an die BNG unmittelbar über optische DWDM-Wellenlängen



Vor dem Hintergrund der Vollständigkeit und Vergleichbarkeit und der kostentreibenden Eigenschaften der abgebildeten Architektur wird nachfolgend die Investitionswertbestimmung des Teilnehmer anschließenden Equipments, welches aus den oben genannten Vergleichsgründen nicht dem hier definierten Konzentrationsnetz zugerechnet wird, vollständig beschrieben.

7.2.2 Ebene 0 – Systemzuweisung

Die Netzebene 0 (MPoP) bildet den Ausgangspunkt der nachfragegetriebenen bottom-up Kostenmodellierung. Die MPoP konstituieren dabei nur zum Teil den faktischen Standort für das Teilnehmer anschließende Equipment, und zwar im Fall von FTTH-P2P, PON, Indoor-MSAN sowie Kapazitätsnachfragen auf Layer 1 oder Layer 2 (aggregiert auf Layer 1 oder 2 ChannelBanks). Zu einem relevanten Teil befindet sich das Teilnehmer anschließende Equipment am KVz oder irgendwo zwischen MPoP und Endverzweiger an der Straße. Da bei dem gewählten Modellierungsansatz auf eine Geo-Referenzierung der Standorte des Outdoor-Equipments verzichtet wird (die Zuordnung von Anschlüssen zu den Outdoor-Standorten ist für die Modellierung hinreichend), kann das Outdoor-Equipment gedanklich auf den MPoP Standort projiziert werden, um die dort relevante Schnittstellennachfrage (uplink) für die dort angesiedelten ROADM-DWDM Systeme bestimmen zu können. – Insofern erweitert sich der Informationsbedarf pro MPoP, um die kostentreibenden Informationen ableiten zu können. – Von der Berücksichtigung der MSAN-Architektur unberührt bleibt lediglich

die Channelbank basierte SDH-Verbindungsnachfrage. Die ChannelBank basierte Layer 2-Verbindungsnachfrage sowie FTTH/B Anschlusstypen münden in spezifischen Portnachfragen am ROADM-DWDM, da sie nicht mehr über eine weiter aggregierende Ethernet-Einrichtung zusammengefasst werden.

Sämtliche Nachfragen werden hierarchisch auf die nächst höhere Netzebene – in der Nomenklatur des Breitbandkostenmodells die Netzebene 2 – geführt. Entsprechend werden mit der MSAN-BNG-Architektur am MPoP keine Verkehrsrichtungen zu anderen Standorten gleicher Netzebene oder Zusammenschaltungspunkten berücksichtigt, wie dies in den Vorversionen des Breitbandkostenmodells der Fall war. Auch ist – wie in Abschnitt 4.3 ausgeführt – keine Anbindung an redundante Standorte vorgesehen. Nachfolgend ist die Modellierung und Systemzuweisung der MSAN ausgeführt, die ihrerseits die Grundlage für die Systemzuweisung der auf Layer 1 angesiedelten ROADM-DWDM Systeme bildet.

Modellierung der MSAN

Die bottom-up Modellierung bedarf neben der Zuordnung der Nachfrage auf Indoor- und Outdoor-Realisierung auch einer Referenzierung auf Anschlussprodukte. Mit anderen Worten, die derzeit realisierten Anschlüsse in Form von ADSL, VDSL, SDSL, PSTN etc. sind zu berücksichtigen. Für eine forward looking Betrachtung im Sinne der Breitbandentwicklung wird für den Outdoor-MSAN vectoringfähiges Equipment unterstellt, das sowohl noch bestehende ADSL-Anschlüsse als auch verschiedene VDSL-Geschwindigkeiten bedienen kann.

Bezüglich des Indoor-Equipments wird an einer Differenzierung von Schnittstellenkarten in Abhängigkeit der Anschlusstechnologie festgehalten, die dem Umstand Rechnung tragen soll, dass anschlussbezogen die Kosten für breitbandige Technologien höher sind als für schmalbandigere Anschlusstechnologien. Da die Kostenmodellierung Grundlage für Entgeltregulierungsentscheidungen mit einer überschaubaren zeitlichen Gültigkeitsdauer bilden soll und nicht zu erwarten ist, dass innerhalb der Gültigkeitsdauer der Entscheidung eine signifikante Migration zu den neuen (teureren)¹¹⁴ Anschlusstechnologien erfolgt, wird mit diesem Ansatz sichergestellt, dass mit dem Modell die marktrelevanten effizienten Kosten abgebildet werden. Im Modell erfolgt bei den Indoor-MSAN daher eine Differenzierung von Schnittstellenkarten für ADSL, VDSL 50, SDSL und PSTN/ISDN.

Im Rahmen des generischen Equipments sind spezifische Einrichtungen (PIU) für Indoor- und Outdoor-Equipment sowie die aufgeführten Schnittstellenkarten mit zugehörigen Portzahlen zu definieren. Dimensionierungsrelevant ist darüber hinaus die

¹¹⁴ Teurer bei gegebener Bandbreite. Letztlich ist nicht davon auszugehen, dass sämtliche Endkunden ihre Entscheidung über ein Anschlussprodukt von den durchschnittlichen Kosten pro Mbit/s der Anschlussleitung abhängig machen anstelle von dem zu zahlenden Gesamtbetrag für die Anschlussleitung.

Kapazität der netzseitigen Schnittstelle, die gemeinsam mit der maximalen Portzahl die Bestückung des MSAN mit Kundenanschlüssen limitiert.

Dem Modellierungsansatz liegt eine generische Darstellung der Verkehrsströme zu Grunde, die nachfolgend dargestellt wird. Dabei werden auf den unteren Netzebenen einzelne Verkehrsrichtungen obsolet, werden aber dennoch der Vollständigkeit halber an dieser Stelle dargestellt.

Für die Einrichtungen der unteren Netzebene an den MPoP-Standorten, an denen von unten die Verkehre aus dem Breitband-Teilnehmeranschlussnetz geführt werden, liegen aus der Dimensionierung Verkehrsflüsse in die verschiedenen Richtungen vor, die wie folgt indiziert werden:

- hierarchisch mit Index h_j mit $j=1,2..$ (bei Anbindung an zwei verschiedene Einrichtungen)¹¹⁵ zum zugehörigen oberen Knoten in der Hierarchie, wobei im Fall der MSAN-BNG-Architektur lediglich der Fall $j=1$ relevant ist
- Anzahl und Index (N_q) mit dem Verbindungen zu anderen Standorten in der gleichen- oder einem nicht zugeordneten Knoten in einer höherliegenden Ebene¹¹⁶; im Fall der MSAN-BNG-Architektur irrelevant
- i zu Zusammenschaltungspunkten (i für Interconnection)); ebenfalls im Fall der MSAN-BNG-Architektur irrelevant

Jede Netzkante des logischen Netzes wird durch folgende vier Vektoren beschrieben, vgl. auch Abbildung 7-3.

$$(7.1.1) \quad \begin{aligned} \boldsymbol{\lambda}_u^{(*)} &= (\lambda_{1,u}^{(*)}, \dots, \lambda_{k,u}^{(*)}, \dots, \lambda_{K,u}^{(*)}) \\ \boldsymbol{\lambda}_d^{(*)} &= (\lambda_{1,d}^{(*)}, \dots, \lambda_{k,d}^{(*)}, \dots, \lambda_{K,d}^{(*)}) \\ \mathbf{B}_u^{(*)} &= (B_{1,u}^{(*)}, \dots, B_{k,u}^{(*)}, \dots, B_{K,u}^{(*)}) \\ \mathbf{B}_d^{(*)} &= (B_{1,d}^{(*)}, \dots, B_{k,d}^{(*)}, \dots, B_{K,d}^{(*)}) \end{aligned}$$

mit

λ_u mittlere Paketrate upstream

λ_d mittlere Paketrate downstream

B_u mittlere Bandbreitenanforderung upstream

¹¹⁵ Bei Anbindung in nur eine Richtung ist der entsprechende Wert für $j=2$ auf Null zu setzen.

¹¹⁶ Wir vermuten, dass an den Einrichtungen des MPoP derzeit Querverbindungen nur in Ausnahmefällen eingerichtet werden, da die entsprechenden Verkehre zunächst in Einrichtungen höherer Ebene zu konzentrieren sind, halten aber diese Möglichkeit im Modell fest.

B_d mittlere Bandbreitenanforderung downstream

Mit (*) werden die verschiedenen Ziele beschrieben:

(*) = (hj) hierarchische Netzkante $j=1$ oder $j=1,2..$

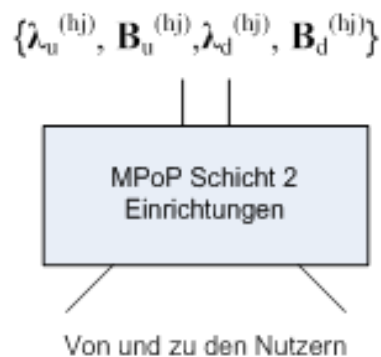
(*) = (qn) n-te Quernetzkante, $n=1..Nq$

(*) = (i) Netzkante zum Zusammenschaltungspunkt (Interconnection Point)

Hinsichtlich der Verkehrsziele zu Zusammenschaltungspunkten wird eine Differenzierung vorgenommen, die eine Unterscheidung der verschiedenen Zusammenschaltungsverkehre¹¹⁷ erlaubt. Es sind dabei die folgenden Verkehrsströme zu unterscheiden:

- Bitstromzugang
- TDM-basierte Zusammenschaltung
- IP-basierte Zusammenschaltung

Abbildung 7-3: Schematische Darstellung für die MPoP-Einrichtungen (Ebene 0)



Die Investitionen für die teilnehmeranschließenden Einrichtungen der untersten Netzebene werden durch folgende Parameter modelliert:

- Anzahl der Einrichtungen (Einschübe/Plug in Units PIU)
- Anzahl der Racks
- Anzahl der verschiedenen Schnittstellenkarten und Ports

¹¹⁷ Darunter fassen wir hier auch den Verkehr aus Bitstromzugängen, die korrekt mit Netzzugang und nicht Zusammenschaltung bezeichnet werden.

In Bezug auf die Bestimmung der netzseitigen Schnittstelle des teilnehmeranschließenden Equipments wird an dem Modellierungsansatz der Vorgängerversionen dieses Breitbandkostenmodells festgehalten. Die Anzahl der Einrichtungen hängt von den Kapazitätsgrenzen einer Einrichtung ab.

Anders als im Fall des Konzentrations- bzw. Kernnetzes, wo Nachfragereserven unter Rückgriff auf globale Mark-up-Faktoren berücksichtigt werden, ist im Anschlussnetz eine Portreserve (pro Schnittstellenkarte) vorzuhalten, die über Eingabeparameter festgelegt werden kann. Ein globaler Mark-up-Faktor findet bei der Dimensionierung der netzseitigen Schnittstelle am MSAN Anwendung.

Folgende Parameter sind bei der Dimensionierung zu berücksichtigen:

(7.1.2)	$\max\lambda$	maximale zu verarbeitende Paketrate
	$\max LC$	maximale Anzahl der Schnittstellenkarten (LC, Linecards)
	$\max Ports$	maximale Anzahl an Ports je Schnittstellenkarte

Die entsprechenden Werte für den totalen Paketfluss λ_{tot} und die totale Bandbreite B_{tot} berechnen sich damit zu

$$(7.1.3) \quad \lambda_{tot} = \sum_{k=1..K} g_k^\lambda \{ (\sum_{j=1,2..} \lambda_{uk}^{(hj)} + \lambda_{dk}^{(hj)}) + (\sum_{n=1..Nq} \lambda_{uk}^{(qn)} + \lambda_{dk}^{(qn)}) + \lambda_{uk}^{(i)} + \lambda_{dk}^{(i)} \}$$

$$B_{tot} = \sum_{k=1..K} g_k^B \{ \sum_{j=1,2..} \max(B_{uk}^{(hj)}, B_{dk}^{(hj)}) + \sum_{n=1..Nq} \max(B_{uk}^{(qn)}, B_{dk}^{(qn)}) + \max(B_{uk}^{(i)}, B_{dk}^{(i)}) \}$$

mit

g_k^λ mark up Faktor für den Paketstrom der k-ten Verkehrsklasse

g_k^B mark up Faktor für die Bandbreite aus der k-ten Verkehrsklasse

Die Anwendung eines für Verkehrsklassen spezifischen Mark-up Faktors erfolgt, wie in Abschnitt 4.4 ausgeführt, sofern er den sonst relevanten globalen Zuschlagsfaktor übersteigt.

Die Berechnung der Anzahl der Schnittstellenkarten hängt von dem Grad der Zusammenfassung der verschiedenen Verkehrsströme ab. Dabei können folgende Randlösungen unterschieden werden:

- In einem Extrem werden alle Verkehrsströme zusammengefasst und eine Qualitätsdifferenzierung erfolgt innerhalb der Einrichtungen auf der Basis von separierten Warteschlangen und einer Entnahme der Pakete durch Prioritäts- oder Gewichtsmechanismen (Weighted Fair Queuing, kurz: WFQ).

- Im anderen Extrem erfolgt die Differenzierung durch vollständige Trennung und Führung der Verkehrsströme auf separierten Schnittstellenkarten für jede Verkehrsklasse.
- Zwischen beiden Lösungen können Teile der Verkehrsströme aus verschiedenen Klassen zu Gruppen zusammengefasst werden.

Im Kostenmodell Breitbandnetz gehen wir von einem Prioritäts- bzw. WFQ-Mechanismus aus und nehmen damit eine Zusammenfassung aller Verkehrsströme vor,¹¹⁸ wobei die entsprechende QoS-Differenzierung durch die Mark-up Faktoren Berücksichtigung findet.

Die Anzahl der Schnittstellenkarten hängt von deren maximalen Kapazitäten ab, die – wie in Abschnitt 7.1.1 zum generischen Equipment ausgeführt – über Inputparameter spezifiziert sind. Im Modell wird so vorgegangen, dass ausgehend von den im Kostenmodell Breitbandnetz vorgesehenen Kapazitätsstufen $\beta=1\dots B$ für jede Kapazitätsstufe die Anzahl der Ports berechnet werden. Die Anzahl der Schnittstellenkarten bemisst sich dabei nach Maßgabe der benötigten Ports und zugehörigen Kapazitäten. Die Auswahl erfolgt dann durch entsprechende Kostenvergleiche, wobei für jede Schnittstellenkarte ein einheitlicher Typ von Portgröße angenommen wird¹¹⁹. Ergänzend sei nochmals betont, dass die für jede Verkehrsrichtung gemeinsame Ports genutzt werden können, und auf einer Linecard Ports mit verschiedenen Verkehrsrichtungen belegt werden können.

Damit ergibt sich folgendes Modell, das zur Festlegung des Typs und der Anzahl der Ports (und damit indirekt Schnittstellenkarten) anzuwenden ist:

- für jede Verkehrsrichtung wird die Bandbreite herangezogen (auf Ebene 0 nur h_j
 $B^{(*)} = \max(B_u^{(*)}, B_d^{(*)})$
mit $B^{(*)} =$ mittlere Bandbreitenanforderung in Richtung (*)
- es erfolgt die Auswahl der LineCards nach Maßgabe der Porttypen sowie der benötigten Anzahl an Ports unter Berücksichtigung der kostenminimalen Lösung
- es erfolgt im Anschluss die Auswahl der Plug-in-Unit (dies können in Abhängigkeit der Portnachfrage und Verkehrsvolumina auch mehrere sein)

¹¹⁸ Die Zusammenfassung der Verkehrsströme ist immer dann möglich, wenn die Verkehre das gleiche Ziel (im Sinne von nächstem Netzknoten) haben.

¹¹⁹ Das Modell kann ggf. auch auf gemischte Typen von Karten ausgeweitet werden, um eine Feinoptimierung zu betrachten. Wir gehen zunächst im Kostenmodell Breitbandnetz von Karten mit der gleichen Kapazität für jede Richtung aus.

Modellierung der OLT

Für die bottom-up Modellierung der ROADM-DWDM Einrichtungen am MPoP bedarf es auch der Bestimmung der Anzahl von OLT. Zu diesem Zweck ist ein Modellierungsansatz vorgesehen, der neben Anschlusszahlen und der Equipment-Spezifikation auch auf die Angabe eines Konzentrationsverhältnisses zurückgreift.

Channelbank basierte Schnittstellennachfrage

Zur Bestimmung der von Channelbanks stammenden Schnittstellennachfrage wird auf den bestehenden Modellierungsansatz zurückgegriffen, wie er in Anlage 3 zum Analytischen Kostenmodell für das Breitbandnetz beschrieben wird.

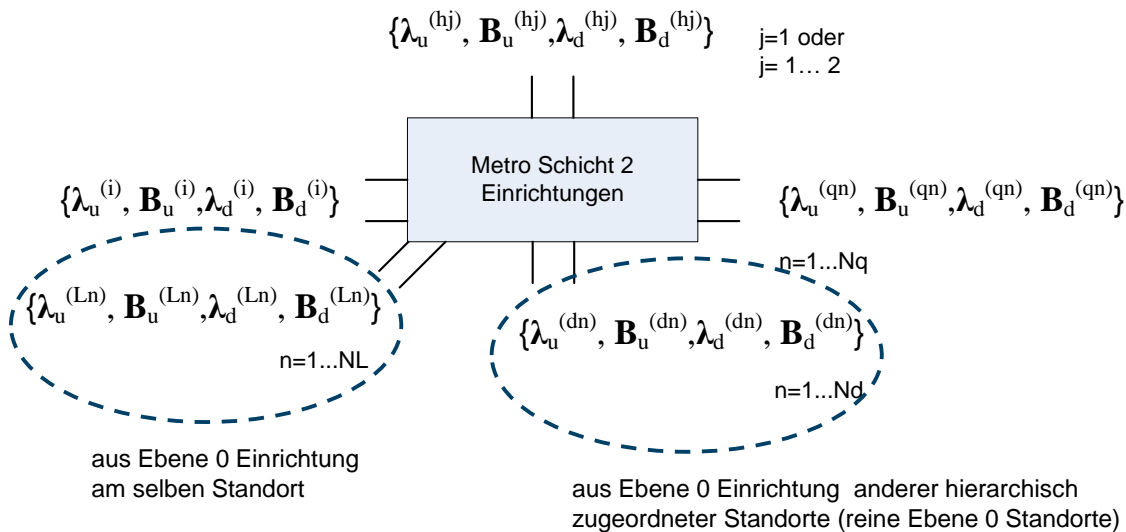
7.2.3 Ebene 2 – Systemzuweisung

Metro-Konzentratoren bzw. Metro-Switches (im folgenden Metro-Einrichtungen) werden in einem zweistufigen Konzentrationsnetz in Standorten der oberen Ebene installiert. In der hier modellrelevanten BNG-Architektur sind sie der Ethernet-Teil des BNG

Sämtliche Schnittstellenkarten der Metro-Einrichtungen sind entweder den zugehörigen unteren Knoten und den Konzentratoren, die am gleichen Standort installiert sind, oder den netzseitig angesiedelten Knoten zuzuordnen, woraus sich $n=1\dots Nd$ (Metro distance) und $n=1\dots ML$ (Metro internal) zusätzlich Vektoren ergeben, deren Schnittstellenkarten schon in den MPoP berechnet wurden¹²⁰. In der nachfolgenden Abbildung 7-4 sind die Schnittstellen zu den standortinternen Ebene 0 Einrichtungen mit der linken, gestrichelten Ellipse sowie die zu den „standortentfernten“ reinen Ebene 0 Einrichtungen mit der rechten Ellipse kenntlich gemacht.

¹²⁰ Man beachte, dass die Bandbreitenanforderungen aus Md-Schnittstellenkarten, die von MPoP aus den unteren Standorten resultieren, über die physikalische Netzschicht geführt werden, während die Bandbreitenanforderungen aus MPoP-Einrichtungen am gleichen Standort mit Mi-Schnittstellenkarten über interne (lokale) Verbindungen innerhalb- oder zwischen den Racks geführt werden.

Abbildung 7-4: Schematische Darstellung der Ebene 2 Einrichtungen



Damit ergeben sich für die mittlere Bandbreite \mathbf{B} und mittlere Paketrate λ die vier Vektoren wie in (7.1.1). Die in Abbildung 7-4 dargestellten Verkehrsrichtungen sind nachfolgend erläutert:

(*) = (dn) hierarchische Netzkante von unteren Standorten $n=1 \dots N_d$
(**d** für **d**istant)

(*) = (Ln) hierarchische Netzkante von Ethernet-Konzentrator-Einrichtungen am gleichen Standort mit $n=1 \dots N_L$ (interne Verbindungen mit (**L** für **L**ocation))

(*) = (hj) hierarchische Netzkante zu oberen Standpunkten $j=1$ oder $j=1,2$,
(diese führen beim BNG in seinen LER-Teil)

(*) = (qn) n-te Quernetzkante, $n=1 \dots N_q$ (hier nicht vorgesehen)

(*) = (i) Netzkante zum Zusammenschaltungspunkt (Interconnection Point), hier für den L2 Bitstrom

Zur Investitionswertbestimmung für die 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 (7.1.2) formuliert).

Die Nachfrage nach Ports, die auf die Schnittstellenkarten entfällt, setzt sich zusammen aus den, auf das jeweilige IP-PoP-Cluster entfallenden MPoP mit ihren Schnittstellennachfragen aus den

- MSAN, differenziert nach 1G und 10G Schnittstellen,
- OLT, differenziert nach 1G und 10G Schnittstellen sowie
- Layer 2 Channelbanks, ebenfalls differenziert nach 1 G und 10G.

Sofern die Bestückung der kleinsten PIU nicht ausreichend ist, die nachgefragten Ports anzuschalten, wird die nächst größere gewählt. Ist selbst die größte nicht ausreichend, wird diese vervielfacht. Dieses wurde im Rahmen der Berechnungen ebenfalls standortgenau vollzogen.

In der BNG-Architektur finden darüber hinaus folgende Restriktionen Berücksichtigung:

- die maximale Anzahl von Teilnehmern, die auf einen BNG geschaltet werden kann;
- Berücksichtigung einer Portreserve
- die maximale Anzahl von aufgeschalteten Indoor-MSAN; sofern der Indoor-MSAN POTS Kunden realisiert, kann über einen weiteren Inputparameter die Anzahl der anschaltbaren Indoor-MSAN beschränkt; sowie
- die maximale Anzahl der insgesamt aufschaltbaren MSAN pro BNG; [MSAN/BNG].

Um diese Restriktionen einzuhalten, werden bei der Systemzuweisung die initial dimensionierten BNG Einrichtungen erhöht, um die Einhaltung der genannten Nebenbedingungen zu gewährleisten.

Aus der ermittelten Anzahl der verschiedenen Typen werden die benötigten Racks abgeleitet. Auf Basis des so ermittelten Mengengerüsts werden die Gesamtkosten für den BNG ermittelt und unter Rückgriff auf die mit den Anschlüssen realisierte Verkehrsnachfrage (aggregierte busy hour Nachfrage) in Kosten pro Mbit/s umgerechnet.

Zusammenfassend ergeben sich dann das Mengengerüst und die zugehörigen Investitionsbeträge für PIU, LineCards und Racks.

Die Verbindung von den Metro-Einrichtungen zu den IP-Kernnetzeinrichtungen auf Ebene 3 erfolgt im allgemeinen Fall durch interne Verbindungen innerhalb des Ebene 2/3 Standortes, im Fall des BNG im selben Gerät. Weil Querverkehr zwischen den BNG eines Standortes in dieser Architektur nicht vorgesehen ist, muss dieser mit dem Verkehr in das IP-Netz zum LSR über die hierarchische Schnittstelle nach oben (Ln) geführt werden und über diese an den anderen BNG (Ob im selben oder einem anderen Standort) gelangen..

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).
- 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 Flussvektoren aus den hier vier Verkehrsrichtungen, die auch in Abbildung 7-5 dargestellt sind, wobei die Werte der vier Flussvektoren aus dem Modell für die Dimensionierung bekannt sind. Dabei stellt **B** wieder die mittlere Bandbreite und **λ** mittlere Paketrade dar, **u** steht für den up- und **d** für den downstream.

Label-Edge Router treten in diesem Modellrelease Version 2.3 in zwei Ausführungen auf, entweder konventionell als LER alleine (z.B. für Netzübergänge in andere Netze) oder integriert in Form des BNG, der weitere Funktionen aufweist (BRAS, Radius, L2 Aggregationsswitch). Für den Label Edge Router in Form des BNG ergeben sich die in Abbildung 7-5 dargestellten Verkehrsrichtungen:¹²¹

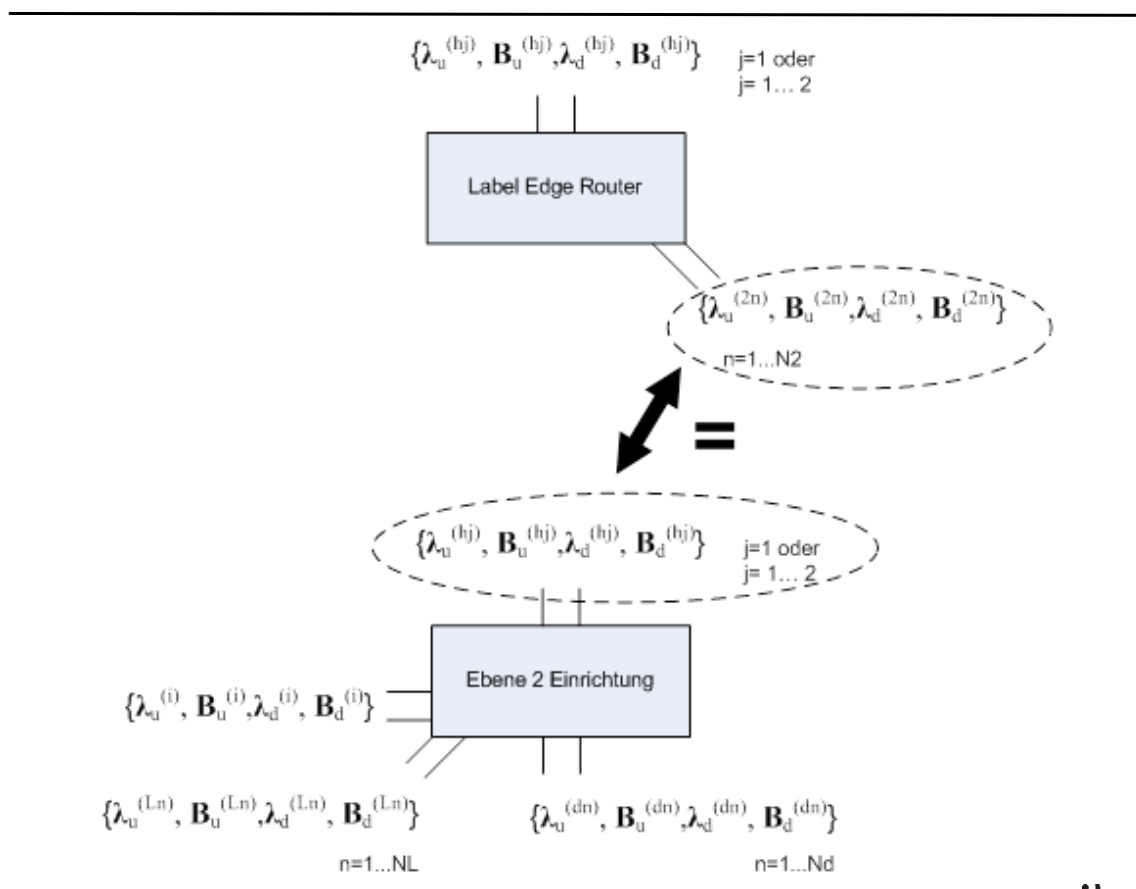
(*) = (2n) interne Verbindung von und zur L2-Einrichtung am gleichen Standort n=1...
N2 (bei BNG geräteintern)

(*) = (hj) hierarchische Netzkante bzw. interne Verbindung zu und von Transit-Routern
j=1 oder j=1,2, bei Doppelanbindung

In der BNG-Architektur entfallen aufgrund des Verzichts auf eine vollständige Aggregation die Ausführung der Verkehre zu Diensteservern (S_n) sowie zu Zusammenschaltungspunkten (Bitstrom, TDM-IC, IC für VoIP sowie IP-Interconnection [Transit/Peering]) (Abbildung 7-5).

¹²¹ Das Modell geht davon aus, das Edge-Router immer an Transit-Router angeschlossen werden und damit keine Querwege zwischen Edge Routern aufkommen.

Abbildung 7-5: Schematische Darstellung für die Edge-Router-Einrichtungen und Anbindung der Ebene 2 Einrichtung (in BNG integriert)



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

Die Anzahl der Einrichtungen hängt wieder von den Kapazitätsgrenzen der Einrichtungen ab, wie schon in (7.1.2) formuliert. Allerdings ist zu beachten, dass unter einer entsprechenden 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, woraus folgt:

$$\begin{aligned}
 (7.1.4) \quad \lambda_{tot} &= \sum_{k=1..K} g_k^\lambda \{ (\sum_{j=1,2..} \lambda_{uk}^{(hj)} + \lambda_{dk}^{(hj)}) + (\sum_{n=1..N2} \lambda_{uk}^{(2n)} + \lambda_{dk}^{(2n)}) + \\
 &\quad (\sum_{n=1..NS} \lambda_{uk}^{(Sn)} + \lambda_{dk}^{(Sn)} + \lambda_{uk}^{(i)} + \lambda_{dk}^{(i)}) \} \\
 B_{tot} &= \sum_{k=1..K} g_k^B \{ \sum_{j=1,2..} \max(B_{uk}^{(hj)}, B_{dk}^{(hj)}) + \sum_{n=1..N2} \max(B_{uk}^{(2n)}, B_{dk}^{(2n)}) + \\
 &\quad \sum_{n=1..NS} \max(B_{uk}^{(Sn)} + B_{dk}^{(Sn)}) + \max(B_{uk}^{(i)}, B_{dk}^{(i)}) \}
 \end{aligned}$$

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 5 – Systemzuweisung

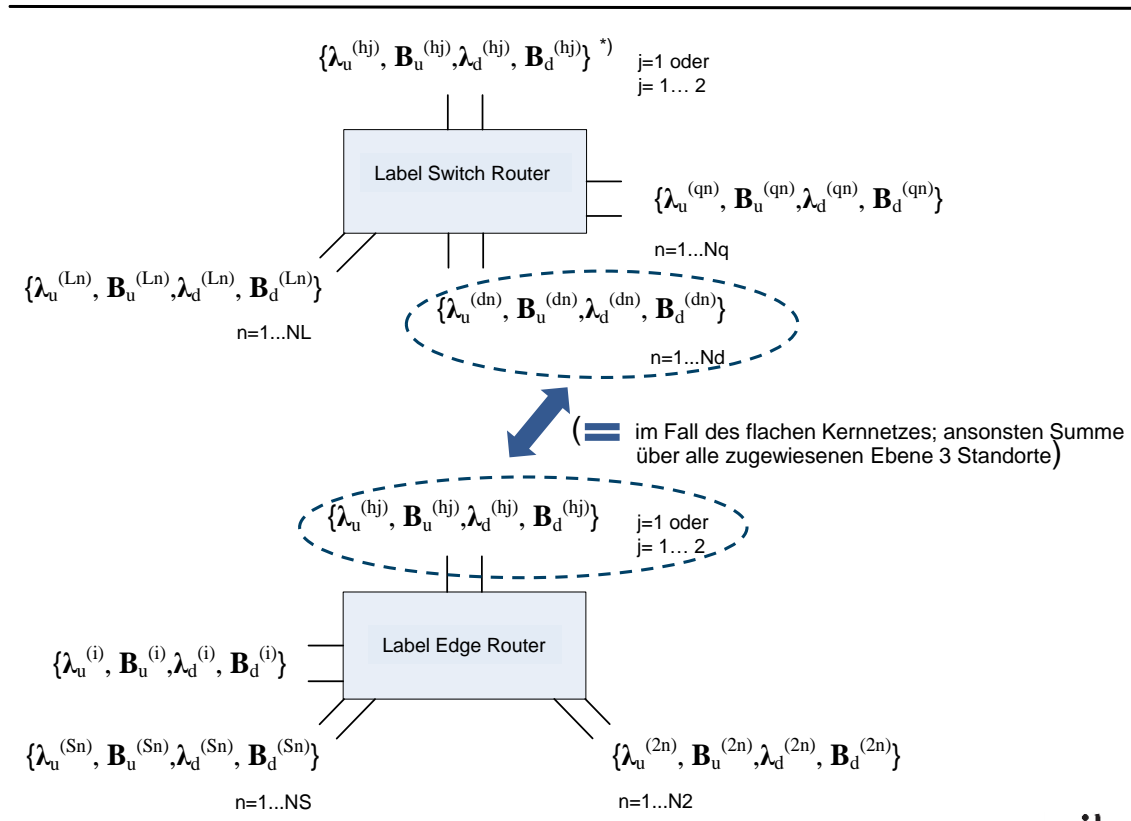
Auf Ebene 5 sind als Ebenen spezifische Einrichtungen Label Switch Router (LSR) vorgesehen, die eine reine Transit-Funktion übernehmen. An einem LSR werden ausschließlich Verkehre und damit zugehörige Flussvektoren aus zugehörigen Edge-Routern oder von anderen Transit-Routern aufkommen, deren Werte aus 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. Dies ist schematisch in der nachfolgenden Abbildung 7-6 dargestellt, wo in der unteren Hälfte der Abbildung nochmals die LER Einrichtung dargestellt ist und durch die beiden Ellipsen die verbindende Kante mit den zugehörigen Flussvektoren dargestellt ist. Im Fall eines flachen 1-Ebenen Kernnetzes besteht sogar eine vollständige Übereinstimmung der Verkehrsvolumina, da es sich um die standortinterne Anbindung handelt.

Die in Abbildung 7-6 dargestellten Verkehrsrichtungen (*) lassen sich wie folgt beschreiben:

- (*) = (dn) Netzkanten von Label Edge Router Einrichtungen an Standorten der unteren Ebene $n=1 \dots N_d$
- (*) = (qn) Netzkanten zu anderen Transit-Router Einrichtungen mit $n=1 \dots N_q$ (im Falle eines 2 Ebenen Kernnetzes)
- (*) = (hj) hierarchische Netzkante bzw. interne Verbindung zu und von LSR $j=1$ oder $j=1,2$, bei Doppelanbindung (im Falle eines 3 Ebenen Kernnetzes)
- (*) = (Ln) interne Verbindungen zu Edge-Router Einrichtungen, die mit den Transit-Router-Einrichtungen am gleichen Standort kolloziert sind.

Abbildung 7-6: Schematische Darstellung für die Label Switch Router-Einrichtungen mit Anbindung des LER



Die entsprechenden Paketflüsse ergeben sich – wie auch bei den Edge-Router-Einrichtungen – aus der Summe aller ankommenden und abgehenden Paketflüsse, woraus folgt:

$$(7.1.5) \quad \lambda_{tot} = \sum_{k=1..K} g_k^\lambda \{ (\sum_{j=1,2..} \lambda_{uk}^{(hj)} + \lambda_{dk}^{(hj)}) + (\sum_{n=1..Nd} \lambda_{uk}^{(dn)} + \lambda_{dk}^{(dn)}) + (\sum_{n=1..NI} \lambda_{uk}^{(ln)} + \lambda_{dk}^{(ln)}) + (\sum_{n=1..Nq} \lambda_{uk}^{(qn)} + \lambda_{dk}^{(qn)}) \}$$

$$B_{tot} = \sum_{k=1..K} g_k^B \{ \sum_{j=1,2} \max(B_{uk}^{(hj)}, B_{dk}^{(hj)}) + \sum_{n=1..N2} \max(B_{uk}^{(dn)}, B_{dk}^{(dn)}) + \sum_{n=1..NI} \max(B_{uk}^{(ln)}, B_{dk}^{(ln)}) + (\sum_{n=1..Nq} B_{uk}^{(qn)} + B_{dk}^{(qn)}) \}$$

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 Transportnetzteil 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 0-2, 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.

Aufgrund des generischen Equipments spielen die unterschiedlichen Bandbreitenanforderungen in Konzentrations- und Kernnetz eine untergeordnete Rolle, da bei der Systemzuweisung eine „Selbst-Selektion“ des passenden Equipments erfolgt. Gleiches gilt auch für die Verwendbarkeit von ROADM und OXC Einrichtungen hinsichtlich des Knotengrades.

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.

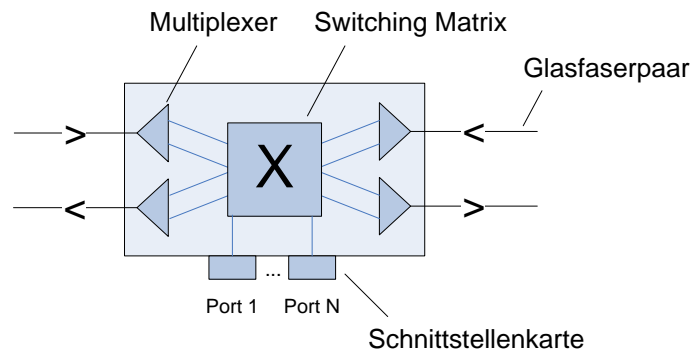
Mit Zunahme der Bandbreitenanforderungen wurden diese Einrichtungen weiter entwickelt und die neueren Systeme gestatten es, optische (weiße) Signale ein- bzw. auszuführen und ihnen innerhalb der Einrichtung eine Wellenlänge (Farbe) zuzuordnen. Damit können optische Signale aus der logischen Transportschicht direkt an die entsprechenden Schnittstellenkarten des OADM angeschlossen werden.

Die OADM haben den Nachteil, dass die Zuweisung der Kapazitäten durch Portzuordnung „hardwaremäßig“ (d.h. unflexibel) festgelegt ist. Für den Fall einer Rekonfiguration der Kapazitäten oder einer dynamischen Zuweisung von Kapazitäten („Bandwidth on Demand“) müssen Umgruppierungen auf manueller Basis durch entsprechendes Servicepersonal erfolgen. Um die Flexibilität der Einrichtungen zu erhöhen, wurden sog. rekonfigurierbare ADM (RADM bzw. ROADM auf optischer Basis) entwickelt. Abbildung 7-7 zeigt den schematischen Aufbau eines 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

	Elektrische Ports	Elektrische Ports	Optische Ports
Feste Zuordnung	ADM	NG-ADM	OADM
Rekonfigurierbare Zuordnung	RADM	NG-RADM	ROADM
Derzeitige Portsignale	E1,E3,E4,STM-N N=1, ,4, 16, 64	10ME, 100ME. Fiber channel ..	GbE, 10GbE, OTN n=1,2,3,4

Abbildung 7-7: Schematischer Aufbau eines RADM 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 sechs 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 Modellanwender 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)¹²²

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 zu einer Gesamtnachfrage (nach Maßgabe der vorgelagerten Layer 1 Channelbanks) 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.

Damit ergibt sich für die Berechnung der Anzahl der Schnittstellenkarten und der totalen Bandbreite im Ringstandort i in einer Ringtopologie:

$$(7.2.1) \quad nLC_i = \sum_{j=1\dots J} nLC_{ij}$$

$$BW_{totR} = mult \cdot \sum_{i=1\dots M} \sum_{j=1\dots Ni} nLC_{ij} \cdot BWLC_j$$

$$nADM_i = [n_i / maxnLC]$$

$$nfip = 2 \cdot [BW_{totR} / maxBW]$$

mit

nLC_i	Anzahl der Schnittstellenkarten im Ringstandort i
nLC_{ij}	Anzahl der Schnittstellenkarten vom Typ j im Ringstandort i
$BWLC_j$	Bandbreite der Schnittstellenkarte vom Typ j
mult	Multiplier (z.B. 0,5 für den Fall eines 50% Schutz im Störfall und 1 bei 100%)

¹²² 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.

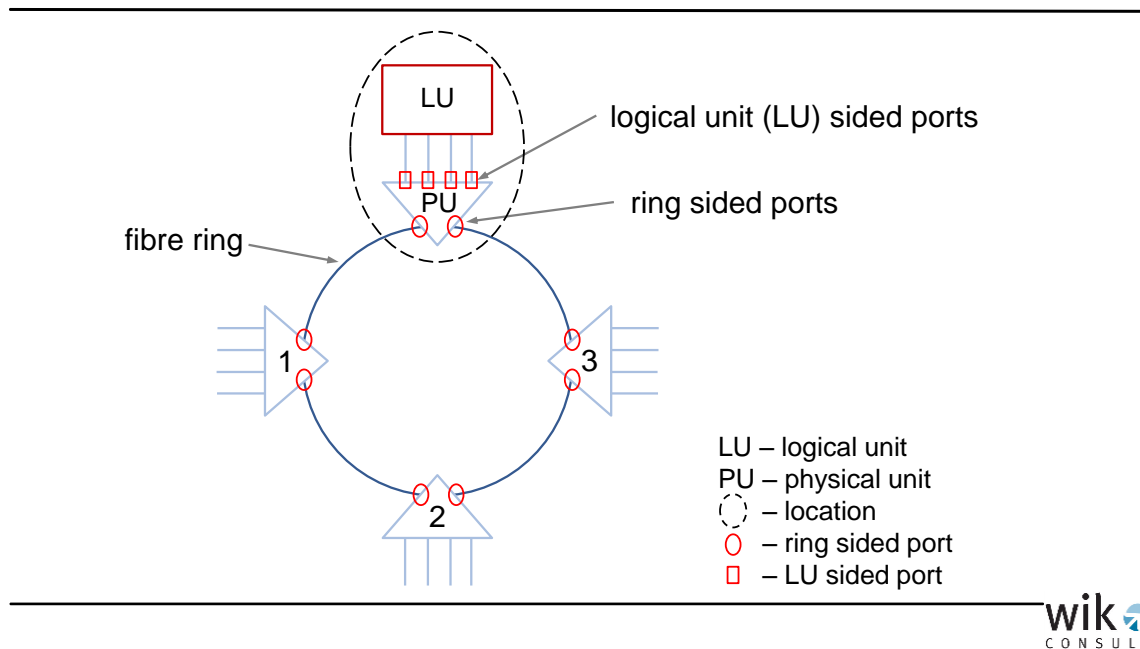
BW _{totR}	totale Bandbreite, die im Ring transportiert wird
maxnLC	maximale Anzahl der Schnittstellenkarten für eine ADM Einrichtung
nADM _i	Anzahl der ADM Einrichtungen im Ringstandort ¹²³ i
maxBW	maximale Bandbreite eines Glasfaserrings
nfip	Anzahl der Glasfaserpaare (fibre pairs) im Ring

Im Unterschied zu den Layer 2 und Layer 3 Einrichtungen kann in der Regel davon ausgegangen werden, dass die Anzahl der Ports je Linecard der Anzahl der Ports je Richtung entspricht. Es besteht aber auch im Modell prinzipiell die Möglichkeit, eine LineCard mit Ports unterschiedlicher Richtungen zu bestücken. Dies erfolgt dann im Rahmen der Modellparametrisierung.

Die nachfolgende Abbildung 7-8 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 (ring protection [ringprot], siehe Anhang 7.4.2) beträgt diese 50% oder 100% der Kapazitätsnachfragen der hier dargestellten 3 Standorte. Die Summe der am übergeordneten Standort ausgehenden Schnittstellen (logical unit sided ports) entspricht der Summe der hierarchischen Ports über alle untergeordneten Standorte.

¹²³ Wir gehen von der Annahme aus, dass in einer Ringtopologie in allen Glasfaserringen die ADM Einrichtungen des gleichen Typs verwendet werden.

Abbildung 7-8: 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 Bank¹²⁴ der hier in Abbildung 7-8 dargestellten Layer 1 Einrichtung vorgeschaltet und standortintern an diese angeschlossen.

Die Investitionen einer Ringtopologie setzen sich zusammen aus den Investitionen für die¹²⁵

- ADM-Einrichtungen
- Glasfaserkabel
- Leerrohre und Gräben.

¹²⁴ Da die Kosten einer spezifischen Layer 1 Nachfrage keine Zielgröße der Modellierung sind, bleibt bei der Systemzuweisung die Channel Bank unberücksichtigt.

¹²⁵ 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 Repeater.

Die Kostenkomponenten einer Ringtopologie ergeben sich dann zu:

$$(7.2.2) \quad IADM_R = \sum_{i=1..M} (\sum_{j=1..J} cuLC_j \cdot nLC_{ij}) + cuADM(BW) \cdot nADM_i$$

$$Icab_R = cucab(nfip) \cdot M \cdot Lsec$$

$$linfra_R = (cutrench + cutub) \cdot M \cdot Lsec$$

mit

M	Anzahl der Ringstandorte
$IADM_R$	Investitionen für die ADM-Einrichtungen eines Rings
$cuLC_j$	Einheitskosten für eine Schnittstellenkarte vom Typ j
$cuADM(BW)$	Einheitskosten für eine ADM-Einrichtung mit Bandbreite BW
$Icab$	Investitionen für das Kabel eines Ringes
$cucab(nfip)$	Einheitskosten pro km für ein Kabel mit nfip
Lsec	mittlere Länge in km eines Ringabschnittes ¹²⁶
linfra	Kosten der Infrastruktur eines Rings
cutrench	Einheitsgrabkosten pro km
cutub	Einheitskosten für das Leerrohr pro km
$Itot_R$	Gesamtinvestitionen eines Rings

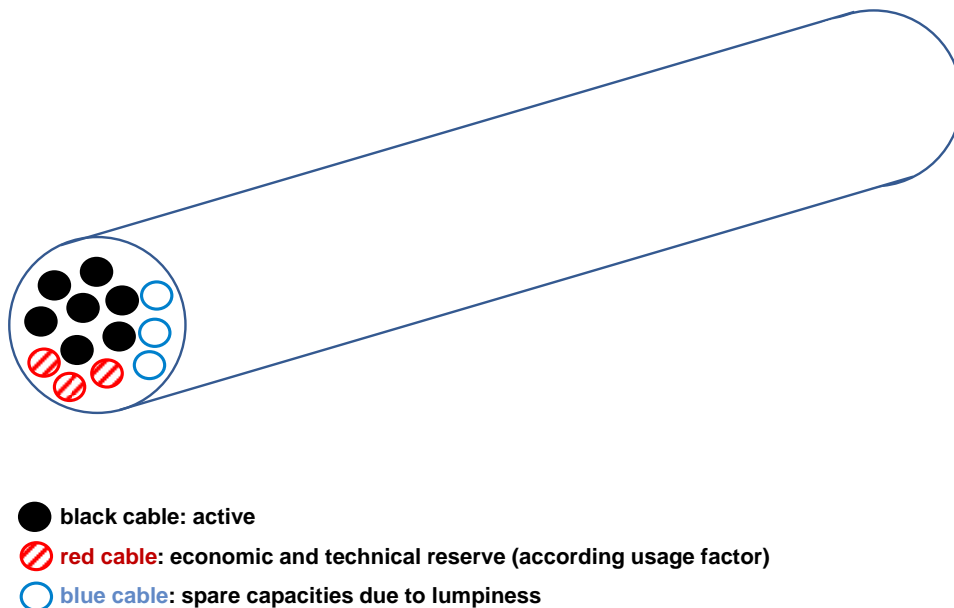
Damit ergeben sich als Investitionen für die Realisierung eines Rings

$$(7.2.3) \quad Itot_R = IADM_R + Icab_R + linfra_R$$

Für die Bestimmung der Kabelinvestitionen in einem Ring ist zu beachten, dass auch bei der Dimensionierung der Kabel eine Reserve Berücksichtigung findet, die sowohl die ökonomische als auch die technische Reserve beinhalten soll. Diese Reserve fließt in Form eines Zuschlagfaktors bei der Systemzuweisung ein und es kommt dann das Kabel zur Anwendung, dessen Paarigkeit gerade hinreichend ist. Damit verbunden ist letztlich auch eine weitere, aus Unteilbarkeiten resultierende Reserve. Diese Zusammenhänge sind in der nachfolgenden Abbildung 7-9 illustriert.

¹²⁶ Die mittlere Länge eines Kabelabschnittes im Ring berechnet sich aus der Summe der tatsächlichen Längen (Luftlinienentfernung * Umwegfaktor) über alle Kabelabschnitte des betrachteten Rings.

Abbildung 7-9: Auswahl des Kabeltyps und zu berücksichtigende Größen



7.3.2 Systemzuweisung und Investitionswertbestimmung in vermaschten Topologien (flache Kernnetzebene)

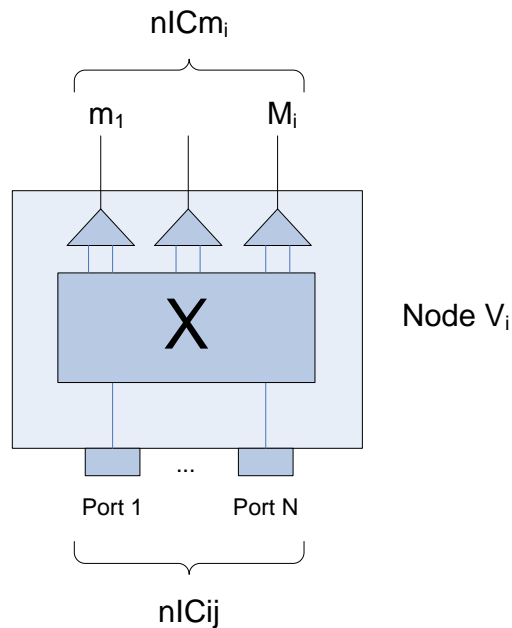
In der vermaschten Topologie der flachen Kernnetzebene lassen sich die Standorte (Knoten) durch die Anzahl der physikalischen Verbindungen (Kanten) des Standortes klassifizieren (Knotengrad). Dabei sind Knoten mit einem Knotengrad zwei von Knoten mit einem Knotengrad größer zwei zu unterscheiden¹²⁷.

Traditionell können in Knoten mit Knotengrad zwei ADM-Einrichtungen (ROADM) eingesetzt werden, während Knoten mit einem Knotengrad größer zwei bisher Cross-Connectoren erforderten, vgl. [Alcatel-03]. Allerdings kann ein Cross-Connector als ein ROADM mit multiplen Richtungen betrachtet werden, vgl. [Bernhey-07], [Tellabs-09] und Abbildung 7-10. Bei der Spezifikation der Ausgangsparametrisierung bildet bei dem generischen Equipment die Zahl der Richtungen ein Leistungsmerkmal der Einrichtung, welches bei der Systemzuweisung in einem Knoten Berücksichtigung findet. Im Falle von CDWDM sind diese durch entsprechende Cross-Connector Einrichtungen anzubinden. Dabei werden die Router/ Switches eines Standortes direkt auf Farben (Wellenlängen) eingekoppelt. Diese Vorgehensweise ist sinnvoll, da es sich ja bereits

¹²⁷ 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).

um hochaggregierten Verkehr handelt. Bei Einsatz von OTN werden OTN-LineTerminal (LT) eingesetzt, um die logischen Einrichtungen an die OXC anzubinden.¹²⁸

Abbildung 7-10: Schematischer Aufbau eines multidirektionalen (mit mehr als zwei Richtungen) ROADM



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

¹²⁸ SDH-LineTerminal kommen für die Modellierung der Channelbanks (Verbindungsnachfrage auf Layer 1) zum Einsatz. Siehe hierzu Anlage 3.

Die grundlegenden Daten, die aus der Dimensionierung der logischen Transportschicht sowie der Mietleitungsnachfrage (Layer 1) vorliegen, sind:

- $nPorts_{ij}$ Anzahl der Schnittstellenkarten vom Typ j im Kernnetzstandort i für die im Standort endenden Bandbreitenanforderungen
- $nPorts_{mj}$ Anzahl der Schnittstellenkarten vom Typ j , die für die Bandbreitenanforderungen auf der m -ten Netzkante des Kernnetzes benötigt werden.

Sei im Folgenden eine physikalische Netzkante e_m aus der Topologie des Kernnetzes durch ihre beiden inzidenten Knoten bestimmt und die Menge der Kanten m , die mit einem Knoten v_i inzident sind, mit Γ_i bezeichnet. Daraus folgt (vgl. [Berge-73]):

$$e_m = \{v_{m1}, v_{m2}\}$$

$$\Gamma_i = \{e_m / v_{m1} = v_i \text{ oder } v_{m2} = v_i\}$$

mit

e_m physikalische Netzkante

v_{m1} und v_{m2} die beiden sich bestimmenden Knoten

Γ_i Menge der Kanten m die mit einem Knoten v_i inzident sind

Damit ergibt sich in einem Knoten (Standort) v_i für die Anzahl der Schnittstellenkarten, deren Bandbreite, die Anzahl der OXC $n^{\circ}CX_i$ und der Glasfaserpaare $nfip_m$ auf der Kante e_m zu:

$$(7.2.4) \quad nLC_i = \sum_{j=1..J} (nPorts_{ij} + \sum_{e_m \in \Gamma_i} nLC_{mj}) / \max nPorts$$

$$BW_{tot_i} = \sum_{j=1..J} (nPorts_{ij} + \sum_{e_m \in \Gamma_i} nLC_{mj}) \cdot BW_{LC_j}$$

$$nOXC_i = \max\{[n_i / \max nLC], [BW_i / \max BW]\}$$

$$nfip_m = \sum_{j=1..J} nPorts_{mj}$$

$$nreg_{mj} = \sum_{j=1..J} nPorts_{mj} \cdot \text{Int}\{[l_m / (\max reg_l_j + \epsilon)]\}^{129}$$

129 $\text{Int}\{x\}$ bedeutet auf den entsprechenden ganzzahligen Wert abrunden; Beispiel $\text{Int}\{1,2\} = 1$ und $\text{Int}\{0,8\} = 0$

mit

n_{OXC_i}	Anzahl der OXC im Knoten v_i
nf_{ip_m}	Anzahl der Glasfaserpaare auf der m-ten Kante
$nreg_{mj}$	Anzahl der Signalregeneratoren vom Typ j auf der Netzkante e_m
$maxregL_j$	maximale Länge, die ein Übertragungssystem vom Type j ohne Signalregenerierung überbrücken kann
ε	Nächsthöchstes Wert für die Toleranz bei Überschreitung der Maximallänge, z.B. 0,1 km

Die Zahl der jeweiligen Linecards ergibt sich auch hier über die benötigten Ports und die Anzahl Ports je Linecard unter Berücksichtigung der in der Systemzuweisung hinterlegten, verfügbaren Systeme nach Maßgabe der jeweils benötigten Kapazitäten.

Für die Investitionen ergibt sich dann:

$$(7.2.5) \quad IOXC_i = (\sum_{j=1..J} cuLC_j \cdot nLC_{ij}) + cuOXC(maxBW) \cdot nOXC_i$$

$$Ireg_m = \sum_{j=1..J} cureg_j \cdot nreg_{mj}$$

$$Icab_m = cucab(nfip_m) \cdot L_m$$

$$linfra_m = (cutrench + cutub) \cdot L_m$$

$$Itot_{kN} = \sum_{i=1..N} cOXC_i + \sum_{m=1..M} (creg_m + ccabl_m + cinfra_m)$$

mit

$IOXC_i$	Investitionen für die OXC _i im Knoten v_i
$cureg_j$	Einheitskosten eines Signalregenerators vom Typ j
$Ireg_m$	Investitionen in Regeneratoren auf der m-ten Kante
$Itot_{kN}$	Gesamtinvestitionen für die physikalische Schicht im Kernnetz
L_m	geographische Länge der Netzkante e_m

7.4 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, Operation, Administration, Maintenance)
- Einrichtung, Überwachung und Terminierung für Kapazitäten aus den vermittlungsbasierten Diensten (Signalisierung)

Einrichtungen, die diese Funktionen wahrnehmen, können in Form von zentralisierten, verteilten Funktionen oder einer Mischung von beiden implementiert werden. Wie auch in den Transportschichten soll das Kostenmodell flexibel und generisch gestaltet werden, um eine flexible Anpassung an die Entwicklung der Technologien und ihrer Architekturen zu gewährleisten. Dies 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 abzubilden sind.

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.

Für alle zentralen Kontrolleinrichtungen wie den Softswitch, DNS oder BRAS (Teil des BNG) wird auf eine explizite Berücksichtigung der Anbindung an das Transportnetz ebenso wie auf die sich aus der Kontrollschicht ergebenden Übertragungsvolumina verzichtet. Entsprechend sind die Kosten für diese Anbindung an das Transportnetz in den Kosten der Kontrollschichteinrichtung mit zu berücksichtigen.

Die Investitionen ergeben sich aus der Größe und Anzahl der benötigten Einrichtungen. Da die Anzahl der Standorte, an denen zentrale Kontrolleinrichtungen vorzuhalten sind, durch Inputparameter gesteuert wird, ist dies entsprechend zu berücksichtigen. Letztlich muss die sich aus dem gesamten Netzverkehr zur Hauptverkehrsstunde (bei den spezifischen Funktionselementen nach Maßgabe der dienstespezifischen 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.

7.5 Ermittlung der netzbezogenen Kosten (Transportkosten ausgedrückt in Minutenäquivalenten)

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 Gemeinkosten erfolgt. Die in diesem Modell vorgestellte Investitionswertermittlung beschränkt sich auf die direkten Investitionen in Netzelemente und lässt indirekte Investitionen und Opex außen vor. In den folgenden Unterabschnitten werden wir unsere Ansätze zur Bestimmung der Capex beschreiben, wie auch seine Zuordnung zu den verschiedenen Diensten und zur Berechnung der Kosten pro Einheit eines (Vorleistungs-)Produktes erfolgt. Die Kosten des Transports werden dabei in Äquivalenten einer Sprachminute ausgedrückt, da die initiale Entwicklung des Modells auf den Sprachdienst ausgerichtet war. Die im Modell berücksichtigten Inputparameter sind in Anhang 8.2 bis 8.6 dargestellt.

7.5.1 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 tretenden 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 werden wir in diesem Abschnitt bei der Darstellung unserer konzeptionellen Überlegungen zur Ermittlung der Capex auch ausgehen.

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.

Der für die Verzinsung des eingesetzten Kapitals anzusetzende Zinssatz und die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer (Abschreibungszeit) sind Eingabeparameter und werden vom Regulierer festgelegt.

7.5.2 Bestimmung der Gesamtkosten und Kosten für einen Dienst

Da Struktur und Umfang des Netzes von der Nachfrage bestimmt wird, die während der Spitzenlastzeit befriedigt werden muss, werden die Gesamtkosten des Netzes von der Nachfrage zu diesem Zeitpunkt verursacht und zu dem Zeitpunkt etwaiger dienstespezifischer Lastspitzen.¹³⁰ 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, oder die Kosten werden den verschiedenen Diensten entsprechend Kriterien zugeordnet, die eher durch Preissetzungsüberlegungen bestimmt werden.

¹³⁰ Z.B. der Verkehr zur Sprach Busy Hour, der die Größe Sprachnetzspezifischer Netzkomponenten bestimmt, die dann über entsprechende Routingfaktoren den Sprachkosten zugerechnet werden.

Im LRAIC-Ansatz wird dann für die Bestimmung der Kosten der einzelnen Produkte von den Gesamtkosten, einschließlich Gemeinkosten, ausgegangen, die durch das Errichten und Betreiben des Netzes bzw. durch das Angebot der Produkte entstehen und von dem Modell wie oben beschrieben für die Capex der direkten Netzinvestitionen berechnet worden sind. Für die Bestimmung der Kosten eines Dienstes werden Informationen genutzt, die im Netzplanungsmodul in Bezug auf den jeweiligen Grad der Inanspruchnahme 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 Produktes über alle Anlagentypen erhält man die dienstespezifischen Kosten und durch Dividieren mit dem Volumen des entsprechenden Dienstes erhält man die Kosten pro Einheit.

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 Transportnetzes¹³¹ 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 Einheit (hier Sprachminute) erfolgen.

Für die Elemente der Kontrollschicht wird anstelle der Minuten-Äquivalente die Zahl der Diensteanfragen bzw. Verbindungen als Divisor herangezogen und auf Basis der durchschnittlichen Verbindungsdauer auf die Diensteeinheit umgerechnet.

¹³¹ Bei der Kostenberechnung für die Zusammenschaltungsmintue gilt dies auch für das Media Gateways.

8 Indirekte Investitionen und OPEX

Die Modellierung von indirekten Investitionen und OPEX erfolgt bei bottom-up Modellen in der Regel auf Basis von Zuschlagfaktoren.

Dabei werden Zuschlagsfaktoren auf die berechneten Investitionswerte der Netzelemente angewendet.

Im Modell ist neben der Zuschlagskalkulation auf den Investitionswert auch eine Anwendung von Absolutbeträgen je Netzelement vorgesehen.

Darüber hinaus ist im Modell die Option vorgehalten, Miet- und Betriebskosten¹³² als absolute Größen, differenziert nach Netzsichten, in das Modell einzupflegen. Es erfolgt somit bei dieser Variante keine Berechnung der Miet- und Betriebskosten, sondern diese werden als Eingangsparameter betragsmäßig vorgegeben. Methodisch werden die absoluten, schichtbezogenen OPEX Beträge auf die einzelnen Netzelemente gemäß des jeweiligen Investitionsanteils, der sich aus den Ergebnissen des WIK-Modells ergibt, verteilt.

Alle drei Methoden erlauben es im Weiteren, die netzelementbezogenen Kosten nach Maßgabe der Nutzungsfaktoren zu verteilen (Total Element Ansatz).

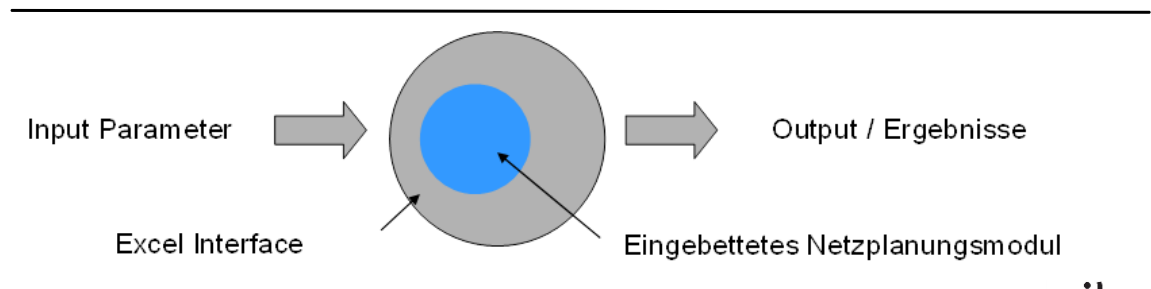
Das Nebeneinander der drei methodischen Ansätze ist letztlich Reflex der in der Praxis beobachtbaren Datenverfügbarkeit und soll eine Modellanwendung für verschiedene Ausgangslagen hinsichtlich der Datenverfügbarkeit schaffen.

132 Die Anwendung des Kostenmodells in Deutschland hat gezeigt, dass die Differenzierung in indirekte (netzunterstützende) Investitionen sowie OPEX sich in der Kostenrechnung des betrachteten Unternehmens nicht wiederfindet. Vielmehr sind diese Kosten als Betriebs- und Mietkosten gekennzeichnet. Damit fließen letztlich die netzunterstützenden Anlagen bereits als annualisierte Größen in die Berechnung ein.

9 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 Programmierungssprache 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.

Abbildung 9-1: 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.

10 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 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 Modellanwendung 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. 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 Bundesnetzagentur hat dieses Dokument aufbauend auf seinem Vorgänger „Ein analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz, 2005“, im Jahr 2009 einer öffentlichen Kommentierung zugänglich gemacht. Ziel dieses Verfahrens war es, die im Dokument bestehenden Lücken und Unzulänglichkeiten aufzuzeigen und zu beseitigen. Als Ergebnis der Konsultation und Auswertung der Stellungnahmen wurden entsprechende Modifikationen des Modells vorgenommen, die in diese fortgeschriebene Darstellung des Modellansatzes eingearbeitet wurden. Dieser Version des Dokuments ging die Konsultation der Modellerweiterung zur Bestimmung der Kosten von Mietleitungen voraus. Die überarbeitete Darstellung der Kostenmodellierung von Mietleitungen findet sich nun in Anlage 3.

Das Kostenmodell (bzw. dessen Ergebnisse) kann von der Bundesnetzagentur – neben anderen Instrumenten – zur Fundierung von Entscheidungen zu Zusammenschaltungsstrukturen oder 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.

Literatur

- [ACCC-07]: Mobile Termination Cost Model for Australia, WIK-Consult 01,2007, <http://www.accc.gov.au/content/index.phtml/itemId/779594/fromItemId/142>
- [Akimaru-99]: H. Akimaru, K. Kawashima, Teletraffic, Springer 2^o ed. 1999
- [Al-Begain-09]: K. Al-Begain, C. Balakrishna, L.A. Galindo, D. Moro, IMS- A development and deployment prespective, John Wiley an Sons 2009
- [Alcatel-03]: Alcatel 1678 Metro Core Connect, Technical Information Guide, Alcatel 07,2003, www.alcatel.com
- [Alcatel-09]: Towards a Converged Backbone, white Paper Alcatel-Lucent-2009, www.alcatel.com
- [Alcatel-09a]: Evolving Towards a High Leverage Network, Extracting additional value from the network to create sustainable business models, Alcatel Strategic White Paper 2009 http://images.tmcnet.com/online-communities/ngc/pdfs/application-enablement/whitepapers/2Q09_High_Leverage_Network_swp.pdf
- [Anell-08]: P. Anell, S. Jay, T. Plückebaum, Netzzugang im NGN Core, WIK Diskussionsbeitrag 310, 2008
- [Arana-97]: F. S. Arana et al.: "La planificación de la red de conmutación y control en la telefonía móvil", Comunicaciones de Telefónica I+D, Vol. 15, Dic. 1997
- [Badstieber-10]: Curt Badstieber, Ultradense access network architecture serving >1000 clients, including coherent technologies http://www.epic-assoc.com/sources/news/epic_news_v6n1_final.pdf?ftopus=90a05338fcaf7b6b8640bb8f5b06a0e8
- [Baldry-09]: J. Baldry, Native Packet Optical Transport, das Carrier-Netz der Zukunft, August 2009, www.lanline.de
- [Barlow-09]: G. Barlow, A G.709 Optical Transport Network Tutorial, JDSU white paper, Jan.2009, www.jdsu.com
- [Berge-73]: C. Berge, Graphes et Hypergraphes, Dunond, Paris 2^o ed. 1973
- [Bernhey-07]: R. Bernhey and M. Kanaan, ROADM Deployment, Challenges and Applications, National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC), Anaheim, CA, March 2007, <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=NFOEC-2007-NWD1>
- [Black-02]: Uyles Black, MPLS and Label Switching Networks, Prentice Hall 2002
- [Caballero-04]: J. M. Caballero, SDH Next Generation, white paper, Trends Communications, 2004 <http://web.uct.ac.za/depts/commnetwork/eee5026/note/eee526-04-620-sdh.ng.pdf>
- [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 Netwokr Architectures, 2008, www.cienna.com

- [cienne-09]: Analysis and Benefits of Carrier Ethernet in Metro Networks, white paper ciene 2009, www.cienna.com
- [Cisco-07]: Converge IP ND DWDM Layers in Core Network, Cisco white paper, 2007, http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/routers/ps5763/prod_white_paper0900aecd80395e03.html
- [Coltro-97]: C. Coltro, Evolution of Transport Network Architectures, Alcatel Telecommunication Review, 1^o Quarter 1997
- [Doyon-89]: G. Doyon, Systèmes et réseaux de télécommunication en régime stochastique, Ed. Masson, Paris 1989
- [Eimeren-09]: B. van Eimeren, B. Frees, Der Internetnutzer 2009 –multimedial und total vernetzt?, media perspektiven 7/2009
- [Ellis-75]: L.W. Ellis, Das Gesetz von der Wirtschaftlichkeit grosser Mengen in seiner Anwendung auf den Entwurf und die Planung von Nachrichtensystemen, Elektrisches Nachrichtenwesen Vol. 1975
- [Ericsson-04]: CARRIER-CLASS TELEPHONY OVER IP, Ericsson Engine Integral and Cisco IP Backbone, common white paper Cisco, Ericsson, 2004, http://www.rabbitmq.com/resources/Carrier_Class_Telephony_Over_IP.pdf
- [Ericsson-07]: Introduction to IMS, White paper
- [Ericsson-09]: Evolution of optical packet transport, white paper L.M. Ericsson- August 2009
- [EU Kommission - 10]: COMMISSION RECOMMENDATION of 20 September 2010 on regulated access to Next Generation Access Networks (NGA), Brussels, (2010/572/EU)
- [Fang-08]: L. Fang, R. Zhang, M. Tayler, The Evolution of Carrier Ethernet Services- Requirements and Deployment Case Studies, IEEE Communication Magazine March 2008
- [Fielder-08]: M. Fielder, K. Hackbarth, H. Hlavacs, Socio-Economic Issues in Future Generation Internet, J.UCS Special Issue, Journal of Universal Computer Science, vol. 14, no. 5 (2008)
- [Fielder-10]: M. Fielder, , H. Hlavacs, K. Hackbarth, P. Arlos Quality of Experience Metrics and performance evaluation, annals of telecommunications Vol 65 n^o ½ 2010
- [Fujitsu-08]: Understanding PBB-TE for Carrier Ethernet, white paper Fujitsu 2008, <http://www.fujitsu.com/downloads/TEL/fnc/whitepapers/UnderstandingPBBTE.pdf>
- [Garcia-08]: A. Garcia, K. Hackbarth, Approximation to a Behavioural Model for Estimating, Journal of Universal Computer Science, vol. 14, no. 5 (2008), 731-744
- [Garcia-10]: A. García, L. Rodríguez de Lope, K. Hackbarth, Application of Cost Models over Traffic Dimensioning with QoS Restrictions, in Annal de Telecommunication, Special Issue on Quality of Experience and Socio-Economic Issues of Network-Based Services Vol. 65 n^o ¾ March/April 2010
- [Gelenbe-98]: Gelenbe-Pujolle, Introduction to Queuing Networks, John Wiley & Son 2^o ed. 1998

- [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
- [Hackbarth-82]: Berechnung kürzester Wege in Netzen, Der Fernmelde-Ingenieur, Heft 7 Juli 1982
- [Hackbarth-92]: K. Hackbarth, F. García Ayllón, REFORMA- Atoll based on PC for Telecom Network Optimization, European Transaction on Telecommunication, Vol. 3Nr. 5 1992
- [Händel-98]: R. Händel, M. Huber, S. Schröder, ATM Networks, Addison Wesley, 3^o ed. 1998
- [ITU-01]: Architecture of optical transport networks, Rec. G872 (11/01)
- [ITU-02]: "Network Planning", Lecture NP-5.1, I
- [ITU-03]: Interfaces for the Optical Transport Network (OTN), G.709/Y.1331 (03/2003)
- [ITU-07]: Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH), G.707/Y.1322 (01/2007)
- [Jay, Plückebaum, Ilic-10]: Stephan Jay, Thomas Plückebaum, Dragan Ilic, Der Einfluss von Next Generation Access auf die Kosten der Sprachterminierung, Diskussionsbeitrag Nr. 335, Bad Honnef März 2010
- [Jay-08]: S. Jay, T. Plückebaum, Strategien zur Realisierung von Quality of Service in IP-Netzen, WIK Diskussionbeitrag 315, 2008
- [JDSU-04]: Voice over IP White Paper, www.jdsu.com
- [Jenkins-06]: D. W. Jenkins, D.A. Scholtens, Metro WDM Design & Evolution, Tellabs white paper, 2006, <http://www.tellabs.com/resources/papers/tlabmetrowdm.pdf>
- [Juniper-09]: MPLS Plug and Play for Metro Ethernet Networks, white paper Juniper Networks, Inc. 2009 www.juniper.com
- [Juniper-09a]: OTN Interfaces for IP over DWDM, IP- optical Integration for Managing Wavelengths in Routers, Juniper white paper 2009, www.juniper.com
- [Juniper-10]: Improving network efficiency, reliability, and operations with IPODWDM, Juniper White Paper April 2010, <http://www.juniper.net/us/en/local/pdf/whitepapers/2000321-en.pdf>
- [Larkin-02]: Nik Larkin, ASON And GMPLS - The Battle Of The Optical Control Plane, An overview of the ongoing work of the IETF and ITU to standardize optical control plane protocols. White Paper Metaswitch Networks, 2002 <http://www.metaswitch.com/download/asongmpls.pdf>
- [Lin-73] S. Lin, B. Kernighan, An effective heuristic algorithms for the travelling salesman problem, Operation Research Vol 21 pa. 498-516
- [Mage-06]: Th. Magedanz, Senior Member IEEE, F. C. de Gouveia, IMS – the IP Multimedia Subsystem as NGN Service Delivery Platform Elektrotechnik & Informationstechnik (2006) 123/7/8: 271–276. 2006

- [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>
- [McDysan-00]: D McDysan, QoS & Traffic Management in IP Networks", Mc Graw Hill 2000
- [Mukherjee-06]: B. Mukherjee, Optical WDM Networks, Ed. Springer, Berlin 2006
- [NGI-04]: European Excellence Network NGI, A. Garcias, K. Hackbarth ed. Survey describing current Internet design tools, Deliverable reference number: D. JRA.3.4.1; <http://eurongi.enst.fr/archive/127/D.JRA.3.4.1.pdf>
- [Nölle-05]: J. Nölle, Voci e over IP, VDE Verlag Berlin 2^o Ed. 2005
- [NSP-09]: Connection Oriented Ethernet vs. MPLS-TE: An Ethernet Transport layer TCO Comparison, white paper Network Strategy Partners March 2009, <http://www.fujitsu.com/downloads/TEL/fnc/downloads/blog/GridpointCOEvMPLSTE.pdf>
- [Ohara-09]: T. Ohara, O. Ishida, Standardization Activities for the Optical Transport Network, NTT Technical Review, Vol. 7 N3. Marz 2009
- [Perrin-09]: Building the Next Generatio Packet-Optical Switching Network, White Paper Heavy Reading for Ciena, September 2009, www.heavyreading.com
- [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
- [RFC-6378-11] MPLS Transport Profile (MPLS-TP) Linear Protection, octobre 2011
- [Rizvi-09]: R. Rizvi, 100G Ethernet and beyond JISC: Technology & Standards Watch July 2009, www.jisc.ac.uk/techwatch
- [Schröder-05]: J. Schröder, M. Götzer, R. Müller, Resource management in next generation networks, AEÜ Nr. 60 2006 Elsevier
- [Shaikh-10]: J. Shaikh, M. Fielder, D. Collange, Quality of Experience from user and network perspective, annals of telecommunications Vol 65 n^o 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-01]: G. Siegmund, Technik der Netze, H"thig Verlag, Heidelberg 5^o ed. 2001
- [Tellabs-09]: Tellabs® 7100 Optical Transport System — Fully Integrated Transport and Services Delivery Platform <http://www.globalnetwave.com/docs/Tellabs%207100%20Fact%20sheet.pdf>
- [Tomic-04]: S. Tomic, et. al. ASON und GMPLS-Overview and Comparision, Photonic Network Communication Vol 7 Nr.2 2004
- [TPACK-08]: P-OTN: Packet Optical Network Transformation, TAPCK A/S June 2008, www.tpack.com
- [Transmode-09]: Ethernet Demarcation Unit, Data sheet TM- Series, Transmode 2009, www.transmode.com

- [Transmode-09a]: Ethernet Muxponder Data sheet TM-Series, Transmode 2009, www.transmode.com
- [Tutschku-04]: K. Tutschku, "A Measurement-based Traffic Profile of the eDonkey Filesharing Service," presented at Passive and Active Network Measurement, 5th International Workshop, PAM 2004, Antibes, France, 2004
- [VDE-06]: VDE-ITG, ed. Optical Transport Networks (OTN) Technical Trends and Assessment, ITG-Positionspapier, VDE 2006, <http://www.vde.com/de/fg/ITG/Aktuelles/Documents/MCMS/ITGPosipapOTN1.pdf>
- [VDE-08]: EIBOE Working Group Transmission Technologies White Paper, I http://www.vde.com/de/fg/iTg/Arbeitsgebiete/Fachbereich%206/Documents/PosipPap_Transmission%20Technologies_Ak_EiBONE_Druckversion.pdf ITG/VDE 2008
- [WIK-01]: Realisierung eines Kostenmodells für den Briefdienst; Projektdokumentation, erstellt im Auftrag der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post, 2001
- [WIK-02]: Analytisches Kostenmodell Nationales Verbindungsnetz, Referenzdokument 2.0; erstellt im Auftrag der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post, 2002
- [WIK-05]: Ein analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz, Referenzdokument, erstellt im Auftrag der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post, 2002
- [WIK-10]: Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz 2010, Version 2.1, erstellt im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 2010
- [WIK-10a]: Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz 2010, Auswertung der Stellungnahmen, erstellt im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 2010
- [WIK-14]: Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz, Referenzdokument Version 2.1.1, erstellt im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 25. Februar 2014
- [WIK-14a]: Anhang 9 Berechnung der Kosten von Bitstromzugang – Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz, Referenzdokument Version 2.1.1, erstellt im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 25. Februar 2014
- [WIK-14b]: Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz, Referenzdokument Version 2.1.2, erstellt im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 7. Mai 2014
- [WIK-14c]: Anhang 10 Berechnung der Kosten von Mietleitungen – Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz, Referenzdokument Version 2.1.2, erstellt im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 7. Mai 2014

- [WIK-14d]: Auswertung der Stellungnahmen – Anhang 10 Berechnung der Kosten von Mietleitungen Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz, Referenzdokument Version 2.1.2, erstellt im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 22. Dezember 2014, http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Marktregulierung/Massstaebe_Methoden/Kostenmodelle/Breitbandnetz2x/Ausw_Stellungnahmen_Mietlgen_20141222_oeffentl_Fassung.pdf
- [WIK-14e]: Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz, Referenzdokument Version 2.2, erstellt im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 22. Dezember 2014, http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Marktregulierung/Massstaebe_Methoden/Kostenmodelle/Breitbandnetz2x/Refdok_NGN_v2_2_20141222.pdf
- [WIK-14f]: Anlage 1 Berechnung der Kosten der Sprachzusammenschaltung, Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz, Referenzdokument Version 2.2, erstellt im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 22. Dezember 2014, http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Marktregulierung/Massstaebe_Methoden/Kostenmodelle/Breitbandnetz2x/Anlage_1_Voice_IC_RefDok_NGN_v2_2_20141222.pdf
- [WIK-14g]: Anlage 2 Berechnung der Kosten von Bitstromzugang, Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz, Referenzdokument Version 2.2, erstellt im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 22. Dezember 2014, http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Marktregulierung/Massstaebe_Methoden/Kostenmodelle/Breitbandnetz2x/Anlage_2_Bitstrom_Refdok_NGN_v2_2_20141222.pdf
- [WIK-14h]: Anlage 3 Berechnung der Kosten von Mietleitungen, Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz, Referenzdokument Version 2.2, erstellt im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 22. Dezember 2014, http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Marktregulierung/Massstaebe_Methoden/Kostenmodelle/Breitbandnetz2x/Anlage_3_Mietleitungen_RefDok_NGN_v2_2_20141222.pdf
- [WIK-16]: Anpassung des Breitbandkostenmodells um die Einführung der BNG Architektur, erstellt im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 9. Mai 2016, http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Marktregulierung/Massstaebe_Methoden/Kostenmodelle/Breitbandnetz2x/WIKKonsDokBNG20160509pdf.pdf;jsessionid=91F81402BAAA9FF933BD3F73561F239?__blob=publicationFile&v=2
- [WIK 16a]: Auswertung der Stellungnahmen zu den Modellanpassungen Einführung der BNG-Architektur und die Möglichkeit der Ermittlung von Pure LRIC, erstellt im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 25. Juli 2016, http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Marktregulierung/Massstaebe_Methoden/Kostenmodelle/Breitbandnetz2x/WIKAuswertungStellgn20160725pdf.pdf;jsessionid=A9C752B60CA28986D1A360BBCF848293?__blob=publicationFile&v=3

- [WIK-16b]: Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz, Referenzdokument Version 2.3, erstellt im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 15. August 2016
- [WIK-16c]: Anlage 1 Berechnung der Kosten der Sprachzusammenschaltung, Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz, Referenzdokument Version 2.3, erstellt im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 15. August 2016
- [WIK-16d]: Anlage 2 Berechnung der Kosten von Bitstromzugang, Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz, Referenzdokument Version 2.2, erstellt im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 22. Dezember 2014
- [WIK-16e]: Anlage 3 Berechnung der Kosten von Mietleitungen, Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz, Referenzdokument Version 2.3, erstellt im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 15. August 2016
- [Wilde-99]: A. Wilde, SDH in der Praxis, VDE Verlag Berlin 1999
- [Winterling-09]: P. Winterling, OTN als Transportmedium der Zukunft und Anforderungen an die Messtechnik, ntz, Heft 06/2009, VDE Verlag

Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz

Anhang zum Referenzdokument

Version 2.3

Autoren:

K. Hackbarth, Universität von Kantabrien, Santander, Spanien
G. Kulenkampff, WIK-Consult
T. Plückebaum, WIK-Consult

WIK-Consult GmbH
Rhöndorfer Str. 68
53604 Bad Honnef
Deutschland

Bad Honnef, 15. August 2016

ANHÄNGE

Die folgenden Anhänge vertiefen und ergänzen die Ausführungen aus dem Referenzdokument.

1 Anhang: Generierung der Verkehrsnachfrage¹³³

Zu den zentralen Eingabedaten für die Generierung der Verkehrsnachfrage zählen:

- die Anzahl und Spezifikation der Dienste (hier mittlere Bandbreite und mittlere Anzahl von Verkehrszielen)
- die Anschluss-/Nutzertypen
- Anzahl der Anschlüsse/Nutzer am MPoP

Nachfolgend soll beispielhaft die Berechnung der Verkehrsnachfrage illustriert werden. Dazu wurden Annahmen hinsichtlich der Zuordnung von Dienstekategorien zu Nutzertypen vorgenommen, ohne diese Annahmen zu validieren. Im Vordergrund steht hier der methodische Ansatz. Über die Eingangsdaten ist bei der Anwendung des Kostenmodells zu befinden.

Das folgende Beispiel zeigt die detaillierten Ergebnisse einer Berechnung an einem MPoP von 1000 Nutzern und anschließend wird die Entwicklung der aggregierten Bandbreite bei steigenden Nutzerzahlen bis 10.000 Nutzern gezeigt.

Tabelle A 1-1 zeigt in den grau markierten Zellen (Spalte 2-7) die Werte der Verkehrsmatrix, in den hellbraun markierten Zellen (Spalte 8-9) die beiden Vektoren, die die mittlere Bandbreite in kbps je Dienst beschreiben.

Tabelle A 1-1: Eingangsdaten über die Verkehre der Nutzer (Busy Hour Erlang) und Bandbreiten (BW) der Dienste

Name	Trad.	Standard	Premium	SOHO	SME	LE	BW down	BW up
Premium Business	0	0	0	0	0,2	1	512,5	512,5
Sprachdienste	0,05	0,075	0,1	0,15	1,5	5	95,2	95,2
Konferenzdienste	0	0	0	0,001	0,005	0,01	1260,6	420,2
VoD Dienste	0	0,01	0,02	0	0	0	2880,2	25
Business Data	0	0	0	0,1	0,5	5	442,4	320
P2P	0,1	0,2	0,5	0	0	0	336,3	336,3
Sonstige best effort	0,1	0,2	0,5	0,2	0,5	5	128	64

Tabelle A 1-2 zeigt die sich daraus ergebenden Downstream Bandbreiten je Nutzer und Dienst in den grau markierten Zellen und die resultierende gesamte downstream Bandbreite je Nutzer in der gelb markierten Zeile [kbitps]. Analog lassen sich die

¹³³ Im Referenzmodell wird in Abschnitt 3 der Begriff der Verkehrsnachfrage definiert. Darunter wird der vom Nutzer abgehende aber auch den ankommenden Verkehr bezeichnet. Es wird auch mit „nutzerinduziertem Verkehr“ umschrieben.

Upstream Bandbreiten ermitteln.¹³⁴ Aus anderen Studien und Informationen von Betreibern ergibt sich, dass diese Werte den derzeitigen Stand der Nutzung auf der Basis von xDSL widerspiegeln.

Tabelle A 1-2: Downstream Bandbreiten je Nutzertyp nach Diensten differenziert

Name	Trad.	Standard	Premium	SOHO	SME	LE
Premium Business Dienste	0	0	0	0	307,50	1.537,50
Sprachdienste	4,76	7,14	9,52	14,28	142,80	476,00
Konferenzdienste	0	0	0	1,26	6,30	12,61
VoD Dienste	0	28,80	57,60	0	0	0
Business Data Dienste	0	0	0	44,24	221,20	2.212,00
Sonstige best effort Dienste	12,80	25,60	64,00	25,60	64,00	640,00
P2P	134,52	269,04	672,60	0	0	0
Total	152,08	330,58	803,72	85,38	741,80	4.878,11

Die folgende Tabelle A 1-3 zeigt die resultierenden Up- und Downstream Bandbreiten je Nutzer in den grau markierten Zellen sowie das monatliche Datenaufkommen in den gelb markierten Zellen (letzte Zeile) und den zusätzlich erforderlichen Eingabedaten in den grün markierten Zellen (zweit- und drittletzte Zeile).

Tabelle A 1-3: Bandbreiten je Nutzer in der BH und monatliches Datenaufkommen

Name	Trad.	Standard	Premium	SOHO	SME	LE
down [kbitps]	152,08	330,58	803,72	85,38	741,80	4.878,11
up [kbitps]	145,68	289,23	714,62	59,50	644,40	3.937,70
Summe [kbitps]	297,76	619,81	1.518,34	144,88	1.386,20	8.815,81
Anteil an (up+down) gesamt	0,02	0,05	0,12	0,01	0,11	0,69
Anteil der BH am Tagesverkehr	0,10	0,08	0,06	0,10	0,05	0,05
Anzahl der Tage	30,00	30,00	30,00	20,00	20,00	20,00
Gbyte/Month (up+down)	40,20	104,59	341,63	13,04	249,52	1.586,85

Schließlich werden die aggregierten Bandbreiten in einem MPoP berechnet. Diese Größe fließt letztlich in das Kostenmodell als Verkehrsnachfrage auf der untersten Netzebene ein. Die nachstehende Tabelle A 1-4 zeigt Ergebnisse für einen im ländlichen Bereich liegenden MPoP mit 10.000 angeschlossenen Nutzern:

- die grau markierten Zellen (Zeilen 4-10) geben erneut die mittlere aggregierte download Bandbreite je Nutzertyp und Dienst sowie deren Summenwerte an.

¹³⁴ Auf eine Darstellung der upstream Bandbreiten wurde an dieser Stelle verzichtet, sie werden im Modell selbstverständlich berücksichtigt.

- die grün markierten Zellen (Zeilen 2-3) zeigen die relative und die daraus resultierende absolute Anzahl der Nutzer.
- die gelb markierten Werte (Zeilen 11 und 12) zeigen die Summe über alle Dienste. Diese Werte beinhalten nicht die Bandbreitenwerte, die zur Verteilung von IPTV Diensten bis an den MPoP erforderlich sind. Zur Berechnung dieser zusätzlichen Bandbreite werden 100 STV Programme mit 2 Mbps je Kanal und 25 HSTV Programme mit 8 Mbps angenommen, woraus sich eine zusätzliche Bandbreite von 400 Mbps ergibt.¹³⁵
- die gesamte im MPoP aggregierte downstream Bandbreite beträgt rund 14.382Mbps (blau markierte Zelle).

Man beachte, dass in dem gewählten Beispiel der Bandbreitenanteil aus Sprachdiensten mit 1,14 % gegenüber der Gesamtbandbreite ohne IPTV Verteildienste beträgt und damit bereits sehr niedrig ist.

Tabelle A 1-4: Aggregierte Bandbreitenwerte eines MPoP mit M=10.000 Nutzern

Name	Trad.	Standard	Premium	SOHO	SME	LE	Summe	rel Anteil in BH
Verteilung	0,1	0,6	0,2	0,047	0,05	0,003	1	
abs Anzahl Nutzer	1.000	6.000	2.000	470	500	30	10.000	
Premium Business Dienste	0	0	0	0	461,25	138,38	599,63	4,29%
Sprachdienste	4,76	42,84	19,04	6,71	71,40	14,28	159,03	1,14%
Konferenzdienste	0	0	0	0,59	3,15	0,38	4,12	0,03%
VoD Dienste	0	172,81	115,21	0	0	0	288,02	2,06%
Business Data Dienste	0	0	0	20,79	110,60	66,36	197,75	1,41%
Sonstige best effort Dienste	12,80	153,60	128,00	12,03	32,00	19,20	357,63	2,56%
P2P	538,08	6.456,96	5.380,80	0	0	0	12.375,84	88,51%
Summe ohne IPTV	555,64	6.826,21	5.643,05	40,13	678,40	238,59	13.982,02	100%
Anteil	3,97%	48,82%	40,36%	0,29%	4,85%	1,71%	100%	
Anteil Privat Nutzer	93,15%	Anteil Bus Nutzer			6,85%			
Summe mit IP-TV							14.382,02	

Die Entwicklung der an einem MPoP aggregierten Bandbreite in Abhängigkeit der vom MPoP erreichbaren Haushalte zeigt Tabelle A 1-5. Dabei werden eine Breitband-

¹³⁵ An dieser Stelle wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die gesamten Programme an den betreffenden MPoP gesendet werden. Im Referenzdokument in Abschnitt 3.4.2 ist dargestellt, wie im Modell eine Abhängigkeit zwischen Zahl der dienstespezifischen Nutzer und Zahl der gesendeten Programme hergestellt werden kann.

penetration von 50 % und ein Marktanteil des Betreibers von 40 % angenommen. Aus der letzten Spalte geht deutlich hervor, dass mit zunehmender Aggregation der Einfluss der IPTV Verteildienste zurückgeht.

Tabelle A 1-5: Entwicklung der aggregierten Bandbreiten an einem MPoP in Relation zu der Anzahl der Haushalte und Nutzer bei 50 % Breitbandpenetration und 40 % Marktanteil des Betreibers

Anzahl der Haushalte pro MPoP	Anzahl der Nutzer Pro MPoP	BB ohne IPTV [Mbps]	BB mit IPTV [Mbps]	IPTV relativ zu BB mit IPTV
5.000	1.000	1.398,20	1.798,20	22,24%
7.500	1.500	2.097,30	2.497,30	16,02%
10.000	2.000	2.796,40	3.196,40	12,51%
12.500	2.500	3.495,51	3.895,51	10,27%
15.000	3.000	4.194,61	4.594,61	8,71%
17.500	3.500	4.893,71	5.293,71	7,56%
20.000	4.000	5.592,81	5.992,81	6,67%
22.500	4.500	6.291,91	6.691,91	5,98%
25.000	5.000	6.991,01	7.391,01	5,41%
27.500	5.500	7.690,11	8.090,11	4,94%
30.000	6.000	8.389,21	8.789,21	4,55%
32.500	6.500	9.088,32	9.488,32	4,22%
35.000	7.000	9.787,42	10.187,42	3,93%
37.500	7.500	10.486,52	10.886,52	3,67%
40.000	8.000	11.185,62	11.585,62	3,45%
42.500	8.500	11.884,72	12.284,72	3,26%
45.000	9.000	12.583,82	12.983,82	3,08%
47.500	9.500	13.282,92	13.682,92	2,92%
50.000	10.000	13.982,02	14.382,02	2,78%

2 Anhang: Modelle für die Berechnung von Verkehrs- und Bandbreitenmatrix (Routing-Regeln)

Im Modell wird das Routing getrennt nach Konzentrationsnetz und Kernnetz vorgenommen.

- Layer 2 Verkehr, der über entsprechendes Layer 2 Equipment geswitched wird, wird bereits innerhalb des Konzentrationsnetzes in der Verkehrslenkung berücksichtigt (typischerweise VLAN Verkehr und emulierte Layer 2 Mietleitungen). Verkehr zwischen benachbarten BNG eines Standortes wird wie der Verkehr zwischen BNG verschiedener Standorte über die LSR des Kernnetzes geroutet. L2 Bitstromverkehr wird je BNG ausgeleitet.
- Layer 3 Verkehr wird grundsätzlich hierarchisch durch das Konzentrationsnetz bis zum IP-PoP im Kernnetz geführt und erst dort greift die Verkehrslenkung nach Maßgabe der Verkehrsziele.

Das im Modell angewendete Verkehrslenkungsschema ist eng verbunden mit der Netzhierarchie, Dabei werden die folgenden Ausprägungsformen unterschieden:

- Ausschließlich lokaler Layer 2 Verkehr, der innerhalb desselben Standorts abgewickelt wird, sogenannter "interner Verkehr"
- Lokaler Layer 2 Verkehr, der innerhalb eines Ebene 2 Clusters verteilt wird (ein Ebene 2 Cluster), umfasst einen Ebene 2 Standort (im Fall von Doppelanbindung zwei Ebene 2 Standorte) und die ihm (ihnen) zugewiesenen Ebene 0 Knoten)
- Regionalen Layer 2 Verkehr, der innerhalb eines Konzentrationsnetz-Clusters (identisch mit einem IP-PoP Cluster, nur das kein Layer 3 Equipment berührt ist) verteilt wird.
- Layer 3 Verkehr, der auf Ebene des Kernnetzes geroutet wird, wobei die dienstespezifischen Verkehrsziele Beachtung finden.

2.1 Routing im Konzentrationsnetz am Beispiel des 0-2 Intra-Cluster Verkehrs

Nachdem durch das Modell die Ebene 0 Knoten den Ebene 2 Knoten zugeordnet werden, wird das erste Routing für Layer 2 Dienste vollzogen.

Bezüglich des Layer 2 Verkehrs können dabei 2 Fälle unterschieden werden:

- Verkehr, der innerhalb des Ebene 2 Clusters verteilt wird.

- Verkehr, der nicht im Ebene 2 Cluster verteilt wird und entsprechend hierarchisch geführt wird.

Im Kontext der BNG-Architektur kann Verkehr nur innerhalb eines den jeweiligen BNG zugeordneten Teilclusters innerhalb des Konzentrationsnetzes verteilt werden, indem der BNG ihn innerhalb seines Aggregationsswitches wieder herunterführt. Auch kann er innerhalb seines Teilclusters generierten Bitstrom-Verkehr ausleiten bzw. für die Gegenrichtung annehmen. Anderer Verkehr, selbst wenn er zu BNG deselben Standortes führen würde, muss in dieser Architektur über die IP-Ebene vermittelt werden und wird im Prinzip wie Verkehr behandelt, der den Ebene 2 Cluster verlässt.

2.2 Routing im Kernnetz

Sämtlicher Verkehr, der nicht innerhalb des jeweiligen Konzentrationsnetz-Clusters abgewickelt wird, wird dem Kernnetz zugeführt und dort auf Basis der Layer 3 Router (network level 3) gelenkt. Das Modell berechnet für jeden Dienst/ jede Dienstekategorie eine Verkehrsmatrix, welche die Verkehrsverteilung zwischen sämtlichen Kernnetzstandorten (LER-Knoten) beschreibt. In Abhängigkeit von den Inputparametern (siehe hierzu die Inputparameter in Anhang 7.2, Routing Characteristics) werden die Verkehrsverteilungen für jede einzelne Dienstekategorie vollzogen:

- Ende-zu-Ende ON-Net Verkehr
- IC-Verkehr zu Interconnection Punkten oder
- Server-Verkehr zu entsprechenden Diensteservern.,

Es ist zu beachten, dass sämtliche Verkehre, die

- aus dem Konzentrationsnetz kommen
- in zusammengeschnittene Netze gehen oder
- auf Diensteserver gehen,

immer über einen LER bzw. BNG der Ebene 3 zu führen sind, Entsprechend sind LER auch an den Standorten der Netzebene vorgehalten (zusätzlich zu den LSR), denn jeder dieser Standorte erfüllt auch Layer 3 Funktionen.

2.2.1 Routing Ende-zu-Ende ON-Net Verkehr im Kernnetz

Für sämtliche Ende-zu-Ende ON-Net Verkehre¹³⁶ berechnet das Modell eine entsprechende Verkehrsmatrix, welche für sämtliche Knotenpaare $i \neq j$ die Verkehrsverteilung zwischen den IP-PoP Clustern sowie für $i = j$ die Verkehrsverteilung innerhalb des Clusters vollzieht. Hierbei muss gegenüber dem vorhergehenden Modellrelease nun auch der über die Ebene 2 Clustergrenze hinausgeführte Clusterinterne Verkehr wieder zurückgeführt werden.

Im Beispiel in Abbildung A 2-1 ist ein Kernnetz mit 12 Ebene 3 Knoten (und 3 Ebene 5 Knoten (7, 9, 12) dargestellt. Aus Tabelle A 2-1 a) gehen die aggregierten Sprachverkehre für ON-Net Verkehr an den jeweiligen Ebene 3 Knoten hervor, Aus diesen Angaben lässt sich das relative Knotengewicht ableiten und ist in der letzten Zeile ausgewiesen. Auf Basis dieser Werte ist es möglich eine vollständige Verkehrsmatrix zu erstellen, Dazu wird der Verkehr zwischen 2 Knoten [traffic $t(i,j)$] aus dem Produkt aus Knotengewicht in Knoten I und dem aggregierten Verkehr in Knoten j ermittelt, wobei im Fall von $i \neq j$ der Wert durch 2 dividiert werden muss.

Tabelle A 2-1: Beispiel einer Verkehrsmatrix für ON-Net Verkehr

a) Aggregierter ON –Net Verkehr und Verkehrsgewichte der Knoten

node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	sum
aggregated traffic	516	413	398	602	287	568	830	274	750	443	323	760	6164
node weight	0,084	0,067	0,065	0,098	0,047	0,092	0,135	0,044	0,122	0,072	0,052	0,123	1,000

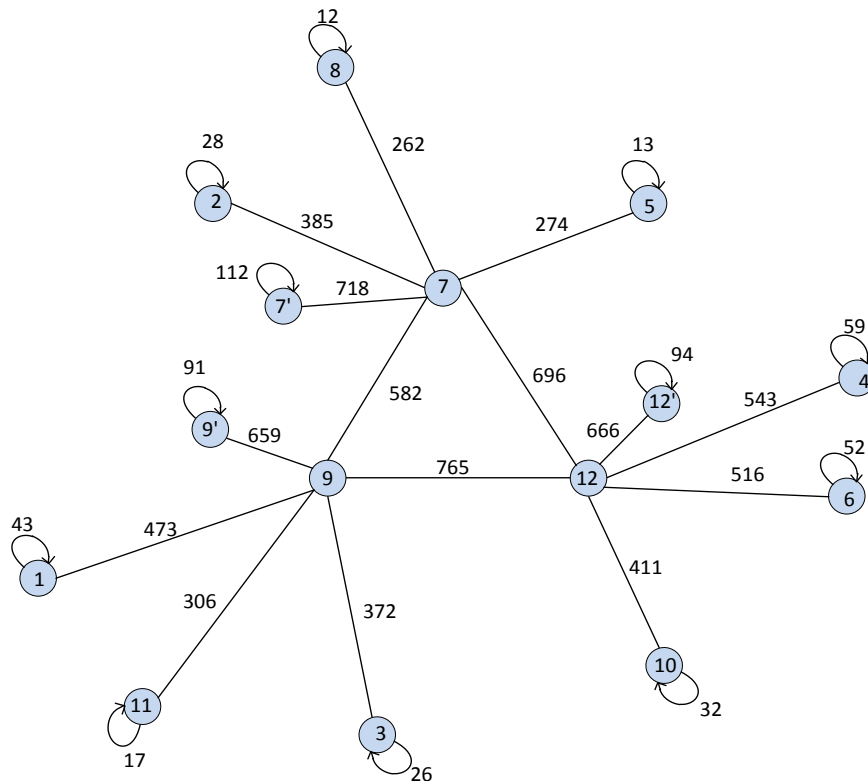
¹³⁶ Sprache zählt ebenfalls zu den ON-Net Verkehren. Mit Blick auf den Sprachzusammenschaltungsverkehr und seine Verkehrslenkung wird auf die entsprechende Darstellung in der Anlage 1 verwiesen [WIK-16c]. Noch in der Version 2.1.2 des Referenzdokuments fand sich diese Darstellung in Abschnitt 2.2.3 dieses Anhangs [WIK-14b].

b) Verkehrsmatrix

Traffic Matrix	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	43,2	17,3	16,7	25,2	12,0	23,8	34,7	11,5	31,4	18,5	13,5	31,8
2	17,3	27,7	13,3	20,2	9,6	19,0	27,8	9,2	25,1	14,8	10,8	25,5
3	16,7	13,3	25,7	19,4	9,3	18,3	26,8	8,8	24,2	14,3	10,4	24,5
4	25,2	20,2	19,4	58,8	14,0	27,7	40,5	13,4	36,6	21,6	15,8	37,1
5	12,0	9,6	9,3	14,0	13,4	13,2	19,3	6,4	17,5	10,3	7,5	17,7
6	23,8	19,0	18,3	27,7	13,2	52,3	38,2	12,6	34,6	20,4	14,9	35,0
7	34,7	27,8	26,8	40,5	19,3	38,2	111,8	18,4	50,5	29,8	21,7	51,2
8	11,5	9,2	8,8	13,4	6,4	12,6	18,4	12,2	16,7	9,8	7,2	16,9
9	31,4	25,1	24,2	36,6	17,5	34,6	50,5	16,7	91,3	27,0	19,7	46,2
10	18,5	14,8	14,3	21,6	10,3	20,4	29,8	9,8	27,0	31,8	11,6	27,3
11	13,5	10,8	10,4	15,8	7,5	14,9	21,7	7,2	19,7	11,6	16,9	19,9
12	31,8	25,5	24,5	37,1	17,7	35,0	51,2	16,9	46,2	27,3	19,9	93,7

Der ON-Net Verkehr zwischen verschiedenen Standorten ($i \neq j$) wird über die entsprechende Netzhierarchie hierarchisch zu dem übergeordneten Standort geführt, wohingegen der Verkehr, der im IP-PoP Cluster verbleibt, bereits im Routing des Konzentrationsnetzes berücksichtigt wurde (Routing des "gehenden" und "kommenden" Verkehrs). Abbildung A 2-1 zeigt die Verkehrsströme entsprechend der Matrix aus Tabelle A 2-1b, wobei angenommen wurde, dass es sich beim den Knoten 7, 9 und 12 um Standorte der obersten Netzebene handelt (Beispiel eines 2-Ebenen Kernnetzes).

Abbildung A 2-1: ON-Net Verkehrsströme im 2-Ebenen Kernnetz nach Tabelle A 2-1



2.2.2 Routing von Client-Server Verkehr im Kernnetz

Beispiele für Client-Server Verkehre sind allgemeine WEB oder auch Video Server, die im Modell immer über einen LER an das Kernnetz angeschlossen sind.

Bei der Zuordnung der Server-Standorte auf die Netzhierarchie ist zu beachten, dass das Modell nach dem Kriterium der Knotenstärke vorgeht und die Server – ausgehend von Ebene 5 – die Zuweisung vollzieht. Sofern mehr Server-Standorte vorzusehen sind als Ebene 5 Knoten, verteilt das Modell auf der nächst tieferen Netzebene die Server weiter nach Maßgabe der Verkehrsstärke. Die Anzahl der Server ist ein Inputparameter (siehe Anhang 7.4.2).

Im Modell wird eine Verteilung der jeweiligen Client-Server Verkehre so vorgenommen, dass diese über die Serverstandorte gleichverteilt sind. Diese Vorgehensweise erlaubt eine bestmögliche Verfügbarkeit der Servereinrichtungen. Die Vorgehensweise hat zur Folge, dass die Server nicht nach Maßgabe der Verkehrsnachfrage in ihrem Cluster dimensioniert werden und dass darüber hinaus Verkehre auf den Querwegen der

oberen Kernnetzebene geroutet werden, selbst wenn jedes IP-PoP Cluster über einen eigenen Server verfügt.

3 Anhang: Berechnung von mark-up Faktoren für QoS Parameter

In diesem Anhang wird der Zusammenhang zwischen den mark-up Faktoren und den QoS Parametern für die verschiedenen Verkehrsklassen untersucht. Obgleich die mark-up Faktoren im Referenzdokument als Eingabegröße vorzugeben sind, wird in diesem Anhang gezeigt, dass durch eine systematische Untersuchung diese mark-up Faktoren aus den QoS Parameter-Werten bestimmbar sind. Dazu werden Methoden und Modelle aus der Warteschlangen-Theorie herangezogen.

Der Anhang gliedert sich in fünf Abschnitte. Der erste Abschnitt gibt eine Einleitung in die Problematik und der zweite Abschnitt beschreibt das mathematisch einfachste Wartesystem auf der Basis von Poisson Ankunftsraten für die Pakete und zeigt, dass unter diesem Modell die QoS Parameter in einen einzigen Parameter abbildbar sind, aus dem der mark-up Faktor berechnet werden kann. Im dritten Abschnitt wird ein Poisson Warte-Verlust-System betrachtet und die sich daraus ergebenden mark-up Faktoren mit denen aus dem zweiten Kapitel verglichen.

Im vierten Abschnitt wird das Wartesystem auf den Fall von „Nicht-Poisson“ Ankunftsströmen verallgemeinert und es wird gezeigt, dass in den meisten praktischen Fällen die mark-up Faktoren, die aus den Wartesystemen mit Poisson Ankunftsraten abgeleitet werden, eine obere Grenze beschreiben. Im letzten Abschnitt wird der Fall von Verkehrsintegration unter einem Wartesystem mit priorisierten Warteschlangen betrachtet und eine Methodik entwickelt, die es gestattet, individuelle mark-up Faktoren für jede Verkehrsklasse zu berechnen, die im Kostenmodell als ein Anhaltspunkt zu differenzierten Kostenzuweisungen zu den Diensten herangezogen werden kann.

3.1 Einleitung

Im Referenzdokument wird vorgeschlagen, QoS Parameter in den verschiedenen Verkehrsklassen mittels mark-up Faktoren zu berücksichtigen und diese mark-up Faktoren als Eingabeparameter vorzugeben. In diesem Anhang wird das Problem der QoS Parameter aus analytischer Sicht betrachtet und es werden Modelle vorgeschlagen, mit denen sich diese mark-up Faktoren sachgerecht berechnen lassen.

Die wichtigsten QoS Faktoren, welche die Qualität von Diensten beeinflussen sind, vgl. [McDysan-00].

- mittlere Durchlaufzeit in einem Netzelement oder einem Teil von diesem welches sich als Warteschlange modellieren lässt,
- Standardabweichung für die Durchlaufzeit
- mittlerer Paketverlust

Für deren Berechnung werden Methoden der Warteschlangentheorie verwendet und über Erfahrungen mittels Simulation für die Probleme berichtet, die sich analytisch nicht oder nur noch näherungsweise abschätzen lassen. Die wichtigsten Parameter, welche die Werte für die QoS Faktoren beeinflussen sind:

$E(T_{ia})$ Mittelwert des Zeitintervalls zwischen zwei Paketankünften

$\sigma(T_{ia})$ Standardabweichung des Zeitintervalls zwischen zwei Paketankünften

$E(T_s)$ Mittelwert für die Bearbeitungszeit (Service Time t_s)

$\sigma(T_s)$ Standardabweichung für die Bearbeitungszeit

K Anzahl der Warteplätze für die Pakete

S Anzahl der Server

Aus diesen Parametern ergibt sich unter Anwendung der „Shorthandnotation“ von Kendall als allgemeines Modell, $G/G/S/K+S$ ¹³⁷ vgl. [Doyon-89] welches ein kombiniertes Warte-Verlustsystem beschreibt. Die wichtigsten Parameter die ein Netzplaner oder Analyst berechnen bzw. abschätzen möchte sind:

Wahrscheinlichkeiten:

P_0 Wahrscheinlichkeit, dass das System leer ist

P_s Wahrscheinlichkeit, dass alle Server belegt sind

P_w Wahrscheinlichkeit, dass ein ankommendes Paket warten muss

P_b Wahrscheinlichkeit, dass das System voll ist

P_l Wahrscheinlichkeit, dass ein ankommendes Paket verloren geht

Mittelwerte:

$E(n)$ mittlere Belegung des Systems

$E(u)$ mittlere Belegung der Warteschlange

$E(T_w)$ mittlere Wartezeit in der Warteschlange

$E(\tau)$ mittlere Durchlaufzeit eines Paketes

¹³⁷ Wir unterstellen, dass die statistischen Parameter für T_{ia} und T_s zeitkonstant sind und sich von daher im Betrachtungszeitraum nicht verändern, was in der Literatur auch als mit independent and identical distributed abgekürzt (iid) bezeichnet wird. D.h. es handelt sich in Wirklichkeit um ein $G_i/G_i/S/K+S$ Model aber in der Literatur wird das i i.d.R. weggelassen.

Im Netzdesign der Dimensionierung, aber auch der „Performanceanalysis“ von paketvermittelten Netzen werden i.d.R. vereinfachte Modelle angewendet, um die entsprechenden Berechnungen zu erleichtern. Es ist dann die Aufgabe des Netzplaners oder Netzanalysten, die Belastbarkeit der Ergebnisse aus solchen Näherungsrechnungen abzuschätzen, sei es durch detailliertere Berechnungen soweit überhaupt möglich oder aber durch Netzsimulation.

3.2 Wartesysteme mit Poisson Ankunftsrate

Das einfachste und am weit verbreitetste Näherungsmodell ergibt sich, wenn folgendes angenommen wird:

- für K ein genügend großer Wartespeicher, so dass die Paketverluste vernachlässigt werden können und sich damit ein reines Wartesystem ergibt
- für die Variable T_{ia} eine Exponentialverteilung¹³⁸ mit $f_{T_{ia}}(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$
- für die Variable T_s eine Exponentialverteilung¹³⁹ mit $f_{T_s}(t) = \mu \cdot \exp(-\mu \cdot t)$
- für S ein einziger Server $S=1$

Das entsprechende Wartesystem wird dann in der Kendallschreibweise durch M/M/1 Modell abgekürzt beschrieben. Die Anwendung des M/M/1 System hat erhebliche Vorteile für die praktische Anwendung wobei die wichtigsten Aspekte sind:

- es müssen nur die Mittelwerte zwischen den Paketankunftsrate und die Mittelwerte für die Paketlänge ermittelt (gemessen) werden
- im Netzmodell welches die reale Netztopologie in ein Netz von Warteschlangen abbildet können die Berechnungen in jeder Warteschlange unabhängig geführt werden¹⁴⁰
- die mittlere Durchlaufzeit einer Verbindung von einem Eingang des Netzes zu seinem Ausgang ergibt sich als Summe der Durchlaufzeiten über die entsprechenden Warteschlangen, die in der Verbindung liegen.

138 Der Parameter λ modelliert die mittlere Ankunftsrate für den Paketstrom und aus der Exponentialverteilung ergibt sich für $E(T_{ia}) = \sigma(T_{ia}) = 1/\lambda$ und für die diskrete Verteilungsfunktion des Paketstroms eine Poisson Verteilung der Mittelwert und Varianz gleich λ sind. Aus diesem Grunde wird die Dimensionierung mittels einer Näherung durch einen Poissons Ankunftsstroms auch als Ein Momenten-Methode bezeichnet.

139 Der Parameter μ modelliert die mittlere Bedienungsrate mit $E(T_s) = 1/\mu$.

140 Dies ergibt sich aus den Theoremen von Burke und Jackson, vgl. [Doyon-89].

In der Praxis ergeben sich aus den nachfolgenden Eingangsgrößen die entsprechenden Werte für ein M/M/1 System, die es gestatten, den mark-up Faktor wie folgt zu berechnen

$$(A3.1) \rho = \lambda \cdot t_s / 1000 \quad 141$$

$$t_s = E(L) \cdot 8 / v_s \quad 142$$

$$P_0 = 1 - \rho; \quad P_w = \rho; \quad P_b = 0 \quad P_1 = 0$$

$$E(n) = \rho / (1 - \rho); \quad E(u) = \rho^2 / (1 - \rho)$$

$$E(t_w) = t_s \cdot \rho / (1 - \rho); \quad E(\tau) = t_s / (1 - \rho)$$

$$\text{mufac} = 1 / \rho$$

mit den folgenden Eingangsgrößen:

ρ relative Belastung (Verkehr) im Server des Wartesystems

λ mittlere Paketankunftsrate [p/s]

$E(L)$ mittlere Paketlänge [oct]

v_s Geschwindigkeit des Servers bzw. Bandbreite einer Leitung [kbps]

mufac mark-up Faktor

Damit ist es möglich, bei Vorgabe der drei Eingangswerte die mittlere Durchlaufzeit $E(\tau)$ eines Paketes im Wartesystem zu berechnen wobei der Wert für die Standardabweichung aus der Annahme einer Exponentialverteilung für T_s sich mit $\sigma(\tau) = E(\tau)$ ergibt und der Paketverlust aus der Annahme für großes K gegen Null konvergiert. **D.h. bei Anwendung eines M/M/1 Wartemodell ist der einzig zu bestimmende Parameter die mittlere Durchlaufzeit $E(\tau)$.**

Im Netzdesign wird i.d.R. der Wert für $E(\tau)$ für jedes Wartesystem einer Ende-zu-Ende Verbindung vorgegeben um eine obere Schranke für den Mittelwert aus der Summe einzuhalten¹⁴³. Damit kann bei Vorgabe von $E(L)$ und $E(\tau)$ der Paketstrom in Funktion der Geschwindigkeit bzw. Bandbreite wie folgt abgebildet werden (die folgenden Gleichungen gelten für $E(\tau) > t_s$).

¹⁴¹ Die Division durch 1000 ist erforderlich da t_s in ms und λ in p/s angenommen wird.

¹⁴² Die Multiplikation mit acht ist erforderlich, da die Paketlänge in Oktets und die Bandbreite bzw. Geschwindigkeit in kbps angenommen wird.

¹⁴³ Für Sprachdienste auf der Basis von VoIP wird als mittlere Latenz im Netz ein Mittelwert von 50 ms vorgegeben, vgl. Tabelle A 4-1 im Anhang dieser Arbeit.

$$(A3.2) \lambda = 1000 \cdot (v_s / (E(L) \cdot 8) - 1/\tau)$$

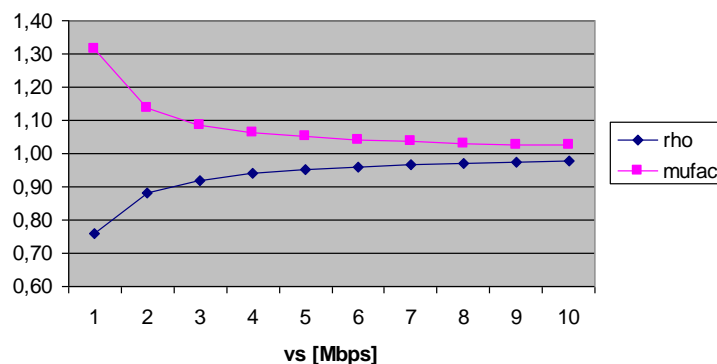
$$\rho = 1 - L \cdot 8 / (v_s \cdot E(\tau))$$

$$\text{mufac} = v_s \cdot E(\tau) / (v_s \cdot E(\tau) - L \cdot 8)$$

D.h., der mark-up Faktor ist eine Funktion der Grunddaten v_s , $E(L)$ und $E(\tau)$ und verringert sich bei steigender Geschwindigkeit der Übertragungssysteme und unveränderten $E(\tau)$. Abbildung A 3-1 zeigt die Ergebnisse eines Beispiels für ein VoIP Gateway bzw. eine Leitung zur Zusammenschaltung mit einer Paketlänge nach Tabelle A 4-2 mit $L = 150$ Oktets. Darin zeigt sich, dass der mark-up Faktor mit steigender Integration von Verkehr absinkt und gegen Eins konvergiert.

Abbildung A 3-1: Mark-up-Faktor und relative Belastung des Wartesystems in Funktion der Bandbreite bei $E(L) = 150$ oct.

Mark Up Faktor in Funktion der Bandbreite



In den bisherigen Betrachtungen wurde die Vorgabe der mittleren Durchlaufzeit $E(\tau)$ in allen Servern einer Ende-zu-Ende Beziehung als konstant angesehen. In der Praxis wird man die zulässige Ende-zu-Ende Durchlaufzeit über die verschiedenen Wartesysteme der Verbindung so verteilen, dass die Systeme mit kleiner Bandbreite bzw, Prozessorgeschwindigkeit einen hohen Anteil und die Systeme mit hoher Bandbreite bzw. Prozessorgeschwindigkeit einen kleinen Anteil erhalten. Unter der Annahme, dass für $E(\tau)$ ein Basiswert $E(\tau_b)$ bei einer Basisbandbreite v_b festgelegt wird,¹⁴⁴ kann der, einem Wartesystem zuzuteilende $E(\tau)$ Wert als Funktion von der tatsächlichen Bandbreite wie folgt berechnet werden.

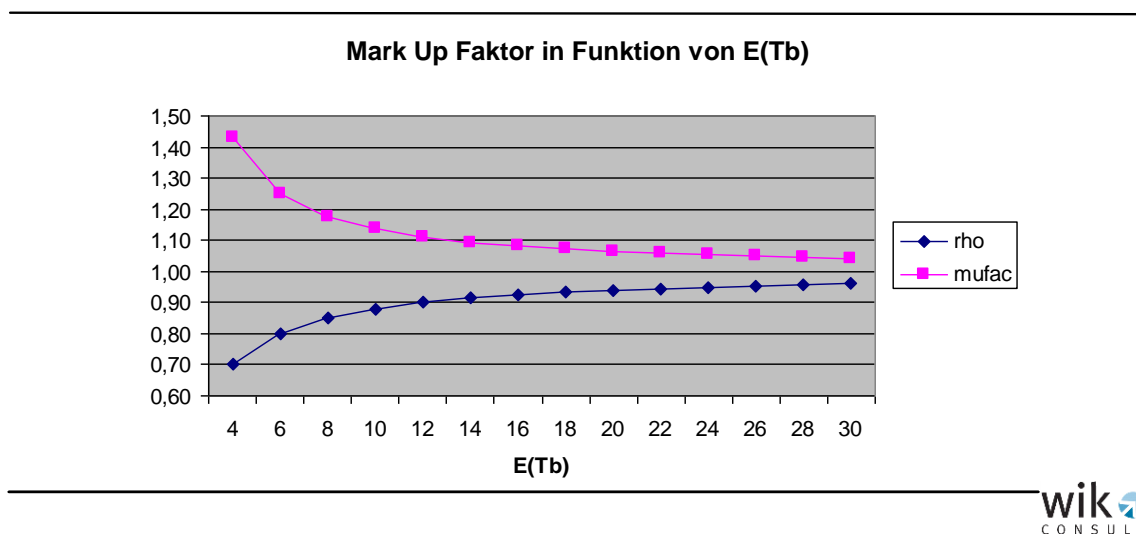
¹⁴⁴ Dies wird typischerweise die Bandbreite am Ausgang des ersten Netzelementes z.B. dem DLAM bzw. der MSAU sein.

$$(A3.3) \quad E(\tau) = \tau_b \cdot v_b/v_s$$

$$\rho = \max\{1 - L \cdot 8/(v_b \cdot E(\tau_b)), 0\}^{145}$$

Aus diesen Gleichungen ergibt sich für ρ und damit für mufac ein konstanter Wert der nur von den Parametern $E(\tau_b)$ und v_b abhängt. Die folgende Abbildung zeigt für das gleiche Beispiel wie in Abbildung A 3-1 die Entwicklung des mark-up Faktors in Beziehung zu $E(\tau_b)$ bei einer Basisbandbreite von v_s mit 1 Mbps.

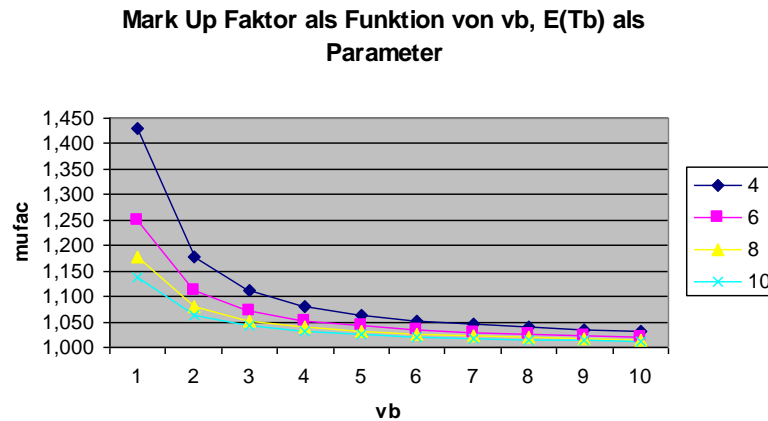
Abbildung A 3-2: Mark-up-Faktor und relative Belastung des Wartesystems in Funktion von $E(\tau_b)$ bei $v_b = 1$ Mbps



Als Basisbandbreite wird i.a. die kleinste Bandbreite in der Kette der Wartesysteme einer Ende-zu-Ende Verbindung gewählt und als Basiswartezeit $E(\tau_b)$ ein Wert, der es erlaubt, dass die totale Durchlaufzeit über die Ende-zu-Ende Verbindung einen vorzuziehenden Wert nicht überschreitet; z.B. 60 ms für VoIP. Daraus folgt, dass unter der Annahme von 10 Warteschlangensystemen in einer Ende-zu-Ende Verbindung und der Zuteilung der Werte für $E(\tau)$ nach Beziehung A3,3) sich mit $E(\tau_b) = 6$ ms eine totale Durchlaufzeit über die zehn Server von 60 ms ergibt. Die folgende Abbildung A 3-3 zeigt die Entwicklung des mark-up Faktors in Funktion der Basisbandbreite v_b und der Basis Wartezeit $E(\tau_b)$. Der entsprechende mark-up Faktor beträgt für $\tau_b = 6$ in diesem Fall $\text{mufac} = 1,25$. Abbildung A 3-3 zeigt, dass der mark-up Faktor schnell abnimmt wenn entweder die Basisgeschwindigkeit v_b bzw. die zulässigen Basiswartezeit $E(\tau_b)$ oder beides steigt.

¹⁴⁵ Die max Beziehung muss eingeführt werden um negative Werte zu vermeiden. Dies tritt allerdings nur theoretisch- aber nicht in der Praxis auf, was bedeutet, dass der geforderte $E(\tau)$ Wert mit dem v_b Wert nicht erfüllbar ist.

Abbildung A 3-3: Mark-up-Faktor in Funktion der Basisbandbreite und der Durchlaufzeit des Basiswartesystems in ms



Aus diesen Betrachtungen ergibt sich, dass der mark-up Faktor unter Zugrundelegung der zulässigen Ende-zu-Ende Durchlaufzeit und der Anzahl der Wartesysteme in der Ende-zu-Ende Verbindung sich wie folgt formulieren lässt:

$$(A3.4) \text{ mufac} = v_b \cdot \tau_{e2e} / \{\max(v_b \cdot \tau_{e2e} - E(L) \cdot 8 \cdot n_{e2e}; 0)\}$$

mit

v_b Basisbandbreite [kbps]

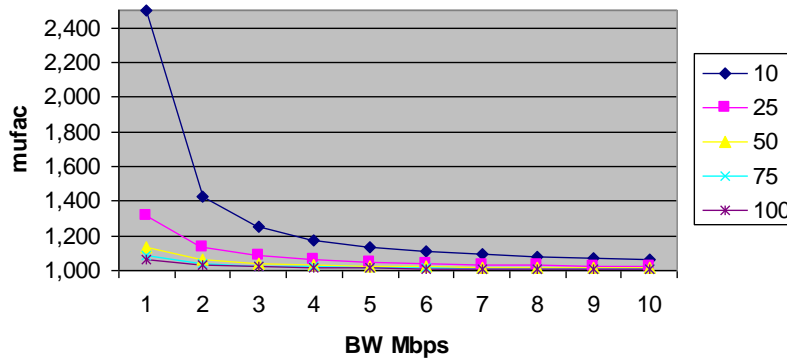
τ_{e2e} mittlere Ende-zu-Ende Durchlaufzeit

n_{e2e} Anzahl der Wartesysteme in der Ende-zu-Ende Verbindung

Abbildung A 3-4 zeigt wieder die Entwicklung der mark-up Faktoren in Abhängigkeit von der Basisbandbreite bzw. Geschwindigkeit v_b und der mittleren Ende-zu-Ende Durchlaufzeit. Auch hier zeigt sich der gleiche Zusammenhang wie in Abbildung A 3-3, dass der mark-up Faktor schnell abnimmt, wenn entweder die Basisbandbreite, die zulässige Ende-zu-Ende Durchlaufzeit oder beides erhöht wird.

Abbildung A 3-4: Mark-up-Faktor in Funktion der Basisbandbreite und der Durchlaufzeit der Ende-zu-Ende Verbindung in ms

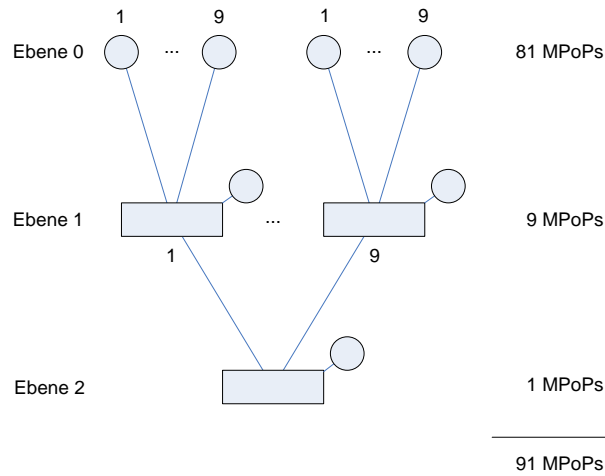
Mark Up Faktor als Funktion der BW und von E(Te2e)



Man beachte, dass in den bisherigen Betrachtungen die einem Wartesystem zugewiesene Durchlaufzeit nach (A3.3) mit dem Quotienten der Geschwindigkeit herabgesetzt wurde, was zu einem gleichbleibenden mark-up Faktor über alle Wartesysteme in der Kette führte. Allerdings wird dadurch nicht unbedingt eine Optimierung der totalen Bandbreite gewährleistet, vielmehr ist das Problem der optimalen Verteilung der Ende-zu-Ende Durchlaufzeit über die Menge der Wartesysteme ein mehrdimensionales Optimierungsproblem, woraus sich ergibt, dass oft dem Wartesystem der untersten Ebene mit der kleinsten Bandbreite eine höhere Durchlaufzeit zugeordnet wird und den darüberliegenden Systemen eine entsprechend geringere.

Das nachfolgende Beispiel zeigt diesen Sachverhalt. Darin wird ein dreistufiges Netz angenommen, in dem in der mittleren Ebene neun MPoP aus Knoten der unteren Ebene und ein kollozierter MPoP angeschlossen sind und in der oberen Ebene neun Knoten der mittleren Ebene und ein kollozierter MPoP. Daraus ergeben sich 92 MPoP im Konzentrationsnetz und es wird angenommen, dass alle MPoP die gleichen Nutzerzahlen haben. Damit berechnet sich die gesamte Bandbreite im Konzentrationsnetz 81-mal der Bandbreite am Ausgang des untersten Knoten und 9-mal der Bandbreite aus dem Ausgang des mittleren Knotens (vgl. Abbildung A 3-5).

Abbildung A 3-5: Struktur des Konzentrationsnetzes für das Netzbeispiel



Im ersten Fall von Tabelle A 3-1 wird die Durchlaufzeit $E(\tau)$ in jeder Stufe gleichmäßig um zehn reduziert (linker Teil der Tabelle), während im zweiten Beispiel diese Reduktion in jeder Stufe mit der Quadratwurzel aus 10 erfolgt (rechter Teil der Tabelle).

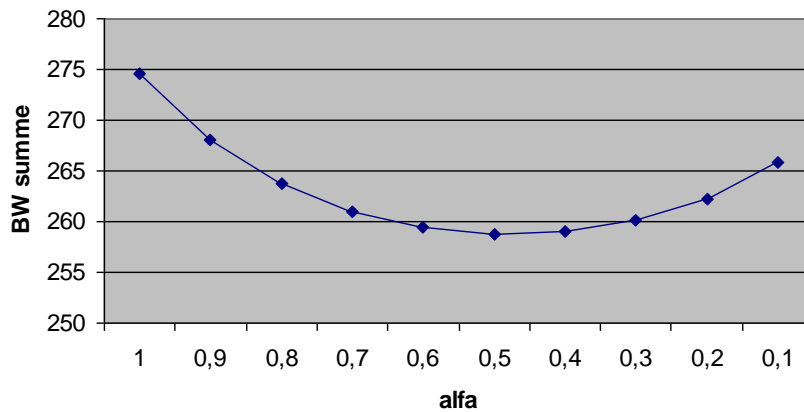
Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass für eine Ende-zu-Ende Durchlaufzeit von 10ms im Konzentrationsnetz im ersten Fall (grau markierte Felder) die totale erforderliche Bandbreite 275 Mbps beträgt, während sich im zweiten Fall (gelb markierte Felder) nur 259 Mbps ergeben. Erwartungsgemäß ist der mark-up Faktor im ersten Fall für alle Wartesysteme gleich, während er sich im zweiten Fall mit steigender Geschwindigkeit reduziert.

Tabelle A 3-1: Beispiel zur Verteilung der Durchlaufzeit mit $L = 150$ Okt,

lambda [p/ms]	tau [ms]	P	$v_s^{(n)}$ [Mbps]	v_t [Mbps]	mufac	tau [ms]	ρ	$v_s^{(n)}$ [Mbps]	V_t [Mbps]	mufac
0,7333	9,0091	0,8685	1,0132	82,07	1,1514	7,0611	0,8381	1,0499	85,05	1,1931
7,3333	0,9009	0,8685	10,1320	91,19	1,1514	2,2329	0,9424	9,3374	84,04	1,0611
73,3333	0,0901	0,8685	101,3199	101,32	1,1514	0,7061	0,9811	89,6994	89,70	1,0193
Global	10,0000		112,4651	274,57		10,0001		100,0868	258,78	

Um diese Zusammenhänge verallgemeinern zu können, wird am selben Beispiel die Entwicklung der totalen Bandbreite im Konzentrationsnetz mittels einer systematischen Reduktion der Durchlaufzeiten für die Systeme in den höheren Ebenen durch einen Faktor α mit der Gleichung $E^{(n)}(\tau) = E^{(n-1)}(\tau) / (\text{nodn}^{(n-1)})^\alpha$ $n=0, \dots, 3$ vorgenommen, Abbildung A 3-6 zeigt die Ergebnisse.

Abbildung A 3-6: Bandbreitenwerte des Netzbeispiels eines Konzentrationsnetzes bei Festlegung der Reduktion der Durchlaufzeit, der durch den α Faktor beeinflusst ist



Zusammenfassend ergibt sich, dass **die Anwendung eines konstanten mark-up Faktors über alle Wartesysteme einer Ende-zu-Ende Verbindung eine obere Grenze für die äquivalenten Bandbreitenanforderungen berechnet** und durch entsprechende Feinabstimmung der mark-up Faktoren diese Bandbreitenanforderungen reduziert werden können.

3.3 Warteverlustsystem mit Poisson Ankunftsrate

In den bisherigen Betrachtungen wurde ein reines Wartesystem angenommen. Allerdings wird von den IP Netzbetreibern, vor allem bei hoher Auslastung der Systeme, der Verkehrsfluss durch Entfernung von Paketen künstlich reduziert. Dies lässt sich durch ein kombiniertes Warte-Verlustsystem beschreiben, was unter den Annahmen eines Poisson Ankunftsstroms und einer Exponentialverteilung T_s zu einem System in der Kennal Abkürzung von M/M/1/K+1 führt.

Für die entsprechenden Beziehungen ergibt sich dann wie in A3.1

$$(A3.5) \rho = \lambda \cdot t_s / 1000$$

$$t_s = E(L) \cdot 8/v_s$$

$$P_0 = (1-\rho) / (1-\rho^{K+2}); P_w = \rho \cdot (1-\rho^K) / (1-\rho^{K+2}); P_b = P_1 = \rho^{K+1} \cdot (1-\rho) / (1-\rho^{K+2})$$

$$E(n) = E(u) \cdot \rho \cdot (1-\rho^{K+1}) / (1-\rho^{K+2}); E(u) = P_0 \cdot \rho \cdot \sum_{k=1..K} k \cdot \rho^k$$

$$E(t_w) = E(u) / \{\lambda \cdot (1-\rho)\}; E(\tau) = E(n) / \{\lambda \cdot (1-\rho)\}$$

$$p_t = \rho \cdot (1-p_l)$$

$$\mu_{\text{fac}} = (1-p_l)/\rho$$

mit

ρ fiktive Auslastung des Systems bei $P_l = 0$

p_t tatsächliche Auslastung des Systems

Man beachte, dass sich die Durchlaufzeit mit der Reduktion von K verringert, weil Teile der Pakete nicht in den begrenzten Wartespeicher gelangen, sondern verloren gehen. Für große Werte von K konvergiert das System jedoch gegen ein reines Wartesystem $M/M/1$, Tabelle A 3-2 zeigt ein entsprechendes Beispiel.

Tabelle A 3-2: Ergebnisse eines Beispiels für ein Warte-Verlust System $M/M/1/K+1$, dessen Werte für $K=40$ gegen die Werte eines reinen Wartesystems $M/M/1$ konvergieren

L oct	150	vs kbps	1000	ts ms	1,2
rho	0,7	lambda p/ms	0,583333333		
K	Po	Pw	Pl	E(n)	E(T) ms
5	0,3269	0,6346	0,0385	1,7051	3,0400
10	0,3042	0,6898	0,0060	2,1649	3,7337
15	0,3007	0,6983	0,0010	2,2937	3,9360
20	0,3001	0,6997	0,0002	2,3247	3,9859
25	0,3000	0,7000	0,0000	2,3316	3,9971
30	0,3000	0,7000	0,0000	2,3330	3,9994
35	0,3000	0,7000	0,0000	2,3333	3,9999
40	0,3000	0,7000	0,0000	2,3333	4,0000

Für den Fall einer fest vorgegebenen Durchlaufzeit kann die angebotene Paketrate für die Werte von K , in denen noch nicht die Konvergenz an das $M/M/1$ Wartesystem auftritt, entsprechend erhöht werden, damit sich gleiche Werte für die mittlere Durchlaufzeit ergeben. Auf dieser Basis kann der mark-up Faktor entsprechend Beziehung (A3.5) berechnet werden, Man beachte, dass vor allem für kleine Werte von K dieser mark-up Faktor unter Eins liegen kann, da in diesem Fall ein hoher Paketverlust entsteht. Dies ist vor allem der Fall für die Verkehrsklassen des best effort möglich, da für diese Dienste in der BH u.U. verhältnismäßig hohe Paketverluste als zulässig angesehen werden können. Tabelle A 3-3 zeigt die Ergebnisse für das gleiche Beispiel wie in Tabelle A 3-2, jedoch mit angepassten Werten für die Paketrate und dem sich daraus ergebenden mark-up Faktor.

Tabelle A 3-3: Ergebnisse eines Beispiels für ein Warte-Verlust System M/M/1/K+1 mit konstanter von K unabhängiger Durchlaufzeit

K	rho	lambda	Po	Pw	PI	E(n)	E(T) ms	mufac
5	0,94435	0,78696	0,16852	0,71195	0,11952	2,77159	4,00000	0,93236
10	0,72827	0,60689	0,27791	0,71359	0,00849	2,40695	4,00000	1,36145
15	0,70533	0,58777	0,29545	0,70344	0,00111	2,34849	4,00000	1,41621
20	0,70109	0,58424	0,29903	0,70079	0,00017	2,33655	4,00000	1,42611
25	0,70022	0,58352	0,29980	0,70017	0,00003	2,33400	4,00000	1,42808
30	0,70004	0,58337	0,29996	0,70004	0,00000	2,33347	4,00000	1,42847
35	0,70001	0,58334	0,29999	0,70001	0,00000	2,33336	4,00000	1,42855
40	0,70000	0,58334	0,30000	0,70000	0,00000	2,33334	4,00000	1,42857

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass:

- die Anwendung eines reinen Wartesystems M/M/1, in dem nur die mittlere Durchlaufzeit betrachtet wird, mit einem Paketverlust $P_1=0$ zu mark-up Faktoren führt, die eine Obergrenze für die mark-up Faktoren bilden gegenüber dem realen Fall, der auch ein $P_1>0$ zulässt.
- bei kleinen Werten $P_1 < 10E-4$ die mark-up Faktoren aus dem M/M/1 System eine gute Näherung ergeben, aus denen reale mark-up Faktoren resultieren, die aus dem korrespondierenden M/M/1/K+1 System abgeleitet werden.
- mark-up-Werte kleiner Eins möglich sind und die entsprechenden Paketverluste bei vorgegebener Durchlaufzeit aus einem M/M/1/K+1 System berechenbar sind.

3.4 Allgemeines Wartesystem

In den bisherigen Betrachtungen wurde ein Wartesystem M/M/1 mit Poisson-Ankunfts-raten und einer Exponentialverteilung für T_s für den nutzerinduzierten Verkehr angenommen. Dies hatte den Vorteil, dass die resultierenden Verkehre in den Wartesystemen des Netzes diese Eigenschaft nicht ändern, die entsprechenden realen Durchlaufzeiten aus den lokalen Werten je Wartesystem berechnet werden können und die Ende-zu-Ende Durchlaufzeit von einem Netzeingang zu einem Netzausgang aus der Summe der Durchlaufzeiten der entsprechenden Verbindung berechnet werden kann,

Es ist aber zu beachten, dass in der Praxis die Verkehrsnachfrage i.d.R. nicht die Eigenschaften eines M/M/1 Systems annehmen, sondern im allgemeinen Fall durch ein G/G/1 System beschrieben werden können. Allerdings gilt diese Berechnung nur für das erste Wartesystem am Netzeingang, da sich die Verkehrscharakteristik bei Durchlauf durch jedes Wartesystem verändert und diese Veränderung für jedes

Wartesystem von jeder Ende-zu-Ende Verbindung analysiert werden müsste. Da dies mit vertretbarem Aufwand – wenn überhaupt – nur für sehr kleine Netze möglich ist, soll in diesem Abschnitt lediglich untersucht werden, inwieweit die Anwendung des M/M/1 Systems zur Berechnung der mark-up Faktoren gegenüber dem G/G/1 vertretbar ist.

Die mittlere Belegung eines Wartesystems G/G/1 kann mittels der Beziehung von Marchal berechnet werden und daraus mittels der Little Beziehung die mittlere Durchlaufzeit bzw, mit der Klingmann Näherung,¹⁴⁶ vgl. [Gelenbe-98]. Damit ergibt sich auf der Basis der Nomenklatur aus A3.1 für die Beziehung nach Marchal:

(A3.6)

$$E(n) = \rho \cdot \left[1 + g \cdot \frac{\rho \cdot (K_a + K_s)}{2 \cdot (1 - \rho)} \right]$$

mit

$$K_a = \sigma^2(T_{ia}) / E^2(T_{ia})$$

$$K_s = \sigma^2(T_s) / E(T_s)^2$$

$$g = \exp \left[\frac{-2 \cdot (1 - \rho) \cdot (1 - K_a)^2}{3 \cdot \rho \cdot (K_a + K_s)} \right] \quad \text{if } K_a < 1$$

$$g = \exp \left[\frac{(1 - \rho) \cdot (1 - K_a)}{K_a + 4 \cdot K_s} \right] \quad \text{if } K_a \geq 1$$

Und daraus mit der Little Formel

$$E(\tau) = E(n) \cdot t_s / \rho$$

Aus (A3.6) resultiert:

- für $K_a=1$ und $K_s=1$ das M/M/1 Wartesystem aus Beziehung AX,1 mit $g=1$ und $E(n) = \rho/(1-\rho)$.
- für $K_a \leq 1$ und $K_s \leq 1$ die Durchlaufzeit aus einem M/M/1 System und die daraus folgenden mark-up Faktoren eine obere Schranke berechnen
- für den Fall eines Poisson Ankunftsstroms ($K_a=1$) und einer allg. Verteilung für T_s mit endlicher Varianz $\sigma^2(T_s) \in [0, \infty)$ ein M/G/1 System und die Marchal Formel sich zur Formel nach Pollaczek-Khinchin mit $g=1$ und $E(n) = \rho + \rho^2(1+K_s)/\{2 \cdot (1-\rho)\}$ reduziert.

¹⁴⁶ Die Näherungsformel von Klingmann unterscheidet sich von der von Marchal darin, dass der Korrekturfaktor g auf Eins gesetzt wird und ist daher weniger aufwendig in ihrer Berechnung und umkehrbar wenn $E(n)$ bzw. $E(\tau)$ vorgegeben ist und ρ berechnet werden soll.

- für den Fall einer festen Länge der Pakete und damit $K_s = 0$ und einer allgemeinen Verteilung für T_{ia} ein G/D/1 System.

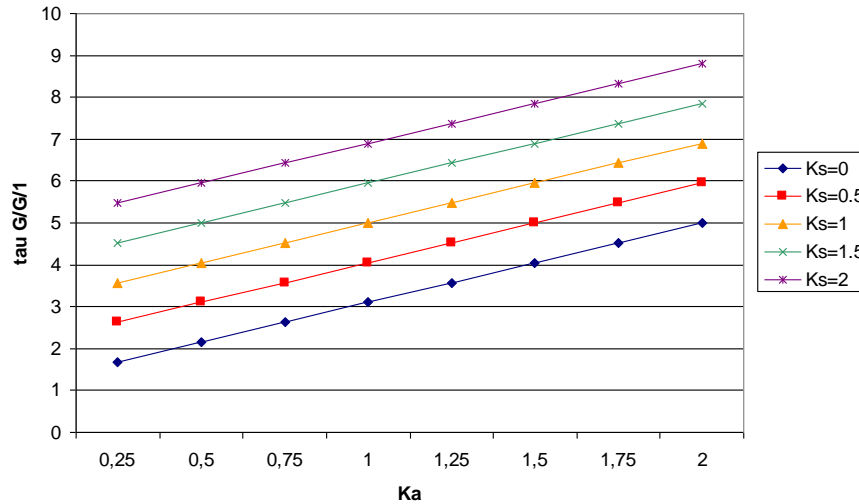
In der Praxis generieren zahlreiche Online Dienste auf der Ebene der IP Pakete bzw. Ethernet Rahmen eine Verkehrscharakteristik, die gut mit einem G/D/1 System angenähert werden kann. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass Ethernetrahmen in ihrer Länge begrenzt sind und außerdem viele ISP auch die IP Paketlänge im Netz begrenzen und damit die Pakete oft eine konstante Servicedauer haben. Nachfolgende Tabelle A 3-4 zeigt für verschiedene Dienste qualitative Indikatoren für K_s und K_a .

Tabelle A 3-4: Qualitative Indikatoren für die Verkehrscharakteristik verschiedener Dienste

Name	K_a	K_s	M/M/1 Approximation
Premium Business Dienste	< 1	< 1	Obergrenze für $E(\tau)$
Sprachdienste	< 1	< 1	
Konferenzdienste	< 1	< 1	
VoD Dienste	> 1	< 1	Obergrenze für $E(\tau)$ wenn $K_a + K_s \leq 2$
Business Data Dienste	> 1	< 1	
P2P	> 1	< 1	
Best effort Dienste	> 1	< 1	

In Abbildung A 3-7 ist die Entwicklung der Durchlaufzeiten in Abhängigkeit von K_a mit K_s als Parameter dargestellt. Daraus ergibt sich für das zugehörige M/M/1 System mit $K_a = K_s = 1$ ein Wert von $E(\tau) = 5\text{ms}$ und es zeigt sich, dass für $K_a \leq 1$ und $K_s \leq 1$ die Durchlaufzeiten des M/M/1 Systems eine obere Grenze ergeben. Allerdings sind die Abweichung für sehr kleine Werte von K_a und K_s gegenüber dem M/M/1 System von Bedeutung und die Anwendung eines M/M/1 System führt zu einer Überdimensionierung.

Abbildung A 3-7: Durchlaufzeiten für ein G/G/1 System mit $V_s = 1$ Mbps, $E(L) = 150$, $\lambda = 633,3333333$ [p/s]¹⁴⁷



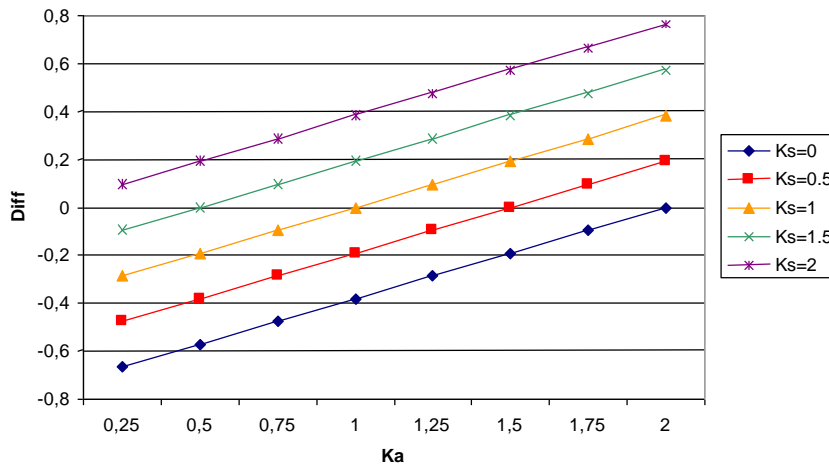
Aus den Ergebnissen aus Abbildung A 3-7 ergibt sich für die Dienste mit $K_a < 1$ und $K_s \leq 1$, dass die Berechnung der mark-up Faktoren auf der Basis der mittleren Durchlaufzeiten und einem M/M/1 Wartesystem wieder eine obere Grenze darstellen, während für die Dienste mit $K_a > 1$ zu untersuchen bleibt, ob die Erhöhung im K_a Wert durch den $K_s < 1$ Wert kompensiert werden kann. Zu diesem Zweck kann eine von [Garcia-10] vorgeschlagene Methode verwendet werden, ein G/G/1 Wartesystem mit $K_a > 1$ durch ein äquivalentes M/G/1 Wartesystem zu ersetzen, wobei die Reduktion auf $K_a=1$ durch eine Erhöhung von K_s kompensiert wird und zwar in der Form, dass beide Wartesysteme die gleiche Durchlaufzeit abbilden. Bildet sich durch diese Berechnung ein $K_s \leq 1$, so ergeben die mit einem M/M/1 Wartesystemen berechneten mark-up Faktoren wieder eine obere Grenze. Aus dieser Untersuchung lässt sich zeigen, dass für G/G/1 Systeme mit $K_a + K_s \leq 2$ das M/M/1 System immer eine Obergrenze für die Durchlaufzeit bildet und für $K_a + K_s = 2$ die Durchlaufzeit mit der des M/M/1 Systems identisch ist. Dies wird in Abbildung A 3-8 gezeigt, welche die Ergebnisse entsprechender Berechnungen grafisch darstellt.

Diese Abbildung zeigt auch, dass die Näherung eines G/G/1 Systems durch ein M/M/1 System für Werte um $K_s + K_a = 2$ zu guten Näherungen für den realen mark-up Faktor führen, aber für $K_s + K_a \ll 2$ zu erheblich größeren Werten und für $K_s + K_a \gg 2$ zu erheblich geringeren Werten des mark-up Faktors gegenüber seinem realistischen Wert. Allerdings ist vor allem der Fall von $K_s + K_a \gg 2$ unter Berücksichtigung der gegenwertigen Dienste aus praktischer Sicht ohne nennenswerte Bedeutung (vgl.

¹⁴⁷ Die Berechnung erfolgte mit der Näherung von Klingmann.

Tabelle A 3-5) und damit resultiert wieder, dass die Abschätzung der mark-up Faktoren mit dem M/M/1 eine Obergrenze für die realen Werte ergibt.

Abbildung A 3-8: Relative Abweichung der Durchlaufzeit des G/G/1 Systems aus Abbildung A3-7 gegenüber der Durchlaufzeit eines korrespondierenden M/M/1 Systems



3.5 Verkehrsintegration unter Wartesystemen mit Priorität

In den vorangehenden Abschnitten wurde angenommen, dass die Verkehre der verschiedenen Dienste über eigene virtuelle Tunnel übertragen werden. Damit ist sichergestellt, dass Verkehre aus anderen Diensten nicht die QoS Werte des Verkehrs eines Tunnels beeinflussen. Allerdings hat dies den Nachteil, dass der Gewinn durch Verkehrsintegration nicht realisiert werden kann und sich damit höhere mark-up Faktoren ergeben.

In diesem Abschnitt wird angenommen, dass die verschiedenen Verkehre die Kapazitäten einer Einrichtung gemeinsam nutzen. Um eine QoS Differenzierung zu erreichen werden die Pakete jeder Verkehrsklasse in eine separierte Warteschlange abgelegt und mit unterschiedlichen Prioritäten entnommen; dies entspricht unter Beachtung derzeitiger Internetprotokolle dem Konzept des DiffServ. QoS wird wieder, wie auch in den vorangegangenen Abschnitten, durch die mittlere Durchlaufzeit in einem Wartesystem abgebildet. Daraus folgt, dass dem Dienst mit der strengsten QoS Anforderung, also der kleinsten Durchlaufzeit, die höchste und dem Dienst mit der geringsten QoS Anforderung die kleinste Priorität zugewiesen wird, Aus den Verkehrsklassen ergeben sich damit maximal sieben Prioritätsklassen.

Für die Berechnung wird ein sogenanntes „Non Pre-empty“ Prioritätssystem angenommen¹⁴⁸. Es wird weiterhin angenommen, dass die Paketankunftsströme eine Poisson Verteilung aufweisen und die Paketlänge durch ihren Mittelwert und ihre Standardabweichung modelliert werden. Damit wird das Wartesystem durch ein Non Pre-empty M/G/1 Prioritäts-Warteschlangensystem modelliert, für welches analytische Modelle vorliegen¹⁴⁹, vgl. [Akimaru-99].

Um das Problem zu modellieren, werden folgenden Eingangsgrößen betrachtet:

- K Anzahl der Verkehrsklassen¹⁵⁰
- λ_k Paketstrom aus der k-ten Verkehrsklasse
- $E(L_k)$ mittlere Länge der Pakete in der k-ten Verkehrsklasse
- $\sigma(L_k)$ Standerabweichung der Länge der Pakete in der k-ten Verkehrsklasse
- τ_k mittlere Durchlaufzeit im Wartesystem für Pakete der k-ten Verkehrsklasse

Gesucht wird ein optimaler Wert für die äquivalente Bandbreite $v_t^{(i)}$, welcher die entsprechenden Nachfragen unter den QoS Parameterwerten τ_k für alle $k=1\dots K$ befriedigt.

Das Modell lautet dann:

(A.3.7)

$$\min V_t^{(i)}$$

$$t_s^{(k)} + t_w^{(k)} \leq \tau_k \quad \forall k = 1, \dots, K$$

$$t_w^{(k)} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k \cdot m_2(T_s^{(k)})}{(1 - \sum_{j=1}^{k-1} \rho_j) \cdot (1 - \sum_{j=1}^k \rho_j)}$$

$$m_2(T_s^{(k)}) = \sigma^2(T_s^{(k)}) + E^2(T_s^{(k)})$$

148 Das bedeutet, dass das sich ein im Server befindliches Paket vollständig bearbeitet wird auch wenn zwischenzeitlich ein Paket höherer Priorität eintrifft. Dies ist im Gegensatz zum sog. Pre-empty System, indem ein Paket niedriger Priorität aus dem Server entfernt wird, wenn ein Paket höherer Priorität eintrifft, vgl. [Akimaru-99].

149 Der allgemeine Fall eines G/G/1 Non Preempty Prioritäts-Wartesystem kann durch ein äquivalentes M/G/1 Non Preempty Prioritäts-Wartesystem approximiert werden, vgl. [Garcia-10].

150 Man beachte, dass hier der Index $k=1..K$ in Anlehnung an die Literatur für die Bezeichnung der Verkehrsklassen verwendet wird und in keinem Zusammenhang mit der Verwendung von K für die Beschreibung eines Wartesystems mit begrenzten Warteplätzen vorliegt, da die Beziehung (A.3.7) nur für reine Wartesysteme mit theoretisch unendlichem Wartespeichern gilt.

$$\sigma(T_s^{(k)}) = \frac{\sigma(L_k) \cdot 8}{V_t}$$

$$E(T_s^{(k)}) = \frac{E(L_k) \cdot 8}{V_t^{(i)}} = t_s^{(k)}$$

$$\rho_j = \lambda_j \cdot t_s^{(i)}$$

Aus dem Modell kann dann ein globaler mark-up Faktor bestimmt werden, indem der Wert für $v_t^{(i)}$ durch den Mittelwert der Summe der erforderlichen Bandbreite aus allen Verkehrsklassen dividiert wird. Allerdings sind für das Kostenmodell die individuellen mark-up Faktoren für jede Verkehrsklasse zu bestimmen, da die Einheitskosten für einen Dienst höherer Priorität größer sind als die Einheitskosten für einen Dienst geringer Priorität.

Zum Zweck der Differenzierung werden die äquivalenten Bandbreiten je Verkehrsklasse $v_k^{(s)}$ berechnet, die bei Verkehrsseparierung in eigenen Tunneln entstehen. Die relativen Werte dieser Bandbreiten werden zur Berechnung der individuellen mark-up Faktoren herangezogen.

Damit ergibt sich:

$$(A.3.8) \min V_t^{(s)} = \sum_{k=1}^K V_k^{(s)}$$

$$t_s^{(k)} + t_w^{(k)} \leq E(\tau_k) \quad \forall k = 1, \dots, K$$

$$t_w^{(k)} = \frac{\rho_k}{1 - \rho_k} \cdot \frac{1 + C^2(T_s^{(k)})}{2} \cdot E(T_s^{(k)})$$

$$E(T_s^{(k)}) = \frac{E(L_k) \cdot 8}{V_k^{(s)}} = t_s^{(k)}$$

$$\sigma(T_s^{(k)}) = \frac{\sigma(L_k) \cdot 8}{V_k^{(s)}}$$

$$C(T_s^{(k)}) = \frac{\sigma(T_s^{(k)})}{E(T_s^{(k)})}$$

Für die mark-up Faktoren unter Verkehrsintegration und Priorisierung ergibt sich dann:

$$(A.3.9) \text{ mufac}_k^{(i)} = \frac{V_k^{(i)}}{E(V_k^{(i)})}$$

$$V_k^{(i)} = V_t^{(i)} \cdot \frac{V_k^{(s)}}{V_t^{(s)}}$$

Im Folgenden wird der Einfluss der Dimensionierung auf die mark-up Faktoren bei Verkehrsintegration im Server und separierten Warteschlangen mit Priorisierung gegenüber einer Verkehrstrennung in separierten virtuellen Tunneln an einem Beispiel untersucht. Das Beispiel betrachtet vier Verkehrsklassen¹⁵¹ mit vorgegebenen Werten $E(\tau_k)$, die nicht überschritten werden sollen, und zwar für $E(\tau_1) = 5\text{ms}$ $E(\tau_2) = 10\text{ms}$ $E(\tau_3) = 30\text{ms}$ und $E(\tau_4) = 100\text{ms}$. Die Ergebnisse sind in Tabelle A 3-5 dargestellt, wobei bei Verkehrsseparation die Bandbreite der Tunnel so festgelegt wurde, dass die Durchlaufzeit gegen den vorgegebenen Wert von $E(\tau_k)$ konvergiert. Bei der Berechnung zur Verkehrsintegration unter DiffServ wird die gemeinsame Bandbreite so festgelegt, dass sich Durchlaufzeiten für $k=1..K$ ergeben, die die vorgeschriebenen Werte nicht überschreiten.

Tabelle A 3-5: Vergleich der Ergebnisse für die Berechnung des mark-up Faktors bei Verkehrsintegration mittels DiffServ Verkehrsintegration (mit Dominanz durch $k=1$ und Verkehrsseparation)

Gemeinsame Daten				Verkehrs-Integration				Verkehrs-Separation			
K	λ p/s	E(L) okt	$\sigma(L)$ okt	ρ	τ ms	mufac	V_{eq} kbps	ρ	τ ms	mufac	V_{eq} kbps
1	50	100	100	0,0133	5,00	4,4936	179,74	0,2000	5,00	5,0000	200
2	100	150	0	0,0400	5,40	1,5343	184,12	0,5858	10	1,7072	204,86
3	200	512	1.024	0,2730	8,69	1,2148	995,17	0,7398	29,99	1,3517	1.107,31
4	400	512	1.536	0,5460	55,69	1,0019	1.641,50	0,8970	99,91	1,1148	1.826,49
Global				0,8724		1,1462	3.000,52	0,7840		1,2755	3.338,66

Aus den Ergebnissen kann der Integrationsgewinn durch Anwendung von DiffServ gegenüber Verkehrstrennung entnommen werden, der durch eine höhere Auslastung erreicht wird (0,8724 gegenüber 0,784). Daraus folgt eine entsprechende Reduktion der mark-up Faktoren, Weiterhin zeigt sich, dass im Beispiel die strengste QoS

¹⁵¹ Diese vier Klassen könne aus den sieben Verkehrsklassen nach Tabelle 4-5 so gebildet werden, dass die Verkehre aus den OAM Paketen (Control) mit den von Pseudowire zusammengefasst werden, Real Time und Streaming zu einer anderen, Business Data Verkehre eine selbstständige Klasse bilden und Best Effort mit P2P wieder zusammengefasst werden. Für die die beiden statistischen Momente von L wurden Werte gewählt die reale Daten aus den jeweiligen Daten abbilden und die Paketrade wurde als steigend mit sinkender Priorität angenommen und zwar durch den Faktor Zwei in der Klasse k gegenüber der Klasse k-1.

Anforderung für $k=1$ die Bandbreite unter Verkehrsintegration bestimmt und die anderen Dienste Durchlaufzeiten erreichen, die weit unter dem durch QoS vorgegeben Wert liegen. D.h. die anderen Dienste profitieren indirekt von QoS Wert für $k=1$.

Um diesen Einfluss genauer zu betrachten, wurde in demselben Beispiel der QoS Wert für $k=4$ um 50 % auf $E(\tau_k) = 50\text{ms}$ reduziert. Damit ergeben sich die in Tabelle A 3-6 dargestellten Werte. Darin zeigt sich, dass

- der QoS Wert für die Verkehrsklasse $k=4$ die Bandbreite bestimmt
- die erforderliche gesamte Bandbreite steigt
- der mark-up Faktor für die Verkehrsklasse $k=4$ steigt
- die anderen mark-up Faktoren für die Verkehrsklassen $k=1..3$ sinken.

Tabelle A 3-6: Ergebnisse bei Variation der $E(\tau_k)$ Werte

K	$E(\tau)$ QoS	$E(\tau)$ real	Mufac	$E(\tau)$ QoS	$E(\tau)$ real	mufac
1	5	5,00	4,4936	5	4,88	4,3364
2	10	5,40	1,5343	10	5,27	1,4806
3	30	8,69	1,2148	30	8,45	1,1723
4	100	55,69	1,0019	50	50	1,0535
BW kbps	3.000,53		1,1463	3.037,49		1,1604

In den bisherigen Beispielen wurde davon ausgegangen, dass die Paketräte mit abnehmenden QoS Anforderungen (steigenden $E(\tau_k)$ Werten) steigen. Dies wurde durch die Verdoppelung der Paketräten, aber auch durch die unterschiedlichen mittleren Paketlängen erreicht. Im letzten Beispiel wird untersucht, wie sich die mark-up Faktoren verhalten, wenn sich die Gewichtung der Verkehre zugunsten der oberen Verkehrsklassen verschieben. Dazu wird eine einheitliche Paketräte für alle Verkehrsklassen $k=1..K$ angenommen und so festgelegt, dass der Mittelwert der Bandbreitenanforderungen sich gegenüber dem vorhergehenden Beispielen nicht verändert. Die Ergebnisse zeigt die nachstehende Tabelle A 3-7.

Tabelle A 3-7: Ergebnisse der Berechnung mit gleichen Paketankunftsraten für alle Verkehrsklassen (braun markiert) im Vergleich zu den vorhergehenden Ergebnissen (gelb markiert)

k	E(τ) QoS	E(τ) real	λ	ρ	Mufac int	Mufac sep	E(τ) real	λ	ρ	Mufac int	Mufac sep
1	5	5,00	50	0,0133	4,4936	5,0000	4,55	2,568	0,0716	1,5358	1,7790
2	10	5,40	100	0,0400	1,5343	1,7072	5,62	2,568	0,1073	1,0629	1,2312
3	30	8,69	200	0,2730	1,2148	1,3517	12,04	2,568	0,3664	1,1065	1,2817
4	100	55,69	400	0,5460	1,0019	1,1148	100	2,568	0,3664	1,0117	1,1719
BW kbps	3.000,53			0,8724	1,1463	1,2755	BW kbps	2.871,08	0,9116	1,0970	1,2706

Aus den Ergebnissen resultiert, dass

- der QoS Wert für die Verkehrsklasse k=4 die Bandbreite bestimmt, weil die Erhöhung der Verkehre in den Klassen k=1...3 die Wartezeit für die Verkehrsklasse 4 vergrößert
- die erforderliche gesamte Bandbreite sinkt, weil die Verkehrswerte gleichmäßiger verteilt sind
- sich die mark-up Faktoren gleichmäßiger verteilen, weil die Verkehrswerte sich gleichmäßiger verteilen

Abschließend stellt sich die Frage, wie sich die Bandbreitenwerte und die mark-up Faktoren entwickeln, wenn die Verkehrsnachfrage steigt. Eine entsprechende Untersuchung ergibt, dass bei gleichmäßig x-facher Steigerung der Paketraten über alle Verkehrsklassen und bei Absenkung der mittleren Durchlaufzeiten durch Division von x, sich genau eine x-fache Vergrößerung der Bandbreiten ergeben und die Mark-Up Faktoren unverändert bleiben. Dies wurde schon bei der Untersuchung des M/M/1 Wartesystems festgestellt und damit zeigt sich, dass sich diese Aussage auf M/G/1 Systeme sowohl unter Verkehrsseparierung als auch Verkehrsintegration unter DiffServ übertragen lässt.

4 Anhang: Detaillierte Beschreibung von VoIP-Diensten

Um die in Abschnitt 3.3 des Referenzdokuments dargestellten Sachverhalte zu konkretisieren, werden VoIP-Dienste in diesem Anhang detailliert betrachtet, Paketisierte Sprachdienste lassen sich grob in zwei Kategorien aufteilen:

- Sprachdienste mit stabiler Qualität und
- Sprachdienste mit schwankender Qualität.

Erstere werden nach [Anell-08] als „VoIP over NGN“ bezeichnet, letztere als „Voice over Internet“¹⁵². Bei einer vorzunehmenden Nachfrageschätzung ist daher eine Einschätzung darüber zu gewinnen, zu welchen Anteilen sich der Voice-Verkehr auf die betrachteten Qualitätsklassen verteilt.

Die Sprachqualität von paketisierten Sprachdiensten hängt wesentlich von der Kodifizierung und der Paketlänge ab. Als Beispiel sind in der Tabelle A 4-1 mehrere Echtzeit VoIP-Dienste detailliert beschrieben, deren charakteristische Werte aus den entsprechenden Standards abgeleitet werden können, Für eine Einführung in VoIP und deren Qualitätsabschätzung (vgl. [JDSU-04], [Nölle-05]). Aus der letzten Zeile gehen die Bandbreitenanforderungen hervor.

Tabelle A 4-1: Charakteristische Werte für VoIP

Dienste-Name	VoIP ISDN Quality (IQ)	VoIP Tool Quality (TQ)	VoIP Acceptable Quality (AQ)	Reduced Quality (RQ)
Kodifizierung	PCM	ADPCM ¹⁵³	ADPCM	CS-A-CELP ¹⁵⁴
ITU-Standard	G,711	G,726	G,726	G,729
Bandbreite auf der Anwenderschicht [kbps]	64	40	16	8
Coding/Decoding Latenz je Endgerät [ms]	< 1	< 1	< 1	15
Sampling Latenz je Endgerät [ms]	20	20	20	10
Mittlere Latenz im Netz [ms]	50	60	60	50
Gesamtlatenz	100	100	100	100
Dienstqualität [MOS] ¹⁵⁵	4,5	4,2	3,6	3,9
A-PDU length [oct] ¹⁵⁶	158	100	80	10
A-PDU rate [1/s]	50	50	50	100
Overhead Schicht 5-2	78	70	70	70
Bandbreitenanforderung an physikalische Schicht [kbps]	95,2	68	60	64

¹⁵² Ein Beispiele ist der Skype-Dienst, der in [Anell-08] analysiert wird.

¹⁵³ ADPCM adaptive differenzial pulse code modulation.

¹⁵⁴ CS-A-CELP Conjugate-Structure Algebraic-Code Excited Linear-Prediction.

¹⁵⁵ MOS Mean Opinion Score.

¹⁵⁶ Für die Modellparametrisierung sind die Overheads für das RTP/RTCP, UDP, IP und Ethernet aufzuschlagen.

Quelle: vgl. [Nölle-05]

Aus den Bandbreitewerten und der "Sampling Latenz" je Endgerät ergeben sich für eine VoIP-Verbindung eine Paketlänge für die PDU auf der Anwenderschicht L_{AP} und die zugehörige Paket-Ankunftsrate α_{VoIP} mittels folgender Beziehungen:

$$L_{AP} = BW_{AP} \cdot T_{\text{samp}} / 8$$

$$\alpha_{VoIP} = 1 / T_{\text{samp}}$$

Für die Bandbreite, die eine VoIP-Verbindung von der physikalischen Schicht einfordert, ist der vollständige Protokoll-Stack zu berücksichtigen, wobei sich ein Zusatz (Overhead (OV)) von 70 Oktetts unter der Annahme eines Protokoll-Stacks nach Tabelle A 4-2 ergibt.

$$BW_{\text{phy}} = BW_{AP} \cdot (L_{AP} + OV) / L_{AP}$$

Tabelle A 4-2: Paketlänge für VoIP nach G.726/16kbps in den verschiedenen OSI-Schichten für Anwendung von VoIP im Internet

OSI Schicht Nummer i	Protokoll	Nutzlast aus Li+1	Overhead	i-Schicht PDU Length
7	Analoges Sprachsignal	-	-	-
6	CODEX	-	-	80
5	RTP	80	12	92
4	UDP	92	8	100
3	IP	100	20	120
2	Ethernet	120	38	168

Man beachte, dass der Protokoll-Overhead in allen VoIP-Standards aus Tabelle A4-1 mit 78 Oktetts gleich bleibt. Da aber die Paketlänge mit verminderter Bitrate abnimmt, wird in der Regel mit zunehmender Kompression keine wesentliche Bandbreitenreduktion mehr erreicht. Für die Kodifizierung nach G.729 ergibt sich sogar eine Erhöhung gegenüber G.726, da durch die hohe Codierungslatenz die Sampling-Latenz reduziert werden musste und damit auch die Länge der A-PDU. Daher wird VoIP nach G.729 vor allem in Netzen mit Funkübertragung (WLAN, WIMAX, WMAN) verwendet, da dort der gesamte Protokoll-Header komprimiert wird und danach nur noch 2-4 Oktetts zum Nutzerpaket beisteuert (vgl. [JDSU-04]).

Für die Paketflüsse, die im Konzentrationsnetz von den MPoP zu den IP-PoP geführt werden, kann dies mit Ausnahme des Layer 2 auch angewendet werden, da in diesem Netzteil nur L2 Switching, jedoch kein Routing durchgeführt wird. Für Sprachdienste

nach G.726 mit akzeptabler Qualität ergibt sich dann eine Bandbreitenanforderung von ca. 20 kbps.

5 Anhang: Generische Nachfragemodellierung – Nutzertypen und Anslusstechnologien

In Abschnitt 3.3 des Referenzdokuments findet sich die Darstellung zur bottom-up Bestimmung der Verkehrsnachfrage, wobei das Hauptaugenmerk der Darstellung auf dem Dienstmodell liegt, aus dem unter Rückgriff auf Anslusstypen eine Verkehrsnachfrage je Standort (MPoP) abgeleitet werden kann. An dieser Stelle soll, wie in der ersten Fassung des Referenzdokuments [WIK-10a] geschehen, auf den generischen Modellierungsansatz unter Rückgriff auf Nutzertypen und Anslusstechnologien eingegangen werden. Dazu wurde das CASUAL Modell vorgestellt (siehe Abbildung 3-2), wonach Nutzer nach entsprechenden Typen zu klassifizieren sind und jedem Nutzertyp ein Attribut für die Anslusstechnologie sowie Dienste- und Verkehrsparameter zuzuweisen ist. Dahinter steht der Gedanke, dass die Dienstenachfrage Nutzertyp-abhängig ist und für eine Modellierung auf Daten über Nutzertypen zurückgegriffen werden kann. Demgegenüber stellt die Anslusstechnologie eine (kapazitäts-)beschränkende Größe für die Dienstenachfrage (und damit Verkehrsgenerierung) verschiedener Nutzertypen dar. Insofern liegt dem CASUAL Modell eine analytische Trennung zweier Bestimmungsfaktoren zu Grunde, Nachfolgend werden Nutzermodell und Anslusstypen ausgeführt.

5.1 Nutzermodell

Das Modell zur Bestimmung der Verkehrsnachfrage sieht bis zu sechs verschiedene Nutzertypen vor, die beispielsweise mit Traditionell, Standard, Premium, Small Office Home Office (SOHO), Small Medium Enterprise (SME) und Large Enterprise (LE) klassifiziert werden können; Tabelle A 5-1 enthält eine verbale Beschreibung.

Tabelle A 5-1: Beschreibung einer 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 sehr geringer Bandbreite ermöglichen
Standard	Private Nutzer, die das NGN für klassische Dienste, aber auch für Internetdienste verwenden, die keine hohe Bandbreite erfordern (gegenwärtig bspw. durch Standard ADSL-Anschluss charakterisierbar), 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 kleinen Standorten arbeiten und ein anderes Dienst-Profil als Premium-Nutzer haben
SME Small and Medium Enterprises	Geschäftsnutzer aus kleinen- und mittleren Unternehmen
LE Large Enterprises	Geschäftsnutzer aus großen Unternehmen

Um diese Nutzertypen mengenmäßig zu gewichten, können ggf. Informationen zu Anschlusskategorien und deren Häufigkeit sowie ggf. Strukturdaten (Anzahl von Haushalten/Haushaltsgrößen sowie Größen- und Gewerbeinformationen von Unternehmen) als Indikatoren herangezogen werden.¹⁵⁷

Unter Rückgriff auf das Dienstmodell kann den Nutzertypen eine Dienstenachfrage zugeordnet werden. Auf diese Weise lässt sich abstrakt die Nachfrage nach Breitbanddiensten beschreiben, unter Vernachlässigung der Verfügbarkeit entsprechender Anslusstechologien.

5.2 Technologien der zugehörigen Anschlussnetze

Technologien und zugehörige Architekturen, mit denen Nutzer an das Breitbandnetz angeschlossen werden, zeichnen sich durch eine hohe Dynamik aus. Sie begrenzen das Übertragungsvolumen und damit auch die realisierbaren Dienste und lassen sich wie folgt kategorisieren und zwar in Architekturen auf der Basis von

- TK- Anschlussnetzen
 - o Reine Kupfer-Anschlussleitungen:
 - FTTE_x (ADSL, ADSL2+, G.SHDSL)¹⁵⁸
 - o Gemischte Kupfer-Glasfaser-Infrastruktur mit zum Teil konzentrierenden Einheiten (FTTC, FTTB)
 - o Reine Glasfaser-Anschlussnetze, ebenfalls z.T. bereits konzentrierend (FTTH)
- Alternativen Anschlussnetzen
 - o Kabel-Netze (DOCSIS)
 - o Funk-Fest (WIMAX, WiFi)
 - o Funk-Mobil (GSM, UMTS)
 - o Satellit

Das aktuelle Breitbandanschlussnetz wird durch Technologien unter der Bezeichnung xDSL bestimmt. Auch gibt es regional begrenzt einen Glasfaserausbau des Anschlussnetzes. Kurz- bis mittelfristig wird die bisherige Kupferanschlussleitung durch eine Mischung aus Glasfaser- und Kupferleitung ersetzt, was durch FTT_x abgekürzt

¹⁵⁷ Die Nachfrageschätzung für das „Kostenmodell für den Briefdienst“ [WIK-01] basierte auf solchen Strukturdaten.

¹⁵⁸ Im sogenannten „starrten Netz“, durch das die Teilnehmer ohne Zwischenanbindung an einen Kabelverzweiger angeschlossen sind, kann auch eine VDSL-Einspeisungen erfolgen.

wird. Tabelle A 5-2 enthält die wichtigsten Kenngrößen für die derzeit eingesetzten xDSL Technologien.

Tabelle A 5-2: Attribute der von Anschlusstechnologien auf der Basis von Glasfaser und Kupfer

Bezeichnung	Asymmetrisch mit down BW [Mbps]	Symmetrisch mit BW je Richtung [Mbps]	Cu Länge zum Nutzer km	FTTx	xDSL asymmetrisch	xDSL symmetrisch
Basis	0,192	---	5	E	ReADSL	---
Standard	15	6	1,5	E	ADSL2+	G,SHDSL
Verbesserter Standard	30	15	0,8	E/C	VDSL 17a	VDSL 17a
Advanced	100	30	0,5	E/C	VDSL Vect 17a	VDSL
Emergent	200	100	0,05	B	PON/VDSL Vect. 35b	PON/VDSL
Emergent	100 / 1 GbE	100 / 1 Gbps	40	H	P2P *)	P2P *)

*) Bei FTTH P2P kommt keine DSL-Technologie zum Einsatz.

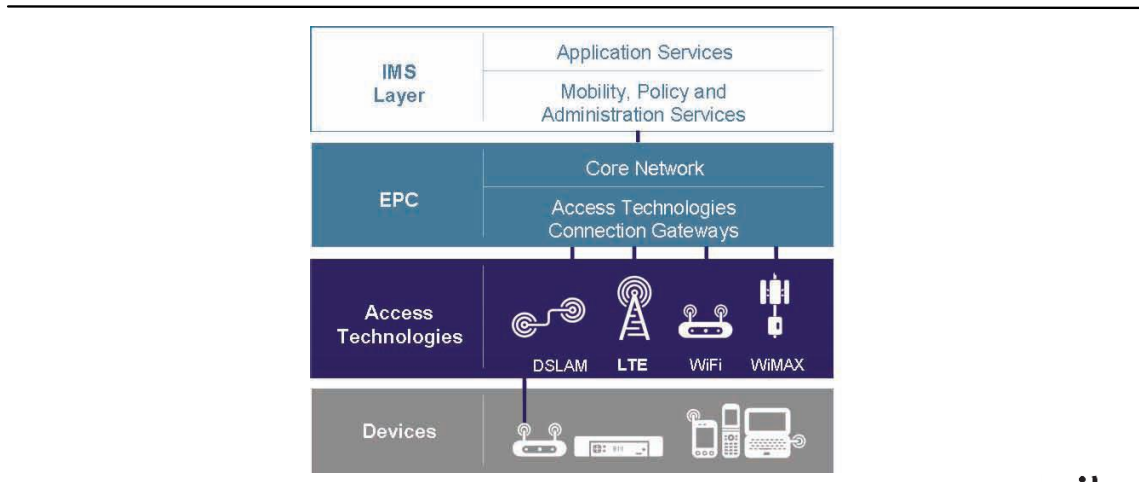
Quelle: vgl. [Palm-04], Fortgeschrieben von WIK

Wie vorn bereits ausgeführt, ist das NGA nicht Gegenstand der Kostenmodellierung. Allerdings ist im Rahmen einer unabhängigen Nachfragebestimmung die Bedeutung der verschiedenen Anschlusstechnologien – wie aus den in der Tabelle A 5-2 dargestellten Anschlussgeschwindigkeiten hervorgeht – sehr wohl von Bedeutung. So können mit einem Basis- oder Standard-Anschluss – wie in Tabelle A 5-2 dargestellt – kaum Video oder TV-Dienste in Anspruch genommen werden. Diese Restriktionen sind bei der später vorzunehmenden Zuweisung der Dienste zu den Nutzertypen entsprechend zu berücksichtigen.

Die langfristige Entwicklung geht dahin, die verschiedenen Anschlusstechnologien in ein einheitliches intelligentes NGN z.B. unter der 3GGP-IMS oder ETSI TISPAN-IMS zu integrieren, vgl. [Begain-07]. Damit können alle bisherigen Kernnetze in eine einzige Transportplattform (Transport-Ebene) integriert werden, deren Kontrollschicht durch die auf dem SIP basierenden „Call State Control Functions“ (P,I,S-CSCF) in zentralen Einrichtungen separiert von der Transportebene abgebildet wird. D.h. es werden die derzeit separierten Kernnetze für Sprach- und Datendienste sowie die Mobilfunknetze in ein einziges Kernnetz integriert und ein Nutzer findet eine allumfassende Kommunikations-Infrastruktur vor, und zwar unabhängig von seinem Standort oder seiner Bewegung. Er kann dann Kommunikations-, Multimedia- und elektronische Media-Dienste unterbrechungsfrei von überall in Anspruch nehmen. In der Literatur wird dies als „ubiquitous“ unter „Fixed Mobile Integration“ (FMI) bezeichnet und mittel- bis langfristig durch Architekturen aus dem sog. Long-Term-Evolution-Szenario (LTE) abgebildet. Abbildung A 5-1 stellt dies schematisch dar. – Da es sich hierbei um

zukünftige Architekturen handelt, ist die hier beschriebene Integration nicht Gegenstand des hier beschriebenen Modells.

Abbildung A 5-1: Schichten eines NGN unter Fixed Mobile Integration (FMI)



Quelle: [Motorola-07]

5.3 Zuweisung von Anslusstechologien und Diensten zu Nutzern

Die Beziehung zwischen den Nutzertypen und den Anslusstechologien ist durch den Modellanwender festzulegen. Dabei ist zu beachten, dass ein Netzbetreiber aus Gründen der Vereinheitlichung in der Regel einem Nutzer eine Anslusstechologie zuweist, deren Kapazitäten der Nutzer nicht voll ausschöpft (ausschöpfen kann oder will). D.h., es werden nicht individuelle, auf den einzelnen Kunden abgestimmte Anslussbandbreiten vermarktet, sondern es erfolgt im (Massen-)Markt eine Vermarktung zu „standardisierten“ Anslusskapazitäten (ausgedrückt in Bandbreite), Tabelle A 5-3 zeigt eine Zuweisung von Nutzern (6 Nutzertypen) zu 5 Anslusskategorien unter Rückgriff auf Bandbreiten (im Modell stehen 6 Anslusskategorien zur Verfügung). Dabei sind die Werte für den traditionellen Nutzer mit einer Basis-Anslusstechologie so zu interpretieren, dass dieser Nutzer lediglich die schmalbandigen Dienste nachfragt und ein entsprechend geringes Datenvolumen generiert. Letztlich kann auf Basis dieser Kategorisierung im Modell ein heterogenes Nutzerverhalten abgebildet werden.¹⁵⁹

¹⁵⁹ In dem Beispiel in Tabelle A 5-3 werden jedem Nutzertyp zwei Anslusstechologien zugewiesen. Es ist letztlich eine Frage der Modellparametrisierung, ob je Nutzertyp lediglich die Zuweisung einer einzigen Anslusstechologie erfolgen soll.

Tabelle A 5-3: Spektrum einer möglichen Zuweisung von Anslusstechologien und damit Anschlussbandbreiten zu Nutzertypen

Nutzertypen	Traditionell	Standard	Premium	SOHO	SME	LE
Anschluss-technologie	[User1]	[User2]	[User3]	[User4]	[User5]	[User6]
Basis [Tech1]	0,192					
Standard [Tech2]	15	15		15		
Verbesserter Standard [Tech3]		30	30	15	15	
Advanced [Tech4]			100		30	30
Emergent [Tech5]						100/1000

Quelle: WIK (für die BW-Zuweisung vgl. Tabelle A 5-2)

Die hier aufgezeigte Matrix über Nutzertypen und Anslusstechologien definiert den Spielraum für die Nachfrageparametrisierung der Anschlussprodukte (die für sämtliche MPoP einheitlich definiert wird). Diese 6x6 Matrix erlaubt es, dass dem Modellanwender die Parametrisierung von 36 Anschlussprodukten bzgl. der Busy Hour Nachfrage offensteht.

Die Zuweisung der Nutzer zu Diensten wird im Modell ebenfalls durch eine entsprechende Matrix vorgenommen. Dies erfolgt auf der Basis der jeweiligen Dienste, die im NGN abgewickelt werden können, und die für das Modell in Form von Dienstekategorien und Verkehrsklassen abgebildet werden. Im Zusammenhang mit dem Tripple aus Nutzertyp, Anslusstechologie und Diensten sind insbesondere die Bandbreitennachfragen aus den Diensten von Bedeutung. Eine Illustration einer solchen Zuordnung ist beispielhaft in Tabelle A 5-4 dargestellt.

Es ist zu beachten, dass diese Tabelle nur qualitative Angaben über die nachgefragten Dienste zeigt, aber keine Aussagen über deren quantitative Nutzung enthält. Letztlich können gleiche Nutzertypen mit verschiedener Anslusstechologie das gleiche Dienstespektrum in Anspruch nehmen, sich aber in deren quantitativer Nutzung unterscheiden, was in Tabelle A 5-4 nicht dargestellt ist.

Tabelle A 5-4: Beispielhafte qualitative Zuordnung von IP-Diensten zu Nutzertypen unter Berücksichtigung der zugeordneten Anschlusstechnologien

Nutzer	AL-Tech.	Dialog	Transact.	Retrival	Distr.	Other
Trad.	Basis	VoIP (AQ)	http, SMTP	FTP		
Trad.	Standard	VoIP (AQ)	http, https, SMTP	FTP		
Standard	Standard	VoIP (AQ)	http, https, SMTP	FTP, P2P		
Standard	Verb, Standard	VoIP (AQ)	http, https, SMTP, gambling	FTP, P2P		
Premium	Verb, Standard	VoIP (TQ) Video-Tel.	http, https, SMTP, high speed gambling	FTP, P2P, VoD	S-TV	
Premium	Advanced	VoIP (TQ) Video-Tel.	http, https, SMTP, high speed gambling	FTP, P2P, VoD	S-TV, HDTV	
SOHO	Standard	VoIP (TQ)	http, https, SMTP	FTP		
SOHO	Verb, Standard	VoIP (IQ) Video-Tel., Video-Konf.	http, https, SMTP	FTP		
SME	Verb, Standard	VoIP (IQ) Video-Tel., Video-Konf.	http, https, SMTP	FTP		VLAN
SME	Advanced	VoIP (IQ) Video-Tel., Video-Konf.	http, https, SMTP	FTP		VLAN
LE	Advanced	VoIP (IQ) Video-Tel., Video-Konf.	http, https, SMTP	FTP		VLAN
LE	Emergent	VoIP (IQ) Video-Tel., Video-Konf.	http, https, SMTP	FTP		VLAN, VPN

6 Anhang: Ableitung der Standort- und Nachfragerinformationen aus Daten des PSTN/ISDN

Sofern verfügbar, bietet sich die Standortmenge der bestehenden Hauptverteiler (HVt) an, die im klassischen PSTN/ISDN einen Teilnehmeranschlussbereich TIn-AB mit zugehörigen Werten bilden. Diese ermöglichen Angaben über:

- die geographischen Koordinaten der HVt -Standorte
- Angaben über die Anzahl der Nutzer getrennt nach klassischen PSTN und ISDN Nutzertypen (Analog, Basis ISDN, PrimärMultiplex)
- geographische Angaben über die Fläche des TIn-AB
- ggf. zusätzliche Angaben über die schon installierte oder aber kurzfristig zu installierende Breitbandanschlusstechnik des NGA
- Angaben über die Anzahl der Nutzer notwendig, die potenziell an eine der angegebenen Anschlusstechniken angeschlossen werden können. Dies hängt von der Größe des jeweiligen MPoP-Bereiches ab, aus dem die Anzahl der tatsächlich angeschlossenen Nutzer abzuleiten ist

Vom Modellanwender sind dabei Annahmen zu treffen, die ggf. unter Rückgriff auf weitere Datenquellen über Breitbandverfügbarkeit und Inanspruchnahme abzustützen sind. Tabelle A 6-1 zeigt ein Schema, das im Kostenmodell für das Breitbandnetz angewendet werden kann. In der Regel werden diese Daten nicht oder nur teilweise zur Verfügung stehen und sind daher durch entsprechende Berechnungsverfahren abzuschätzen; z.B. kann die mögliche Anschlusstechnologie durch Nutzerdichten abgeschätzt werden und die Anzahl der tatsächlichen Nutzer aus Werten über den Marktumfang (ausgedrückt durch die Penetration) und dem Marktanteil des Betreibers. Vor allem ist die Verkehrsnachfrage zu berechnen.

Tabelle A 6-1: Grundlegende Daten über Nutzerszenarien pro Standort (Nutzer nach Anschlusstechnologien)

Bezeichnung Szenarien	Total	Basis	Standard	Verbesserter Standard	Advanced	Emergent
Potenzielle Nutzer	Absoluter Wert	Relativer Wert	Relativer Wert	Relativer Wert	Relativer Wert	Relativer Wert
Tatsächliche Nutzer	Absoluter Wert	Relativer Wert	Relativer Wert	Relativer Wert	Relativer Wert	Relativer Wert
Verkehrsnachfrage	Absoluter Wert	Absoluter Wert	Absoluter Wert	Absoluter Wert	Absoluter Wert	Absoluter Wert

Die Anzahl der tatsächlichen Nutzer ist dann weiter aufzuteilen, um ggf. alle Nutzertypen (nach der in Anhang 5 vorgestellten Klassifizierung) zu erfassen.

7 Anhang: Inputparameter Netzplanungsmodul

7.1 VORBEMERKUNG

Dieser Anhang zeigt die Parameter, die zur Planung und Dimensionierung des modellierten Breitbandnetzes (inkl. der Systemzuweisung) sowie im Kostenmodul (Anhang 8) eingesetzt werden. Zum Teil sind zu illustrativen Zwecken Werte ausgewiesen. Die angegebenen Werte sind akzeptierte State-of-the-Art Standardwerte bzw. Beispielwerte, die bei einer Anwendung des Modells den Gegebenheiten entsprechend anzupassen sind. Zum Teil wird auch auf die Angabe von Werten gänzlich verzichtet. Dies gilt insbesondere für die Parameter, die nach Maßgabe des zu regulierenden Unternehmens festzulegen sind, und somit als betreiberspezifisch klassifiziert werden können. Der Verzicht auf die Angabe von Beispielwerten ist dabei i.d.R. unproblematisch, da durch die Definition des Gültigkeitsraums der Parameterwerte davon ausgegangen werden kann, dass ein hinreichendes Verständnis vorliegt.

Die Liste ist nicht abschließend. Auch gilt grundsätzlich, dass die genannten Werte unserem gegenwärtigen Wissensstand entsprechen und im Rahmen der jeweiligen Kostenstudien finale Inputparameter von den zuständigen Beschlusskammern festzulegen sind. Hierzu werden auch Informationen von den Netzbetreibern eingeholt.

7.2 SERVICE INPUT

In diesem Abschnitt werden die Dienste hinsichtlich ihrer netzdimensionierungsrelevanten Eigenschaften spezifiziert. Die tabellarische Darstellung handelt die Dienstekategorien enumerativ ab.

Für jeden Dienst/Dienstekategorie werden zunächst die abstrakten Eigenschaften und dann die Routing Parameter (Routing Characteristics) dargestellt.

Parameter	Type	Description	Base value
K_total	Int	Number of Services (max. 12)	
Serv_Index	Int	Service Index Voice	1
Serv_name	String	Service ID/name	Voice_Service
Bdk	Double	Mean value of the downstream bandwidth for service k [kbps]	95,2
Buk	Double	Mean value of the upstream bandwidth for service k [kbps]	95,2
Ldk	Int	Mean packet length for downstream packets for service k [bytes]	238

Parameter	Type	Description	Base value
Luk	Int	Mean packet length for upstream packets for service k [bytes]	238
Tk	Double	Mean duration of the service k [MIN]	
E2Eedk	Double	Mean EndToEnd delay in [ms]	50
Serv_Classk	Int	Traffic Class (1 to max number of service classes K)	
		Routing characteristics	
Euintrac01k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 0-1 for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
Euintrac12k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 1-2 for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
EutoIPPOPk	Double	Traffic distribution to e-u to IP POP for service k $[\geq 0, \leq 1]$	
ON_line_servk	Double	Traffic distribution to ON-line Server for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
Video_servk	Double	Traffic distribution to Video Server for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
Conf_servk	Double	Traffic distribution to Conf, Server for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
IPICK	Double	Traffic distribution to IP-IC for service k $[\geq 0, \leq 1]$	
VoicelCk_in	Double	Ingoing Traffic distribution to Voice IC for service k $[\geq 0, \leq 1]$	
VoicelCk_out	Double	Outgoing Traffic distribution to Voice IC for service k $[\geq 0, \leq 1]$	
rtrtk	Double	Ratio of transit traffic respect the total IC traffic: $[\geq 0, \leq 1]$	
Serv_Index	Int	Service Index layer 1 capacity	2
Serv_name	String	Service ID/name	Layer_1_capacity
Bdk	Double	Mean value of the downstream bandwidth for service k [kbps]	1000
Buk	Double	Mean value of the upstream bandwidth for service k [kbps]	1000
Ldk	Int	Mean packet length for downstream packets for service k [bytes]	Not applied
Luk	Int	Mean packet length for upstream packets for service k [bytes]	Not applied
Tk	Double	Mean duration of the service k [MIN]	Not applied
E2Eedk	Double	Mean EndToEnd delay in [ms]	Not applied
Serv_Classk	Int	Traffic Class (1 to max number of services K)	Not applied
Euintrac01k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 0-1 for service k $[\geq 0, \leq 1]$	
Euintrac12k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 1-2 for service k $[\geq 0, \leq 1]$	
EutoIPPOPk	Double	Traffic distribution to e-u to IP POP for service k $[\geq 0, \leq 1]$	

Parameter	Type	Description	Base value
ON_line_servk	Double	Traffic distribution to ON-line Server for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
Video_servk	Double	Traffic distribution to Video Server for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
Conf_servk	Double	Traffic distribution to Conf, Server for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
IPICK	Double	Traffic distribution to IP-IC for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
VoicICk_in	Double	Ingoing Traffic distribution to Voice IC for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
VoicICk_out	Double	Outgoing Traffic distribution to Voice IC for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
rttrk	Double	Ratio of transit traffic respect the total IC traffic: [$\geq 0, \leq 1$]	0
Serv_Index	Int	Service Index (e.g. Premium Business)	
Serv_name	String	Service ID/name	Premium_Business
Bdk	Double	Mean value of the downstream bandwidth for service k [kbps]	512,5
Buk	Double	Mean value of the upstream bandwidth for service k [kbps]	512,5
Ldk	Int	Mean packet length for downstream packets for service k [bytes]	328
Luk	Int	Mean packet length for upstream packets for service k [bytes]	328
Tk	Double	Mean duration of the service k [MIN]	Not applied
E2Eedk	Double	Mean EndToEnd delay in [ms]	20
Serv_Classk	Int	Traffic Class (1 to max number of services K)	
Euintrac01k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 0-1 for service k [$\geq 0, \leq 1$]	
Euintrac12k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 1-2 for service k [$\geq 0, \leq 1$]	
EutoIPPOPk	Double	Traffic distribution to e-u to IP POP for service k [$\geq 0, \leq 1$]	1
ON_line_servk	Double	Traffic distribution to ON-line Server for service k [$\geq 0, \leq 1$]	
Video_servk	Double	Traffic distribution to Video Server for service k [$\geq 0, \leq 1$]	
Conf_servk	Double	Traffic distribution to Conf, Server for service k [$\geq 0, \leq 1$]	
IPICK	Double	Traffic distribution to IP-IC for service k [$\geq 0, \leq 1$]	
VoicICk_in	Double	Ingoing Traffic distribution to Voice IC for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
VoicICk_out	Double	Outgoing Traffic distribution to Voice IC for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
rttrk	Double	Ratio of transit traffic respect the total IC traffic: [$\geq 0, \leq 1$]	

Parameter	Type	Description	Base value
Serv_Index	Int	Service Index	
Serv_name	String	Service ID/name	Conference_Services
Bdk	Double	Mean value of the downstream bandwidth for service k [kbps]	1260,6
Buk	Double	Mean value of the upstream bandwidth for service k [kbps]	420,2
Ldk	Int	Mean packet length for downstream packets for service k [bytes]	440
Luk	Int	Mean packet length for upstream packets for service k [bytes]	440
Tk	Double	Mean duration of the service k [MIN]	Not applied
E2Eedk	Double	Mean EndToEnd delay in [ms]	20
Serv_Classk	Int	Traffic Class (1 to max number of services K)	
Euintrac01k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 0-1 for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
Euintrac12k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 1-2 for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
EutoIPPOPk	Double	Traffic distribution to e-u to IP POP for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
ON_line_servk	Double	Traffic distribution to ON-line Server for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
Video_servk	Double	Traffic distribution to Video Server for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
Conf_servk	Double	Traffic distribution to Conf, Server for service k [$\geq 0, \leq 1$]	
IPICKk	Double	Traffic distribution to IP-IC for service k [$\geq 0, \leq 1$]	
VoicelCk_in	Double	Ingoing Traffic distribution to Voice IC for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
VoicelCk_out	Double	Outgoing Traffic distribution to Voice IC for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
rttrk	Double	Ratio of transit traffic respect the total IC traffic: [$\geq 0, \leq 1$]	
Serv_Index	Int	Service Index	
Serv_name	String	Service ID/name	VoD
Bdk	Double	Mean value of the downstream bandwidth for service k [kbps]	3586,73
Buk	Double	Mean value of the upstream bandwidth for service k [kbps]	42,67
Ldk	Int	Mean packet length for downstream packets for service k [bytes]	835
Luk	Int	Mean packet length for upstream packets for service k [bytes]	151
Tk	Double	Mean duration of the service k [MIN]	Not applied
E2Eedk	Double	Mean EndToEnd delay in [ms]	100
Serv_Classk	Int	Traffic Class (1 to max number of services K)	

Parameter	Type	Description	Base value
Euintrac01k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 0-1 for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
Euintrac12k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 1-2 for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
EutoIPPOPk	Double	Traffic distribution to e-u to IP POP for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
ON_line_servk	Double	Traffic distribution to ON-line Server for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
Video_servk	Double	Traffic distribution to Video Server for service k $[\geq 0, \leq 1]$	
Conf_servk	Double	Traffic distribution to Conf, Server for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
IPICk	Double	Traffic distribution to IP-IC for service k $[\geq 0, \leq 1]$	
VoicICk_in	Double	Ingoing Traffic distribution to Voice IC for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
VoicICk_out	Double	Outgoing Traffic distribution to Voice IC for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
rttrk	Double	Ratio of transit traffic respect the total IC traffic: $[\geq 0, \leq 1]$	
Serv_Index	Int	Service Index	
Serv_name	String	Service ID/name	Business_Data
Bdk	Double	Mean value of the downstream bandwidth for service k [kbps]	442,4
Buk	Double	Mean value of the upstream bandwidth for service k [kbps]	320
Ldk	Int	Mean packet length for downstream packets for service k [bytes]	512
Luk	Int	Mean packet length for upstream packets for service k [bytes]	192
Tk	Double	Mean duration of the service k [MIN]	Not applied
E2Eedk	Double	Mean EndToEnd delay in [ms]	150
Serv_Classk	Int	Traffic Class (1 to max number of services K)	
Euintrac01k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 0-1 for service k $[\geq 0, \leq 1]$	
Euintrac12k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 1-2 for service k $[\geq 0, \leq 1]$	
EutoIPPOPk	Double	Traffic distribution to e-u to IP POP for service k $[\geq 0, \leq 1]$	
ON_line_servk	Double	Traffic distribution to ON-line Server for service k $[\geq 0, \leq 1]$	
Video_servk	Double	Traffic distribution to Video Server for service k $[\geq 0, \leq 1]$	
Conf_servk	Double	Traffic distribution to Conf, Server for service k $[\geq 0, \leq 1]$	

Parameter	Type	Description	Base value
IPICK	Double	Traffic distribution to IP-IC for service k $[\geq 0, \leq 1]$	
VoicelCk_in	Double	Ingoing Traffic distribution to Voice IC for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
VoicelCk_out	Double	Outgoing Traffic distribution to Voice IC for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
rttrk	Double	Ratio of transit traffic respect the total IC traffic: $[\geq 0, \leq 1]$	
Serv_Index	Int	Service Index	
Serv_name	String	Service ID/name	Best_Effort
Bdk	Double	Mean value of the downstream bandwidth for service k [kbps]	102
Buk	Double	Mean value of the upstream bandwidth for service k [kbps]	8
Ldk	Int	Mean packet length for downstream packets for service k [bytes]	1360,0
Luk	Int	Mean packet length for upstream packets for service k [bytes]	93
Tk	Double	Mean duration of the service k [MIN]	Not applied
E2Eedk	Double	Mean EndToEnd delay in [ms]	200
Serv_Classk	Int	Traffic Class (1 to max number of services K)	
Euintrac01k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 0-1 for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
Euintrac12k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 1-2 for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
EutoIPPOPk	Double	Traffic distribution to e-u to IP POP for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
ON_line_servk	Double	Traffic distribution to ON-line Server for service k $[\geq 0, \leq 1]$	
Video_servk	Double	Traffic distribution to Video Server for service k $[\geq 0, \leq 1]$	
Conf_servk	Double	Traffic distribution to Conf, Server for service k $[\geq 0, \leq 1]$	
IPICK	Double	Traffic distribution to IP-IC for service k $[\geq 0, \leq 1]$	
VoicelCk_in	Double	Ingoing Traffic distribution to Voice IC for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
VoicelCk_out	Double	Outgoing Traffic distribution to Voice IC for service k $[\geq 0, \leq 1]$	0
rttrk	Double	Ratio of transit traffic respect the total IC traffic: $[\geq 0, \leq 1]$	
Serv_Index	Int	Service Index	
Serv_name	String	Service ID/name	PeerToPeer
Bdk	Double	Mean value of the downstream bandwidth for service k [kbps]	575
Buk	Double	Mean value of the upstream bandwidth for service k [kbps]	190

Parameter	Type	Description	Base value
Ldk	Int	Mean packet length for downstream packets for service k [bytes]	940
Luk	Int	Mean packet length for upstream packets for service k [bytes]	515
Tk	Double	Mean duration of the service k [MIN]	Not applied
E2Eedk	Double	Mean EndToEnd delay in [ms]	200
Serv_Classk	Int	Traffic Class (1 to max number of services K)	
Euintrac01k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 0-1 for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
Euintrac12k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 1-2 for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
EutoIPPOPk	Double	Traffic distribution to e-u to IP POP for service k [$\geq 0, \leq 1$]	
ON_line_servk	Double	Traffic distribution to ON-line Server for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
Video_servk	Double	Traffic distribution to Video Server for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
Conf_servk	Double	Traffic distribution to Conf, Server for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
IPICKk	Double	Traffic distribution to IP-IC for service k [$\geq 0, \leq 1$]	
VoicICk_in	Double	Ingoing Traffic distribution to Voice IC for service k [$\geq 0, \leq 1$]	
VoicICk_out	Double	Outgoing Traffic distribution to Voice IC for service k [$\geq 0, \leq 1$]	
rttrk	Double	Ratio of transit traffic respect the total IC traffic: [$\geq 0, \leq 1$]	
Serv_Index	Int	Service Index	
Serv_name	String	Service ID/name	Layer_2_capacity
Bdk	Double	Mean value of the downstream bandwidth for service k [kbps]	1000
Buk	Double	Mean value of the upstream bandwidth for service k [kbps]	1000
Ldk	Int	Mean packet length for downstream packets for service k [bytes]	328
Luk	Int	Mean packet length for upstream packets for service k [bytes]	328
Tk	Double	Mean duration of the service k [MIN]	Not applied
E2Eedk	Double	Mean EndToEnd delay in [ms]	20
Serv_Classk	Int	Traffic Class (1 to max number of services K)	
Euintrac01k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 0-1 for service k [$\geq 0, \leq 1$]	
Euintrac12k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 1-2 for service k [$\geq 0, \leq 1$]	

Parameter	Type	Description	Base value
EutoIPPOPk	Double	Traffic distribution to e-u to IP POP for service k [$\geq 0, \leq 1$]	
ON_line_servk	Double	Traffic distribution to ON-line Server for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
Video_servk	Double	Traffic distribution to Video Server for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
Conf_servk	Double	Traffic distribution to Conf, Server for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
IPICK	Double	Traffic distribution to IP-IC for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
VoicelCk_in	Double	Ingoing Traffic distribution to Voice IC for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
VoicelCk_out	Double	Outgoing Traffic distribution to Voice IC for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
rttrk	Double	Ratio of transit traffic respect the total IC traffic: [$\geq 0, \leq 1$]	
Serv_Index			
Serv_name	Int	Service ID/name	IPTV
Bdk	String	Mean value of the downstream bandwidth for service k [kbps]	1341500
Buk	Double	Mean value of the upstream bandwidth for service k [kbps]	0.10
Ldk	Double	Mean packet length for downstream packets for service k [bytes]	1370
Luk	Int	Mean packet length for upstream packets for service k [bytes]	50
Tk	Int	Mean duration of the service k [min.]	Not applied
E2Eedk	Int	Mean EndToEnd delay in [ms]	100
Serv_Classk	Double	Traffic Class (1 to max number of services K)	
	Int		
Euintrac01k			0
Euintrac12k	Double		0
EutoIPPOPk	Double		0
ON_line_servk	Double		0
Video_servk	Double		0
Conf_servk	Double		0
IPICK	Double		0
VoicelCk_in	Double		0
VoicelCk_out	Double		0
IPTV_servk	Double		
rttrk	Double		
Serv_Index	Int	Service Index Voice	
Serv_name	String	Service ID/name	VoIP
Bdk	Double	Mean value of the downstream bandwidth for	95,2

Parameter	Type	Description	Base value
		service k [kbps]	
Buk	Double	Mean value of the upstream bandwidth for service k [kbps]	95,2
Ldk	Int	Mean packet length for downstream packets for service k [bytes]	238
Luk	Int	Mean packet length for upstream packets for service k [bytes]	238
Tk	Double	Mean duration of the service k [min.]	
E2Eedk	Double	Mean EndToEnd delay in [ms]	50
Serv_Classk	Int	Traffic Class (1 to max number of service classes K)	
		Routing characteristics	
Euintrac01k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 0-1 for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
Euintrac12k	Double	Traffic distribution to e-u intracluster 1-2 for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
EutoIPPOPk	Double	Traffic distribution to e-u to IP POP for service k [$\geq 0, \leq 1$]	
ON_line_servk	Double	Traffic distribution to ON-line Server for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
Video_servk	Double	Traffic distribution to Video Server for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
Conf_servk	Double	Traffic distribution to Conf, Server for service k [$\geq 0, \leq 1$]	0
IPICK	Double	Traffic distribution to IP-IC for service k [$\geq 0, \leq 1$]	
VoicICk_in	Double	Ingoing Traffic distribution to Voice IC for service k [$\geq 0, \leq 1$]	
VoicICk_out	Double	Outgoing Traffic distribution to Voice IC for service k [$\geq 0, \leq 1$]	
rttrk	Double	Ratio of transit traffic respect the total IC traffic: [$\geq 0, \leq 1$]	

Service Type		Technology:	Technology 1				
Service Type		Technology:	Technology 2				
Index	Name	Type User 1	Type User 2	Type User 3	Type User 4	Type User 5	Type User 6
	Voice_services						
	Layer_1_leased_lines						
	Premium_business						
	Conference_services						
	VoD						
	Business_data						
	Best_effort						
	PeerToPeer						
	Layer_2_leased_lines						
	IPTV						
	VoIP						
Service Type		Technology:	Technology 3				
Index	Name	Type User 1	Type User 2	Type User 3	Type User 4	Type User 5	Type User 6
	Voice_services						
	Layer_1_leased_lines						
	Premium_business						
	Conference_services						
	VoD						
	Business_data						
	Best_effort						
	PeerToPeer						
	Layer_2_leased_lines						
	IPTV						
	VoIP						
Service Type		Technology:	Technology 4				
Index	Name	Type User 1	Type User 2	Type User 3	Type User 4	Type User 5	Type User 6
	Voice_services						
	Layer_1_leased_lines						
	Premium_business						
	Conference_services						
	VoD						

Service Type		Technology:	Technology 1				
	Business_data						
	Best_effort						
	PeerToPeer						
	Layer_2_leased_lines						
	IPTV						
	VoIP						
Service Type		Technology:	Technology 5				
Index	Name	Type User 1	Type User 2	User 3	Type User 4	Type User 5	Type User 6
	Voice_services						
	Layer_1_leased_lines						
	Premium_business						
	Conference_services						
	VoD						
	Business_data						
	Best_effort						
	PeerToPeer						
	Layer_2_leased_lines						
	IPTV						
	VoIP						
Service Type		Technology:	Technology 6				
Index	Name	Type User 1	Type User 2	User 3	Type User 4	Type User 5	Type User 6
	Voice_services						
	Layer_1_leased_lines						
	Premium_business						
	Conference_services						
	VoD						
	Business_data						
	Best_effort						
	PeerToPeer						
	Layer_2_leased_lines						
	IPTV						
	VoP						

IPTV inband Stufenfunktion: Transfer Function File (for multicast traffic):

Parameter	Type	Description	Base Value
nsteps	Int	Number of steps of the function	11
One line for each step:			
x	float	user traffic (Erlang)	
y	float	network traffic (Erlang)	
x	float	user traffic (Erlang)	
y	float	network traffic (Erlang)	
x	float	user traffic (Erlang)	
y	float	network traffic (Erlang)	
x	float	user traffic (Erlang)	
y	float	network traffic (Erlang)	
x	float	user traffic (Erlang)	
y	float	network traffic (Erlang)	
x	float	user traffic (Erlang)	
y	float	network traffic (Erlang)	
x	float	user traffic (Erlang)	
y	float	network traffic (Erlang)	
x	float	user traffic (Erlang)	
y	float	network traffic (Erlang)	
x	float	user traffic (Erlang)	
y	float	network traffic (Erlang)	
x	float	user traffic (Erlang)	
y	float	network traffic (Erlang)	
x	float	user traffic (Erlang)	
y	float	network traffic (Erlang)	

7.4 NETWORK DESIGN

7.4.1 Scenario Parameters

Steuerung der Anzahl der Netzebenen in Konzentrations- und Kernnetz

Parameter	Type	Description	Base Value
N_conc_levels	int	Number of Concentration Network Levels (2 or 3)	
N_core_levels	int	Number of Core Network Levels (2 or 3)	
RingMesh	int	Topology at the top core level (0=Ring; 1=Mesh)	

7.4.2 Locations, Voice-IC, Design and Protection

Anzahl von Servern und IC Standorten

Parameter	Type	Real Range	Description	Base Value
nonlserv	int		Number of On-line Server locations	
nvserv	int		Number of Video Server locations	
nconfserv	int		Number of Conference Server locations	
nipic	int		Number of IP interconnection point locations	
nvoicTDM	int		Number of voice interconnection point locations TDM based IC	
nvoicIP	int		Number of voice interconnection point locations IP based IC	
nIPTV			Number of IPTV server locations	

Netzdesign und Redundanzparameter für die einzelnen Netzebenen

Parameter	Type	Real Range	Description	Base Value
Ebene 1				
nloc(1)	int		Number of locations at level I (\leq MPoP-number, which is defined in MPoP list)	
dmin(1)	float		Minimum distance between level i locations [km]	
maxnod(1)	int		Maximum number of level (i-1) locations assigned to a level i location [\leq number of level i locations]	
gmuf(1)	float		global mark up factor	1,25
dasig(1)	int		Double assignation: [0: level (i-1) locations assigned to one level i location / 1: level (i-1) locations assigned to two level i location]	
prot(1)	int		Protection (in case of double assignation): [0: 50% protection / 1: 100% protection]	
bwtc(1)	float		Bandwidth threshold for direct links between location of level (i-1) ($bwtc(nconlev-1)$: 10000000 (∞)) [kbps]	
ringprot(1)	int		Ring protection: [0: 50% protection / 1: 100% protection]	
trenchopt(1)	int		Trench optimization (intra-cluster): [0: not applied / 1: applied]	

Parameter	Type	Real Range	Description	Base Value
th1(1)	float		Threshold for relative new trench distance	0,5
th2(1)	float		Threshold for relative distance increment	2
Ebene 2				
nloc(2)	int		Number of locations at level i	
dmin(2)	float		Minimum distance between level i locations [km]	
maxnod(2)	int		Maximum number of level (i-1) locations assigned to a level i location [\leq number of level i-1 locations]	
gmuf(2)	float		global mark up factor	1,25
dasig(2)	int		Double assignment: [0: level (i-1) locations assigned to one level i location / 1: level (i-1) locations assigned to two level i location]	
prot(2)	int		Protection (in case of double assignment): [0: 50% protection / 1: 1000% protection]	
bwtc(2)	float		Bandwidth threshold for direct links between location of level (i-1) [bwtc(nconlev-1): 10000000 (∞)] [kbps]	
Ebene 2 (continued)				
ringprot(2)	int		Ring protection: [0: 50% protection / 1: 100% protection]	
Ebene 2 (continued)				
trenchopt(2)	int		Trench optimization (intra-cluster): [0: not applied / 1: applied]	
th1(2)	float		Threshold for relative new trench distance	0,5
th2(2)	float		Threshold for relative distance increment	2
Ebene 3				
nloc(3)	int		Number of locations at level [number of locations at level 3 equals number of locations at level 2]	
dmin(3)	float		Minimum distance between level i locations [km]	
maxnod(3)	int		Maximum number of level (i-1) locations assigned to a level i location [number of locations at level 3 equals number of locations at level 2]	1
gmuf(3)	float		global mark up factor	1,25
dasig(3)	int		Double assignment: [0: level (i-1) locations assigned to one level i location / 1: level (i-1) locations assigned to two level i location]	

Parameter	Type	Real Range	Description	Base Value
prot(3)	int		Protection (in case of double assignation): [0: 50% protection / 1: 1000% protection]	
bwtc(3)	float		Bandwidth threshold for direct links between location of level (i-1) [bwtc(nconlev-1): 10000000 (∞)] [kbps]	
ringprot(3)	int		Ring protection: [0: 50% protection / 1: 100% protection]	
trenchopt(3)	int		Trench optimization (intra-cluster): [0: not applied / 1: applied]	
th1(3)	float		Threshold for relative new trench distance	0,5
th2(3)	float		Threshold for relative distance increment	2
Ebene 4				
nloc(4)	int		Number of locations at level i	
dmin(4)	float		Minimum distance between level i locations [km]	
maxnod(4)	int		Maximum number of level (i-1) locations assigned to a level i location [\leq number of level i-1 locations]	
gmuf(4)	float		global mark up factor	1,25
dasig(4)	int		Double assignation: [0: level (i-1) locations assigned to one level i location / 1: level (i-1) locations assigned to two level i location]	
prot(4)	int		Protection (in case of double assignation): [0: 50% protection / 1: 1000% protection]	
bwtc(4)	float		Bandwidth threshold for direct links between location of level (i-1) [bwtc(nconlev-1): 10000000 (∞)] [kbps]	0
ringprot(4)	int		Ring protection: [0: 50% protection / 1: 100% protection]	
trenchopt(4)	int		Trench optimisation: [0: not applied / 1: applied]	
th1(4)	float		Threshold for relative new trench distance	0,5
th2(4)	float		Threshold for relative distance increment	2

Parameter	Type	Real Range	Description	Base Value
Ebene 5				
nloc(5)	int		Number of locations at level i	
dmin(5)	float		Minimum distance between level i locations [km]	
maxnod(5)	int		Maximum number of level (i-1) locations assigned to a level i location [\leq number of level i-1 locations]	
gmuf(5)	float		global mark up factor	1,25
dasig(5)	int		Double assignation: [0: level (i-1) locations assigned to one level i location / 1: level (i-1) locations assigned to two level i location]	
prot(5)	int		Protection (in case of double assignation): [0: 50% protection / 1: 1000% protection]	
bwtc(5)	float		Bandwidth threshold for direct links between location of level (i-1) [bwtc (nconlev-1): 10000000 (∞)] [kbps]	
ringprot(5)	int		Ring protection: [0: 50% protection / 1: 100% protection]	
trenchopt(5)	int		Trench optimisation: [0: not applied / 1: applied]	
th1(5)	float		Threshold for relative new trench distance	0,5
th2(5)	float		Threshold for relative distance increment	

7.4.3 Core Optimisation

Optimierung der flachen, vermaschten Kernnetzebene sowie Redundanz und Absicherung im flachen Kernnetz.

Parameter	Type	Real Range	Description	Base Value
		-		
Optimised	int	0 / 1	Meshed network Optimisation (0=full meshed; 1=optimised)	
Protection	int	1 / 2	Protection in flat core (1=50%; 2=100%)	
npath	int	2-3	Number of available multipath (≥ 1)	
min_deg	int	$> \text{npath}$	Minimum degree	
max_diam	int	> 2	Maximum diameter	
alpha	float	0 / 1	Distance/traffic ponderation factor (0=distance; 1=traffic)	

7.5 SYSTEM ASSIGNMENT

7.5.1 Redundancy and Layer 1 Technology

Value	Type	Value	Comments						
Level of equipment (0 to 5):				0	1	2	3	4	5
Lx_pf	int	1-2	Logical protection (1=50%; 2=100%)						
Px_pf	int	1-2	Physical protection(1=50%; 2=100%)						
For each Level of rings (0-1 to 5-5):				0-1	1-2	3-4	4-5	5-5	
Tech_xy	int	0-1, 1-2, 3-4, 4-5, 5-5	applied technology physical layer 0= NG SDH (ADM/OADM)*; 1= NG SDH (OADM); 2= ROADM-OTN; 3=ROADM-ETH (C/DWDM)						

* includes electrical interfaces for internal connections

7.5.2 Logical System Assignment

Beschreibung des generischen Equipments für die Einrichtungen des logischen Netzes

Parameter	Type	Base Value	Description
For each Level of equipment (0 to 5):			
Lx	int	0-5	Level of the equipment
Equal_to_Lxup	int	0-1	The equipment is identical to the previous level (0=equal, then new equipment not follow; 1=new equipment follow)
Rack_PIU_nmax	int		Maximum number of plug-in units per rack
P_Rack	float		Price per rack (in €)
Lx_pf	int	1-2	Protection factor (2):= plug-in units and thus linecards are doubled)
npluginunits	int		Number of available plug-in units
nporttypes	int		Number of available types of ports
For each available Plug-In unit:			
Lx_BW_PIU_j	float		Bandwidth of plug-in unit (e.g. Ethernet-switch) of type j (in Gbps)
Lx_PIU_j_nLC	int		Maximum number of slots for linecards per plug-in unit type j
p_Lx_PIU_j	float		Price per plug-in unit at capacity level j (in €)
For each available type of port:			
Lx_BW_PIU_port_i	float		Bandwidth in Mbps per port of type i
Lx_PIU_port_i_LCnport	int		Maximum number of ports per linecard i
p_Lx_PIU_port_i	float		Price (in €) per linecard at capacity level i

7.5.3 Physical System Assignment

Beschreibung des generischen Equipments für die technischen Einrichtungen des physikalischen Netzes

Parameter	Type	Base Value	Description
For each Level of physical equipment:			
C_ix	Int		Configuration general index
Techv	Int	0,1,2,3	Technology (0=SDH electrical/optical; 1=SDH optical; 2=DWDM; 3=OTN)
PIU_ix	Int		Plug-in unit internal index
PIU_name	String		Plug-in unit identification name
Px_BW_PIU_j	Double		Bandwidth of plug-in unit (in Gbps)
Nfib	Int		Number of fibres per port
Px_PIU_j_nLC_L	Int		Maximum number of slots for logical node sided linecards
Lx_BW_PIU_j	float		Bandwidth of level 0 plug-in-unit (e.g. Ethernet-switch) of type j (in Gbps)
Lx_PIU_j_nLC	int		Maximum number of slots for linecards per plug-in unit type j
p_Lx_PIU_j	float		Price per plug-in unit at capacity level j (in €)
Lx_BW_PIU_port_i	float		Bandwidth in Mbps per level 0 port of type
Lx_PIU_port_i_LCnport	int		Maximum number of ports per linecard i
p_Lx_PIU_port_i	float		Price (in €) per linecard at capacity level i
port_type	String		Port type identification name
Px_BW_PIU_port_Li	Double		Bandwidth in Gbps per logical node sided port
Px_PIU_port_Li_LCnport	Int		Maximum number of logical node sided ports per linecard
P_Px_PIU_port_Li	Double		Price (in €) per linecard
Px_PIU_j_nLC_R	Int		Maximum number of slots for ring-sided linecards
Px_BW_PIU_port_Ri	Double		Bandwidth in Gbps per ring-sided port
Px_PIU_port_Ri_LCnport	Int		Maximum number of ring-sided ports per linecard
P_Px_PIU_port_Ri	Double		Price (in €) per linecard Note,- Usually it is included into the plug-in unit price
P_Px_PIU_j	Double		Price (in €) per plug-in unit
Rack_PIU_nmax	Int		Maximum number of plug-in units per rack
P_Rack	Double		Price (in €) per rack
Avail_OnL01	Int	0-1	1= This configuration is available on level 0 - level 1 deployment (and on level 0 - level 2 if level 1 is not available)
Avail_OnL12	Int	0-1	1= This configuration is available on level 1 - level 2 deployment

Parameter	Type	Base Value	Description
For each Level of physical equipment:			
Avail_OnL34	Int	0-1	1= This configuration is available on level 3 - level 4 deployment (and on level 3 - level 5 if level 4 is not available)
Avail_OnL45	Int	0-1	1= This configuration is available on level 4 - level 5 deployment
Avail_OnL55	Int	0-1	1= This configuration is available on level 5 - level 5 deployment
Only_II	Int	0-1	1= Only available for leased lines configurations
dbtwrep	float		Maximum distance between repeaters (in km)
dbtwlc	float		Maximum distance between linecards (in km)
P_rep	float		Price (in €) per repeater
N_lambdas	Int		Number of lambdas (not 0 in case of ROADM-OTN, OTN and OXC)
Bw_lambda	float		Bandwidth (in Gbps) per lambda

7.6 MPOP-LIST

Standortinformationen (scorched node)

Name	Type	Comment
First line		
N_POPS	fix	Total number of MPOP nodes
N_Tech	fix	Number of considered Access Technologies
N_Users	fix	Number of considered User's types
Coor_type	fix	Geographical reference system (1=UTM xy; 0=Lat/Lon)
For each MPOP		
First line		
MPOP	fix	MPOP ID/Name
Mpop_code	fix	MPOP Code
Mpop_lan	fix	Geographical Latitude (X UTM)
Mpop_lon	fix	Geographical Longitude (Y UTM)
Tot_users	fix	Total Number of users
Next lines, one for each Access Technology (Anschlusszahlen nach Anschlusstypen)		
Usr1_IN	Int	IN Users of type 1 Anschlusstypen
Usr2_IN	Int	IN Users of type 2
Usr3_IN	Int	IN Users of type 3
Usr4_IN	Int	IN Users of type 4
Usr5_IN	Int	IN Users of type 5
Usr6_IN	Int	IN Users of type 6
Usr1_EB0	Int	Bitstream Ethernet Level 0 Users of type 1
Usr2_EB0	Int	Bitstream Ethernet Level 0 Users of type 2
Usr3_EB0	Int	Bitstream Ethernet Level 0 Users of type 3
Usr4_EB0	Int	Bitstream Ethernet Level 0 Users of type 4
Usr5_EB0	Int	Bitstream Ethernet Level 0 Users of type 5
Usr6_EB0	Int	Bitstream Ethernet Level 0 Users of type 6
Usr1_EB1	Int	Bitstream Ethernet Level 1 Users of type 1
Usr2_EB1	Int	Bitstream Ethernet Level 1 Users of type 2
Usr3_EB1	Int	Bitstream Ethernet Level 1 Users of type 3
Usr4_EB1	Int	Bitstream Ethernet Level 1 Users of type 4
Usr5_EB1	Int	Bitstream Ethernet Level 1 Users of type 5
Usr6_EB1	Int	Bitstream Ethernet Level 1 Users of type 6
Usr1_EB2	Int	Bitstream Ethernet Level 2 Users of type 1
Usr2_EB2	Int	Bitstream Ethernet Level 2 Users of type 2
Usr3_EB2	Int	Bitstream Ethernet Level 2 Users of type 3
Usr4_EB2	Int	Bitstream Ethernet Level 2 Users of type 4
Usr5_EB2	Int	Bitstream Ethernet Level 2 Users of type 5

Name	Type	Comment
Usr6_EB2	Int	Bitstream Ethernet Level 2 Users of type 6
Usr1_IPB3	Int	Bitstream IP Level 3 Users of type 1
Usr2_IPB3	Int	Bitstream IP Level 3 Users of type 2
Usr3_IPB3	Int	Bitstream IP Level 3 Users of type 3
Usr4_IPB3	Int	Bitstream IP Level 3 Users of type 4
Usr5_IPB3	Int	Bitstream IP Level 3 Users of type 5
Usr6_IPB3	Int	Bitstream IP Level 3 Users of type 6
Usr1_IPB4	Int	Bitstream IP Level 4 Users of type 1
Usr2_IPB4	Int	Bitstream IP Level 4 Users of type 2
Usr3_IPB4	Int	Bitstream IP Level 4 Users of type 3
Usr4_IPB4	Int	Bitstream IP Level 4 Users of type 4
Usr5_IPB4	Int	Bitstream IP Level 4 Users of type 5
Usr6_IPB4	Int	Bitstream IP Level 4 Users of type 6
Usr1_IPB5	Int	Bitstream IP Level 5 Users of type 1
Usr2_IPB5	Int	Bitstream IP Level 5 Users of type 2
Usr3_IPB5	Int	Bitstream IP Level 5 Users of type 3
Usr4_IPB5	Int	Bitstream IP Level 5 Users of type 4
Usr5_IPB5	Int	Bitstream IP Level 5 Users of type 5
Usr6_IPB5	Int	Bitstream IP Level 5 Users of type 6

Illustrative Structure of the MPoP-List

see also section 7.3

	user type 1	user type 2	user type 3	user type 4	user type 5	user type 6
access techn. 1						
access techn. 2						
access techn. 3						
access techn. 4						
access techn. 5						
access techn. 6						

8 Anhang: Inputparameter Kostenmodul

Die Inputparameter des Kostenmoduls haben keinen Einfluss auf das Netzplanungsmodul und das darüber abgeleitete Mengengerüst. Die hier enthaltenen technischen Einrichtungen gehören zur Kontrollschicht und können aufgrund ihres zentralen Charakters unabhängig von standortabhängigen Verkehren dimensioniert werden.

8.1 Control Layer

Parameter	Range	Description	Base Value / Comment
p_bras	>=0	Investment per Broadband Remote Access Server	
nt_CLB	>=0	Number of locations with BRAS	
BRAS_cap	>=0	Capacity per unit	
ur_BRAS	[0,1]	Maximum utilization ratio	
n_BRAS_red	>=0	Number of units which capacity has to be replaced by the others in case of failure (redundancy)	
share_red_tr_BRAS	[0,1]	% from original traffic per unit to be managed by the others in case of failure (redundancy)	
p_radius	>=0	Investment per Remote Authentication Dial-In-User Service server	
nt_CLR	>=0	Number of locations with RADIUS	
RADIUS_cap	>=0	Capacity per unit	
ur_RADIUS	[0,1]	Maximum utilization ratio	
n_RADIUS_red	>=0	Number of units which capacity has to be replaced by the others in case of failure (redundancy)	
share_red_tr_RADIUS	[0,1]	% from original traffic per unit to be managed by the others in case of failure (redundancy)	
p_dns	>=0	Investment per Domain name server	
nt_CLD	>=0	Number of locations with DNS	
DNS_cap	>=0	Capacity per unit	
ur_DNS	[0,1]	Maximum utilization ratio	
n_DNS_red	>=0	Number of units which capacity has to be replaced by the others in case of failure (redundancy)	1
share_red_tr_DNS	[0,1]	% from original traffic per unit to be managed by the others in case of failure (redundancy)	
p_ssw	>=0	Investment per Softswitch	
nt_CLS	>=0	Number of locations with SSW	
SSW_cap	>=0	Capacity per unit	

Parameter	Range	Description	Base Value / Comment
ur_SSW	[0,1]	Maximum utilization ratio	
n_SSW_red	>=0	Number of units which capacity has to be replaced by the others in case of failure (redundancy)	
share_red_tr_SSW	[0,1]	% from original traffic per unit to be managed by the others in case of failure (redundancy)	
p_mgc	>=0	Investment per Media Gateway Controller	
nt_CLM	>=0	Number of locations with MGC	
MGC_cap	>=0	Capacity per unit	
ur_MGC	[0,1]	Maximum utilization ratio	
n_MGC_red	>=0	Number of units which capacity has to be replaced by the others in case of failure (redundancy)	
share_red_tr_MGC	[0,1]	% from original traffic per unit to be managed by the others in case of failure (redundancy)	
p_sbc	>=0	Investment per Session Border Controller	Relevant only for VoIP
nt_CLC	>=0	Number of locations with SBC	Relevant only for VoIP
SBC_cap	>=0	Capacity per unit	Relevant only for VoIP
ur_SBC	[0,1]	Maximum utilization ratio	Relevant only for VoIP
n_SBC_red	>=0	Number of units which capacity has to be replaced by the others in case of failure (redundancy)	Relevant only for VoIP
share_red_tr_SBC	[0,1]	% from original traffic per unit to be managed by the others in case of failure (redundancy)	Relevant only for VoIP

8.2 WACC

Parameter	Range	Description	Base Value
WACC	[0,1]	Weighted Average Cost of Capital	

8.3 Economic lifetime

Parameter	Range	Description	Base Value (in years)
el_ESW/BNG	>0	Economic lifetime for Ethernet switch unit	
el_ESW_ports	>0	Economic lifetime for ESW ports	
el_MGW	>0	Economic lifetime for Media Gateway	
el_LER	>0	Economic lifetime for LER	
el_LER_ports	>0	Economic lifetime for LER ports	
el_LSR	>0	Economic lifetime for LSR	
el_LSR_ports	>0	Economic lifetime for LSR ports	
el_SDH	>0	Economic lifetime for SDH Multiplexer / DXC	
el_SDH_ports	>0	Economic lifetime for SDH Multiplexer ports	
el_DWDM	>0	Economic lifetime for DWDM unit	
el_DWDM_ports	>0	Economic lifetime for DWDM ports	
el_OTN	>0	Economic lifetime for OTN unit	
el_OTN_ports	>0	Economic lifetime for OTN ports	
el_SDH_reg	>0	Economic lifetime for SDH repeater	
el_DWDM_reg	>0	Economic lifetime for DWDM repeater	
el_OTN_reg	>0	Economic lifetime for OTN repeater	
el_DWDM_OXC	>0	Economic lifetime for DWDM OXC unit	
el_DWDM_OXC_ports	>0	Economic lifetime for DWDM OXC ports	
el_OTN_OXC	>0	Economic lifetime for OTN OXC unit	
el_OTN_OXC_ports	>0	Economic lifetime for OTN OXC ports	
el_cable	>0	Economic lifetime for cables	
el_infra	>0	Economic lifetime for trenches (incl, empty ducts)	
el_accomm_log_eq	>0	Economic lifetime for Accommodation assets Layer 2/3 equipment	
el_accomm_phys_eq	>0	Economic lifetime for Accommodation assets Layer 1/0 equipment	
el_build	>0	Economic lifetime for buildings	
el_land	>0	Economic lifetime for land	
el_racks	>0	Economic lifetime for racks	
el_BRAS	>0	Economic lifetime for BRAS	
el_RADIUS	>0	Economic lifetime for RADIUS	
el_DNS	>0	Economic lifetime for DNS	
el_SSW	>0	Economic lifetime for Softswitch	
el_MGC	>0	Economic lifetime for Media Gateway Controller	
el_SBC	>0	Economic lifetime for SBC	

Parameter	Range	Description	Base Value (in years)
el_mv	>0	Economic lifetime for motor vehicles	
el_of	>0	Economic lifetime for office equipment	
el_wo	>0	Economic lifetime for workshop equipment	
el_it	>0	Economic lifetime for IT network support equipment	
el_nm	>0	Economic lifetime for network management equipment	
el_lb	>0	Economic lifetime for land and buildings	
el_rep_cu	>0	Economic lifetime for Repeater (10km)	

8.4 Expected annual rate of price change

Parameter	Range	Description	Base Value (in years)
dp_ESW/BNG	[0,1]	Expected price change for Ethernet switch unit	
dp_ESW_ports	[0,1]	Expected price change for ESW ports	
dp_MGW	[0,1]	Expected price change for Media Gateway	
dp_LER	[0,1]	Expected price change for LER	
dp_LER_ports	[0,1]	Expected price change for LER ports	
dp_LSR	[0,1]	Expected price change for LSR	
dp_LSR_ports	[0,1]	Expected price change for LSR ports	
dp_SDH	[0,1]	Expected price change for SDH Multiplexer	
dp_SDH_ports	[0,1]	Expected price change for SDH Multiplexer ports	
dp_DWDM	[0,1]	Expected price change for DWDM unit	
dp_DWDM_ports	[0,1]	Expected price change for DWDM ports	
dp_OTN	[0,1]	Expected price change for OTN unit	
dp_OTN_ports	[0,1]	Expected price change for OTN ports	
dp_SDH_reg	[0,1]	Expected price change for SDH repeater	
dp_DWDM_reg	[0,1]	Expected price change for DWDM repeater	
dp_OTN_reg	[0,1]	Expected price change for OTN repeater	
dp_DWDM_OXC	[0,1]	Expected price change for DWDM OXC unit	
dp_DWDM_OXC_ports	[0,1]	Expected price change for DWDM OXC ports	
dp_OTN_OXC	[0,1]	Expected price change for OTN OXC unit	
dp_OTN_OXC_ports	[0,1]	Expected price change for OTN OXC ports	
dp_cable	[0,1]	Expected price change for cables	
dp_infra	[0,1]	Expected price change for trenches (incl. empty ducts)	

Parameter	Range	Description	Base Value (in years)
dp_accomm_log_eq	[0,1]	Expected price change for Accommodation assets Layer 2/3 equipment	
dp_accomm_phys_eq	[0,1]	Expected price change for Accommodation assets Layer 1/0 equipment	
dp_build	[0,1]	Expected price change for buildings	
dp_land	[0,1]	Expected price change for land	
dp_racks	[0,1]	Expected price change for racks	
dp_BRAS	[0,1]	Expected price change for BRAS	
dp_RADIUS	[0,1]	Expected price change for RADIUS	
dp_DNS	[0,1]	Expected price change for DNS	
dp_SSW	[0,1]	Expected price change for Softswitch	
dp_MGC	[0,1]	Expected price change for Media Gateway Controller	
dp_SBC	[0,1]	Expected price change for SBC	
dp_mv	[0,1]	Expected price change for motor vehicles	
dp_of	[0,1]	Expected price change for office equipment	
dp_wo	[0,1]	Expected price change for workshop equipment	
dp_it	[0,1]	Expected price change for IT network support equipment	
dp_nm	[0,1]	Expected price change for network management equipment	
dp_lb	[0,1]	Expected price change for land and buildings	
el_rep_cu	[0,1]	Economic lifetime for Repeater (10km)	

8.5 Other parameters

Parameter	Range	Description	Base Value
IPTV	Yes/No	Consideration of IPTV impact (outband) for cost calculation	
share_IPTV_Li	[0,1]	Share of rings with IPTV traffic per transmission level [(i-1) – i]	
df	>=1	Detour factor (ratio routing length to aerial distance)	1,25

8.6 OPEX: Zuschlagsfaktoren auf den Investitionswert

Description	Base Value [%]
Concentration network	
Ethernet switch/ BNG	
NG SDH equipment	
DWDM equipment	
OTN equipment	
Trenches / Cable deployment	
Core network	
LER	
LSR	
DWDM equipment	
OTN equipment	
Trenches / Cable deployment	
Media Gateway	
Sites	
Racks	
Control layer	
BRAS	
RADIUS	
DNS	
Softswitch	
MediaGateway controller	
SBC	

Impressum

WIK-Consult GmbH
Rhöndorfer Str. 68
53604 Bad Honnef
Deutschland
Tel.: +49 2224 9225-0
Fax: +49 2224 9225-63
eMail: info(at)wik-consult.com
www.wik-consult.com

Vertretungsberechtigte Personen

Geschäftsführer	Dr. Iris Henseler-Unger
Direktor	Alex Kalevi Dieke
Abteilungsleiter Netze und Kosten	Dr. Thomas Plückebaum
Direktor	Dr. Ulrich Stumpf
Leiter Verwaltung	Karl-Hubert Strüver

Vorsitzender des Aufsichtsrates Winfried Ulmen

Handelsregister Amtsgericht Siegburg, HRB 7043

Steuer Nr. 222/5751/0926

Umsatzsteueridentifikations Nr. DE 123 383 795