

Erstellung von Bottom-up
Kostenrechnungsmodellen zur Ermittlung
der Kosten der Zusammenschaltung
in Festnetzen und Mobilnetzen

Mobilfunknetz

Version 2.0

Autoren:

Prof. Klaus Hackbarth, Universidad de Cantabria
Dr. Werner Neu, WIK-Consult
Dr. Juan Eulogio Sánchez García, WIK-Consult

WIK-Consult GmbH
Rhöndorfer Str. 68
53604 Bad Honnef

Bad Honnef, Mai 2015

Inhalt

Abbildungen	III
Tabellen	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
2 Ausgangssituation, Voraussetzungen und Festlegungen	2
2.1 Überblick	2
2.2 Die demografischen und geografischen Inputdaten	5
2.3 Bestimmung der Nachfrage und ihrer räumlichen Verteilung	11
2.4 Beschreibung der Dienste-Kategorien	14
2.5 Technologie-Mix	18
2.6 Verfügbarkeit und Nutzung von Frequenzen	20
3 Modellierung des Netzes	21
3.1 Radiozugangsnetz	21
3.1.1 Die Systeme des Radiozugangsnetzes	22
3.1.2 Die Bedeutung von Uplink- und Downlink-Verkehr bei der Zellenplanung	24
3.1.3 Zellenplanung für 2G GSM	25
3.1.4 Zellenplanung für 3G UMTS	28
3.1.5 LTE im Radiozugangsnetz	35
3.1.6 Voice over LTE (VoLTE)	46
3.1.7 Besonderheiten bei Zellen mit hybriden Technologie-Kombinationen	50
3.1.8 Zusatzversorgung entlang Autobahnen, Schnellstraßen und Haupteisenbahnstrecken	50
3.1.9 Signalisierung	51
3.2 LTE-Transportnetz	52
3.3 Aggregationsnetz	53
3.3.1 Bestimmung der Controller-Standorte	55
3.3.2 Topologie, Dimensionierung der Kapazitäten und Bestimmung der Systeme	60
3.3.3 Dieses Netzsegment im Fall eines reinen LTE-Netzes	69
3.4 Backhaul-Netz	69
3.4.1 Bestimmung der Standorte für Core-Netz-Funktionen	70

3.4.2	Topologie, Dimensionierung und Bestimmung der Systeme	70
3.4.3	Dieses Netzsegment im Fall eines reinen LTE-Netzes	78
3.5	Core-Netz	78
3.5.1	Design der Core-Netz-Systeme für leitungsvermittelte GSM- und UMTS-Dienste :	81
3.5.2	Core-Netz-Systeme für EDGE/UMTS Datenverkehr	84
3.5.3	Design der Core-Netz-Systeme für LTE-Verkehre im EPC	84
3.5.4	Design der IMS-Plattform für VoLTE	85
3.5.5	Topologie des Core-Netzes und Dimensionierung des physischen Netzes	86
3.5.6	Dimensionierung der weiteren Core-Netz-Einrichtungen	87
3.6	Zusammenfassende Beschreibung der Konzepte zur Sicherstellung von Redundanz und QoS	89
3.6.1	Implementierung von Redundanz und QoS-Gewährleistung im Modell	89
3.6.2	Qualitätsdifferenzierung und äquivalente Bandbreite	91
4	Ermittlung der Kosten	93
4.1	Der verwendete Kostenrechnungsmaßstab	93
4.2	Voraussetzungen für die Kostenermittlung im Modell	94
4.3	Annualisierte Capex	95
4.4	Opex	97
4.5	Besondere Aspekte der Kostenbestimmung	98
4.6	Bestimmung der Gesamtkosten und Kosten für einen Dienst	98
5	Merkmale des Software-Tools	99
	Literatur	101

Abbildungen

Abbildung 2-1:	Schematischer Überblick über den Modellierungsprozess	3
Abbildung 2-2:	Architektur des zu modellierenden Netzes	4
Abbildung 2-3:	Ausschnitt aus dem Bevölkerungs-Layer (jeder Punkt stellt ein Raster mit Einwohnerinformationen dar)	6
Abbildung 2-4:	Autobahnen und Schnellstraßen in Österreich	9
Abbildung 2-5:	Flussdiagramm für den Prozess der Aggregation von Siedlungsgebieten zu Distrikten	13
Abbildung 3-1:	Schematischer Überblick über den Prozess der Dimensionierung von 2G GSM-Zellen	26
Abbildung 3-2:	Flussdiagramm zur Berechnung des Zellen-Radius für 2G GSM	27
Abbildung 3-3:	Schematic representation of the process to determine the cell range for 3G UMTS cells	29
Abbildung 3-4:	Flow chart for the calculation of the cell range in 3G networks	30
Abbildung 3-5:	HSPA cell range calculation procedure	34
Abbildung 3-6:	Ansatz zur Bestimmung des Zellenradius für LTE	37
Abbildung 3-7:	Berechnung des Zellradius nach den Wellenausbreitungseigenschaften des Spektrums	38
Abbildung 3-8:	Kapazitäts-Berechnung	39
Abbildung 3-9:	Berechnung der Anzahl der eNodeB	40
Abbildung 3-10:	Berechnung der Zellengröße bei Einsatz von Carrier Aggregation	45
Abbildung 3-11:	Schematisches Beispiel eines Aggregationsnetzes in einem hybriden Netz	54
Abbildung 3-12:	Bestimmung der Controller-Standorte und der Zuweisung der Zellen-Hubs	57
Abbildung 3-13:	Berechnung zur Bestimmung der Topologie zwischen den Standorten von Zellen-Hubs und Controllern	59
Abbildung 3-14:	Beispiel einer Baum-Topologie für ein Controller-Cluster, die die Standorte von Zellen, Zellen-Hubs und Controllern in einem GSM-Netz verbindet	61
Abbildung 3-15:	Hauptkomponenten eines Aggregationsnetzes, basierend auf Release 10 des 3GPP	62
Abbildung 3-16:	Hauptsächliche Komponenten einer physischen Verbindung in einer Sternstruktur zwischen Zellen-Hub und Controller	66
Abbildung 3-17:	Beispiel einer Baumstruktur des Aggregationsnetzes mit einem Controller und der zugeordneten Zellen-Hubs und Verbindungen	68

Abbildung 3-18: Beispiel für die Topologie eines Backhaul-Netzes	71
Abbildung 3-19: Das Backhaul-Netz mit seinen wesentlichen Komponenten	72
Abbildung 3-20: Logische Verbindungen zwischen den Funktionsblöcken an den Controller-Standorten und denen an den Standorten des Core-Netzes, basierend auf Elementen von Release 4 bis 10 des 3GPP	75
Abbildung 3-21: Schematische Darstellung einer Ring-Topologie auf der Basis von Richtfunk mit RADM	77
Abbildung 3-22: Logische Verbindungen zwischen den Funktionsblöcken an den Controller-Standorten und denen an den Standorten des Core-Netzes, basierend auf Elementen von Release 4 bis 8 des 3GPP	80
Abbildung 3-23: Verkehrsverteilung von On-Net-Verkehr von 3 Standorten mit 500, 300 und 260 Erlang: A) Zuordnung der Verkehre zu den Standorten B) Verkehrsmuster nach erfolgtem Routing	83
Abbildung 4-1: Pure LRIC der Terminierung und KEL aller anderen Dienste	94
Abbildung 5-1: Struktur der Funktions-Module für die Netzplanung	99

Tabellen

Tabelle 2-1:	Flughäfen mit zusätzlicher Mobilfunkzellenabdeckung	10
Tabelle 2-2:	Bahnhöfe mit zusätzlicher Mobilfunkzellenabdeckung	10
Tabelle 2-3:	Topologische Klassen entsprechend Steigungskriterien	11
Tabelle 2-4:	Typische Werte der Parameter für die Bildung der Distrikte	13
Tabelle 2-5:	Beschreibung der Dienste-Kategorien in der UMTS Forum-Studie	15
Tabelle 2-6:	Die im Modell verwendeten Dienste-Kategorien	16
Tabelle 2-7:	Beispielhafte Werte für die Merkmale der betrachteten Dienste-Kategorien*	17
Tabelle 2-8:	Beispiele von Schwellenwerten für die Bestimmung von hybriden Netzen	19
Tabelle 3-1:	Beispiel von möglichen Übertragungssystemen für die Verbindung von Zellen-Hubs mit dem entsprechenden Controller	67
Tabelle 3-2:	Beispiel einer Dimensionierung eines BSC-Standortes, für den mehrere Einheiten desselben BSC-Typs zur Verfügung stehen	73
Tabelle 3-3:	Kostentreiber für BSC und RNC und typische Auslastungsgrade	74
Tabelle 3-4:	Zusammenfassende Betrachtung der funktionalen Einrichtungen im Core-Netz	88
Tabelle 3-5:	Werte der globalen Mark-up-Faktoren für Redundanz auf den verschiedenen Netzebenen	90
Tabelle 3-6:	Ansätze zur Erlangung von Redundanz für die Einrichtungen auf den verschiedenen Netzebenen	90

Abkürzungsverzeichnis

2G	Second Generation Mobile Technology
3G	Third Generation Mobile Technology
3GPP	3rd Generation Partnership Project (3GPP)
AAA	Authentication Authorization and Accounting
ADM	Add Drop Multiplexer
AMR-WB	Adaptive Multi-Rate Wideband (AMR-WB)
BH	Busy Hour
BHCA	Busy Hour Call Attempt
BLER	Block Error Rate
BSC	Base Station Controller
BTS	Base Transceiver Station
BW	Bandwidth
CA	Carrier Aggregation
CAPEX	Capital Expenditures
CIR	Committed Information Rate
CSCF	Call State Control Functions
CSFB	Circuit Switched Fallback
DL	Downlink
DLL	Dynamic Link Library
DNS	Domain Name System
DSG	Digital Subscriber Group
E1	Physical layer protocol for leased line transmissions. E1 lines have 32x64 kbps channels at 2.048 Mbps.
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EIR	Equipment Identity Register
eNodeB	Evolved NodeB
EPC	Evolved Packet Core
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GHz	Giga Hertz

GIS	Geographic Information System
gMuF	Globaler Mark-up-Faktor
GoS	Grade of Service
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HLR	Home Location Register
HS-DSCH	High Speed Downlink Shared Channel
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
IC	Interconnection
I-CSCF	Interrogate Call State Control Functions
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMS-MGW	IMS Mediagateway
IP	Internet Protocol
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISP	Internet Service Provider
ISUP	ISDN User Part
kbps	Kilobit per Second
KEL	Kosten der effizienten Leistungsbereitstellung
LAN	Local Area Network
LER	Label Edge Router
LRAIC	Long Run Average Incremental Cost
LRIC	Long Run Incremental Cost
LSR	Label Switch Router
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MBA	Mobile Broadband Access
Mbps	Megabit per Second
MCS	Modulation and Coding Scheme
MGW	Mediagateway
MHz	Mega-Hertz

MIMO	Multiple-Input-Multiple-Output
mLu	Mean Length of Packets (Uplink)
mLd	Mean Length of Packets (Downlink)
MME	Mobility Management Entity
MMS	Multimedia Messaging Service
MMSC	Multimedia Messaging Service Centre
MPLS	Multiprotocol Label Switching
MSC	Mobile Switching Center
MST	Minimum Spanning Tree
MuF	Mark-up-Faktor
MU-MIMO	Multi-user Multiple Input Multiple Output
NGN	Next Generation Network
NodeB	Basisstation in einem UMTS-Mobilfunknetz
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OPEX	Operational Expenditures
OSI	Open Systems Interconnection Reference Model
P2P	Peer to Peer
PCRF	Policy and Charging Rules Function
P-CSCF	Proxy- Call State Control Functions
PCU	Packet Control Unit
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDP-Kontext	Packet Data Protocol Kontext
P-GW	Packet Data Network Gateway
PLMN	Public Land Mobile Network
PSTN	Public Switched Telephone Network
qMUF	Mark-up-Faktor entsprechend QoS für jede Dienste-Kategorie
QoS	Quality of Service
RADM	Standardkonfiguration von Add-and-Drop Multiplexer
RB	Resource Blocks
RCS	Rich Communication Suite
RLC	Radio Link Control

RNC	Radio Network Controller
ROADM	Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer
RoHC	Robust Header Compression
RTP	Real Time Protocol
SAE-GW	System Architecture Evolution Gateway
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
S-CSCF	Service-Call State Control Functions
SGSN	Serving GPRS Support Node
SINR	Signal to Interference Noise Ratio
S-GW	Serving Gateway
SMS	Short Message Service
SMSC	Short Message Service Centre
STM	Synchronous Transport Module
SU-MIMO	Single User Multiple Input Multiple Output
TAS	Telephone Application Server
TBS	Transport Block Size
TRX	Transceiver
TTI	Time Transmission Interval
UDP	User Datagram Protocol
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VLR	Visitor Location Register
VoIP	Voice over Internet Protocol
VoLGA	Voice over LTE via Generic Access
VoLTE	Voice over LTE
VPN	Virtual Private Network
WACC	Weighted Average Cost of Capital
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access

1 Einleitung

Dieses Dokument beschreibt das Analytische Kostenmodell Mobilfunk, das von WIK-Consult für die RTR GmbH erstellt worden ist. Es beschreibt die Grundstruktur des softwaremäßig entwickelten Modells, mit dem die Kosten der Gesprächsterminierung in Mobilfunknetzen bestimmt werden können.

Wie der Titel bereits ausdrückt, handelt es sich hier um ein Bottom-up-Modell. Dies bedeutet, dass das Mobilfunknetz, dessen Kosten bestimmt werden sollen, von Grund auf neu konzipiert und entsprechend dem sogenannten Economic/Engineering-Ansatz auf einem Computer entworfen wird. Die aus diesem Planungsansatz sich ergebenden Anlagen (oder Netzelemente: Basisstationen, Übertragungswege, Router, etc.) werden dann in einem Kostenmodul bewertet und in Kosten je Netzelement und Jahr umgewandelt.

Das Dokument besteht aus vier Kapiteln, die die folgenden Themen behandeln:

- Ausgangssituation, Voraussetzungen und A-priori Festlegungen für die Modellierung,
- Modellierung des Netzes,
- Modellierung der Kosten, die sich aus dem modellierten Netz ergeben und
- Merkmale des Softwaretools.

Das Modell ist explizit darauf ausgerichtet, die Kosten der Terminierung entsprechend der Methodik der "Pure LRIC" zu ermitteln. Damit folgt es der Methodik, die in der Empfehlung der EU-Kommission vom 7. Mai 2009¹ vorgegeben worden ist. Auf die Eigenschaften und Form der Implementierung dieses Kostenstandards wird in dem Kapitel zur Modellierung der Kosten detailliert eingegangen.

Die vorliegende Version des Referenzdokuments ist für Version 2.0 des Mobilfunknetz-Kostenmodells, welche sich von der ersten Version von Juli 2012 dadurch unterscheidet, dass in ihr zusätzlich die neue Technologie LTE mit Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) und Carrier Aggregation (CA) als Funktionalitäten von LTE Advanced aufgenommen worden ist, sowie als neuer Dienst Voice over LTE (VoLTE).

¹ Siehe EU-Kommission (2009).

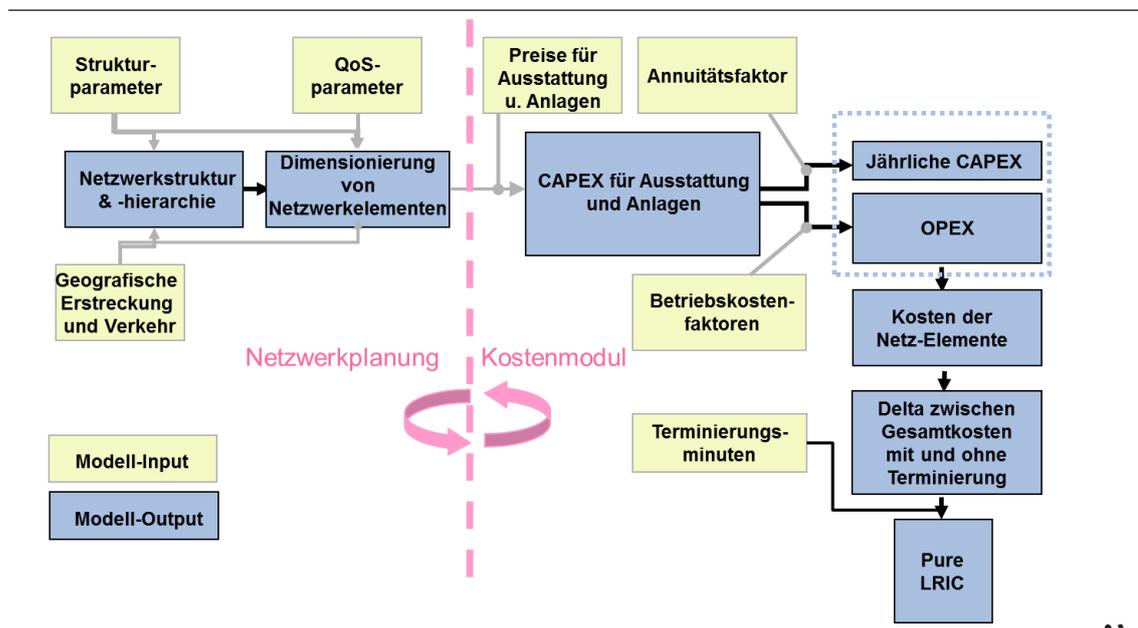
2 Ausgangssituation, Voraussetzungen und Festlegungen

2.1 Überblick

Das Bottom-up-Kostenmodell für Mobilfunknetze (von nun an "das Modell") erhebt den Anspruch, das Netz eines neu in den Markt eingetretenen Netzbetreibers (von nun an "der Referenz-Netzbetreiber"), der einen bestimmten Marktanteil der Nachfrage in Österreich auf sich vereinigt, von Grund auf zu modellieren, aber gleichzeitig die Bedingungen, unter denen existierende Betreiber gegenwärtig operieren, in einem repräsentativen Sinne möglichst adäquat mit zu berücksichtigen. Die Modellierung beginnt mit der Nachfrage der Nutzer, die entsprechend der regionalen Verteilung der Bevölkerung in Österreich erfasst wird, wobei von einem durchschnittlichen Nutzungsprofil pro Teilnehmer ausgegangen wird. Das Modell plant dann ein Netz, das einen Teil dieser Nachfrage – entsprechend dem Marktanteil des betrachteten Anbieters – bedienen kann, und bestimmt anhand der Preise der Inputs die Gesamtkosten dieses Netzes und schließlich als Teil davon die Kosten eines bestimmten Teils der Nachfrage, nämlich der Terminierung von Verbindungen, die von Nachfragern in anderen Netzen initiiert, und mit Teilnehmern in dem betrachteten Netz hergestellt worden sind.

Abbildung 2-1 gibt einen schematischen Überblick über den Modellierungsprozess. Es wird unterschieden zwischen der Planung des Netzes (links in der Abbildung) und der Berechnung der Kosten (rechts in der Abbildung). Das Netzplanungstool wird in der Programmiersprache C++ geschrieben, aber in eine MS Excel Umgebung eingebunden. Das Kostenmodul wird ausschließlich in MS Excel erstellt. Die beiden Module werden in den Kapiteln 2 und 3 mit einem solchen Detaillierungsgrad beschrieben, dass ihre Funktionsweise vom Leser jeweils nachvollzogen werden kann.

Abbildung 2-1: Schematischer Überblick über den Modellierungsprozess



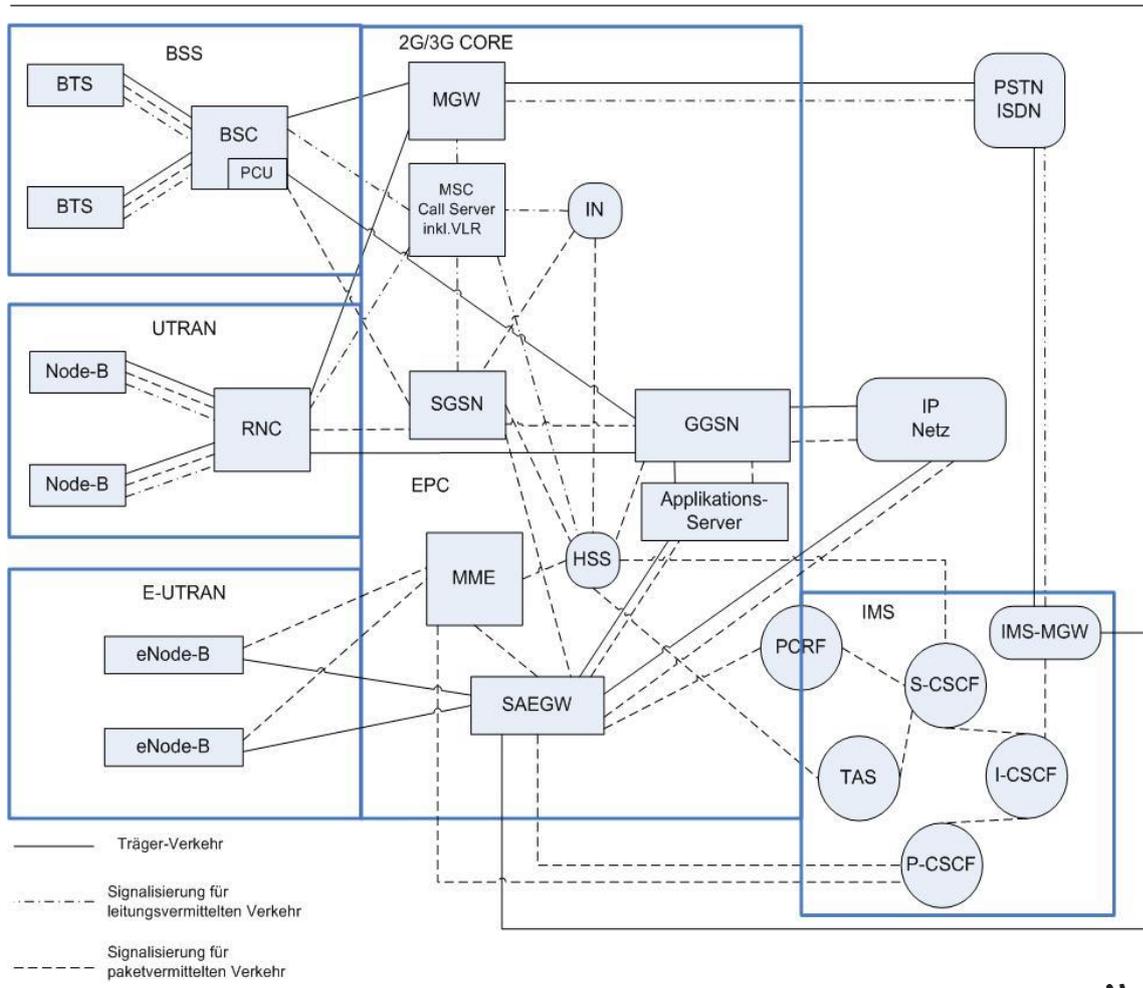
Das Modell wird in der Lage sein, Netze auf der Basis der gegenwärtig in Österreich eingesetzten Technologien zu modellieren: GSM/EDGE, UMTS und UMTS mit HSPA, sowie LTE. Die Spezifikation des Modells wird es erlauben, Netze zu modellieren, die entweder nur GSM/EDGE, nur UMTS, nur UMTS/HSPA oder nur LTE als Technologie einsetzen, oder hybride Netze auf der Basis von Kombinationen der verschiedenen Technologien.

Das Modell erlaubt es, Nachfrage zu modellieren, die sich aus bis zu zehn Dienstgruppen, die von Sprache bis zum mobilen Breitbandzugang reichen kann, zusammensetzt (wegen der berücksichtigten Dienste siehe Abschnitt 2.4, insbesondere Tabelle 2-7). Die Zusammensetzung der Nachfrage entsprechend der verschiedenen Dienste ist insofern relevant, als die Dienste unterschiedliche Anforderungen an die Dimensionierung eines Netzes stellen und dies bei der Modellierung berücksichtigt werden muss. Es macht einen Unterschied, ob die Nachfrage z.B. zu 80 % aus Sprache und zu 20 % aus Daten besteht oder umgekehrt, einmal im Radio-Zugangsnetz bezüglich der Größe der Zellen aber auch in den darüber liegenden Netzteilen, je nachdem, wie die jeweiligen Verkehrsströme dort geführt werden müssen.

Die Dimensionierung eines Netzes hängt ferner von den eingesetzten Frequenzen ab. Das Modell kann für die Nutzung von Spektrum, das aus allen relevanten Frequenzbändern stammt, spezifiziert werden; welche Frequenzkombinationen konkret für welche Technologien eingesetzt werden, wird weiter unten erläutert.

Das wesentliche Merkmal des Modells ist die Flexibilität, mit der im Radio-Zugangsnetz die verschiedenen Zugangs-Technologien kombiniert werden können. Dies wird in Abbildung 2-2 deutlich, in dem die Architektur des Netzes schematisch skizziert wird.

Abbildung 2-2: Architektur des zu modellierenden Netzes



Die Abbildung 2-2 basiert auf Elementen aus Release 4 bis 10 des 3GPP. Änderungen gegenüber der ursprünglichen Version des Modells werden durch die Hinzufügung des LTE-Radiozugangsnetzes (E-UTRAN), des Evolved Packet Core (EPC) und des IP Multimedia Subsystem (IMS) verdeutlicht, die durch die Integration der LTE-Technologie und des VoLTE-Dienstes notwendig wurden. Wie bereits erwähnt, wird die Modellierung des Netzes in Kapitel 2 detailliert dargestellt, die Bestimmung der Kosten ist Gegenstand von Kapitel 3. Alle anderen in diesem Überblick kurz angerissenen Aspekte werden in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels noch weiter erläutert.

Das Modell zielt auf ein möglichst hohes Maß an Realitätsnähe. Gleichwohl gilt, dass jedes Modell auf der Annahme stilisierter Umweltbedingungen basiert, und das WIK-

Modell ist da keine Ausnahme (wie auch die von Betreibern selbst verwendeten Planungsmodelle). Der Einfluss von detaillierten Umweltbedingungen, die nicht im Modell explizit abgebildet werden können, werden in der Regel durch bestimmte konservative und in der Praxis erprobte Dimensionierungsregeln (Auslastungsgrade etc.) aufgefangen. Dies geschieht auch im WIK-Modell. Insofern ist es nicht angebracht, von dem Modell zu erwarten, dass es ein detailgenaues Abbild der real in Österreich aufgebauten Mobilfunknetze wiedergibt.

2.2 Die demografischen und geografischen Inputdaten

Das zu modellierende Netz soll einen bestimmten Raum abdecken – hier in der Regel die Fläche Österreichs – und die Nachfrage, die in diesem Raum durch die dort sich aufhaltende Bevölkerung erzeugt wird, bedienen können. Zur Erfassung der entsprechenden Daten wird auf Informationen über die Siedlungsgebiete Österreichs zurückgegriffen, die die Angaben zu Bevölkerung und die geografischen Besonderheiten der einzelnen Gebiete enthalten. Die Anzahl der Mobilfunknutzer, die der Netzdimensionierung zugrunde liegt, wird durch die Penetrationsrate, mit der Mobilfunk in der Bevölkerung verbreitet ist, ermittelt. Die Nachfrage wird somit bottom-up bestimmt. Das nachgefragte Verkehrsvolumen wird in der Modellkonzeption nicht nur rein statisch erfasst, sondern auch dynamisch mit Hilfe eines so genannten Bewegungsmodells, das die räumliche Migration insbesondere der arbeitenden Bevölkerung geeignet abbildet und das später in diesem Abschnitt näher beschrieben wird.

Für die im Abschnitt 3.1 dieses Dokuments beschriebene Modellierung des Radiozugangsnetzes wird die Fläche Österreichs in Distrikte aufgeteilt, für die jeweils angenommen werden kann, dass innerhalb eines jeden homogene Bedingungen herrschen, so dass dann eine entsprechende Zellenoptimierung für jeden Distrikt vorgenommen werden kann. Außerdem gilt, dass die resultierenden Distrikte in Bezug auf das gesamte Netz die erste Ebene der Aggregation für den von den Basisstationen abzuleitenden und zu ihnen hinzuführenden Verkehr darstellt. Die Bildung der Bezirke wird im nächsten Abschnitt beschrieben. Im verbleibenden Teil dieses Abschnitts wird gezeigt, wie die dazu benötigten Basisdaten zusammengestellt werden.

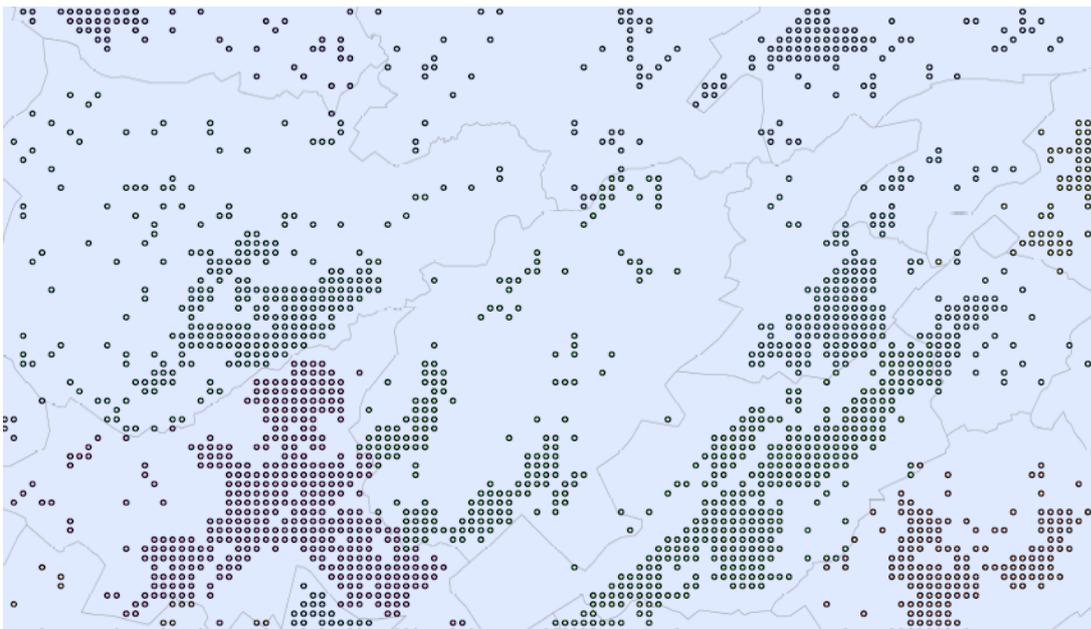
Informationen zu den Siedlungsgebieten sind von der RTR zur Verfügung gestellt worden. Die Daten zu diesen Gebieten enthalten die genannten Nachfragedaten sowie topologische Eigenschaften, die für die Dimensionierung des Radiozugangsnetzes relevant sind. In ihnen können auch Restriktionen bezüglich der Nutzung von Frequenzbändern, soweit sie bestehen, aufgenommen werden.

Diese Informationen liegen nach einer entsprechenden Bearbeitung individuell für jedes der Siedlungsgebiete vor. Sie bestehen aus den Kategorien

- Bevölkerung,
- Betriebe und Beschäftigte,
- Touristen,
- Autobahnen und Eisenbahnen,
- Flughäfen,
- Bahnhöfe, und
- Höhenunterschiede.

Der Datensatz zur Bevölkerung gibt an, wie die Einwohner in der Fläche Österreichs verteilt sind. Der Rückgriff auf die in unserem Ansatz eingesetzten Siedlungsgebiete erlaubt es, die Verteilung der Nachfrage auf der Basis der Bevölkerung adäquat im Raum darzustellen. Die Nachfrage wird für die Netzdimensionierung so abgebildet, dass jeder Einwohner als potentieller Mobilfunkkunde des effizienten Netzbetreibers angesehen werden kann, der in der Hauptverkehrsstunde ein durchschnittliches Verkehrsvolumen nachfragt. Abbildung 2-3 zeigt einen Ausschnitt aus dem Bevölkerungsdatensatz, in dem jeder Punkt ein Raster mit Einwohnerinformationen darstellt.

Abbildung 2-3: Ausschnitt aus dem Bevölkerungs-Layer (jeder Punkt stellt ein Raster mit Einwohnerinformationen dar)



Programmierungstechnisch wird dabei so vorgegangen, dass in das Modell tatsächlich beobachtete gesamte Verkehrsmengen für Österreich eingegeben werden, die dann modellintern aufgrund der Anzahl der Teilnehmer in Nachfrage je Teilnehmer umgerechnet werden, so dass darauf und auf der Anzahl der Nutzer in den einzelnen Distrikten basierend die Nachfragevolumina in diesen Distrikten bestimmt werden können.

Das Modell ist in der Lage, die räumliche Verteilung der Verkehr generierenden Mobilfunkkunden über den Tag zu erfassen, das heißt etwaige Bewegungen der Einwohner werden berücksichtigt. Die Migration der Bevölkerung über den Tag ergibt sich vornehmlich durch Pendler, die sich morgens zu ihren Arbeitsstätten und nachmittags zu ihren Wohnplätzen begeben. Um die Pendlerbewegung adäquat bei der Dimensionierung des Netzes aufzunehmen, greift das Modell auf geografische Informationen zur räumlichen Verteilung von Beschäftigten und Betrieben zurück. Aggregationen von Betrieben und Beschäftigten, beispielsweise in der Form von Business Parks, können durch diese geografischen Informationen erst erkannt und bei der Netzgestaltung berücksichtigt werden.

Die Spezifikation des Bewegungsmodells, mit dem die Bewegungen der Pendler auf einer täglichen Basis erfasst werden, ist wie folgt. Von den Privatpersonen in den Haushalten in jedem Siedlungsgebiet wird ein Anteil abgezogen, von dem angenommen wird, dass er sich tagsüber nicht an seinem Wohnort aufhält, sondern an seiner Arbeitsstätte. Die Gesamtzahl der Personen, die so "bewegt" werden, entspricht der Gesamtzahl der Arbeitsplätze, die für ganz Österreich ausgewiesen wird. Diese Personen werden dann den Arbeitsstätten, wie sie individuell für jedes Siedlungsgebiet bekannt sind, zugewiesen. Dadurch geschieht es, dass Gebiete mit einer relativ geringen Anzahl an Haushalten, insbesondere innerstädtische Bereiche, eher während der Tageszeit ihre Spitzenlast aufweisen, während andere (vorstädtische und ländliche) Gebiete ihre Spitzenlast eher abends haben.

Um die Bewegungen der Touristen zu erfassen, wird die Gesamtzahl der Urlauber anhand der Bettenzahlen in den Hotels und sonstigen Herbergen annähernd geschätzt und den Orten, an denen sich die entsprechenden Hotels und Herbergen befinden, zugeordnet. Dadurch können Urlaubsorte mit einer relativ geringen Anzahl an Haushalten eine erheblich größere Anzahl von dort Anwesenden zugeordnet bekommen. Das Einbeziehen von Urlaubern führt dazu, dass relativ schwach besiedelte Gebiete in der Reisezeit zu intensiv besuchten Gegenden werden und dadurch die Spitzenlastzeit bestimmen. In Bezug auf die Anzahl der Personen, die sich außer zur Urlaubszeit ständig in einem Gebiet aufhalten, wird keine Korrektur für ihre urlaubsbedingte Abwesenheit vorgenommen, da diese Anzahl weiterhin den Peak während des größten Teils des Jahres bestimmt.

Bei diesem Verfahren wird zunächst angenommen, dass sich die Zahl der Besucher aus dem Ausland und die Zahl der Reisenden ins Ausland größtenteils gegenseitig aufheben. Falls sich ein (positiver oder negativer) Saldo ergibt und entsprechende Informa-

tionen dazu vorliegen, ist die Anzahl der Nachfrager in den einzelnen Bezirken entsprechend zu ergänzen.

Anzumerken ist ferner, dass ein Teil der Nutzer, d.h. die Pendler, über beide Hauptverkehrszeiten verteilt ihre Nachfrage entfalten. Durch eine entsprechende Anpassung wird sichergestellt, dass die Summe der zu diesen beiden Zeiten von den Pendlern verursachten – und vom Modell erfassten – Nachfrage der für sie für den ganzen Tag angenommen Nachfrage entspricht.

Die Versorgung der Fläche Österreichs ist bereits im Sinne der Modellierung durch die Layer-Informationen zu Bevölkerung, Erwerbstätigen und Touristen in den einzelnen Distrikten bzw. deren Verkehrsaufkommen hinreichend gegeben. Die realisierten Netze der Wettbewerber verdeutlichen jedoch, dass neben der bisher beschriebenen Flächenabdeckung Autobahnen und ausgewählte Eisenbahnstrecken besonders intensiv mit Mobilfunkzellen versorgt werden. Aufgrund dieser wettbewerblich bedingten Entwicklung bei den existierenden Netzen wird in der Modellierung angenommen, dass neben einer grundsätzlich ausreichenden, die Fläche vollständig versorgenden Abdeckung eine weitere zusätzliche Mobilfunkversorgung einzubeziehen ist. Dies geschieht, indem zusätzliche Mobilfunkabdeckung bei wichtigen und intensiv genutzten Verkehrsadern wie Autobahnen und Eisenbahnlinien vorgenommen wird. Entlang diesen Verkehrswegen werden in der Modellogik (zusätzliche) Mobilfunkmasten errichtet und so die Bereitstellung von Mobilfunkdiensten neben der Grundversorgung ein weiteres Mal gewährleistet. Eine solche Zusatzversorgung wird für Autobahnen und Schnellstraßen sowie für Haupteisenbahnstrecken vorgesehen. Tunnel auf diesen Verkehrsstrecken werden dabei mit Repeater-Einheiten versorgt. Abbildung 2-4 gibt anhand einer Karte für die Autobahnen und Schnellstraßen einen Eindruck davon, welches Ausmaß diese Zusatzversorgung hat.

Abbildung 2-4: Autobahnen und Schnellstraßen in Österreich



Besondere Bedeutung bei der flächenbezogenen Versorgung von Österreich haben so genannte Points of Interest, d.h. Orte, an denen eine hohe Zahl an Personen zugegen ist. Stark frequentierte Gebiete sind Flughäfen, die aufgrund dieser Eigenschaft eine gesonderte Behandlung in dem Sinn erfahren, als dass sie neben der grundsätzlichen Flächenversorgung noch mit zusätzlichen Mobilfunkstandorten versorgt werden. Die Berücksichtigung der 6 größten Flughäfen (siehe Tabelle 2-1) deckt den überwiegenden Teil des gesamten Fluggastaufkommens ab. Für die Passagiere an den übrigen Flughäfen wird angenommen, dass deren Mobilfunkverkehrsaufkommen bereits ausreichend durch die flächenabdeckenden Mobilfunkeinrichtungen bedient wird. Das Equipment an den 6 größten Flughäfen wird gemäß dem Fluggastaufkommen in der Spitzenlastzeit dimensioniert, das sich wie folgt zusammensetzt. Es gilt die Annahme, dass bei einer Durchschnittsbetrachtung jeder Passagier von einer Person begleitet wird und dass beide sich bereits eine Stunde vor Abflug am Flughafen befinden. Mit der letztgenannten Annahme überlappt sich der Verkehr der Passagiere und deren Begleitpersonen mit dem Verkehr von den Personen, die bereits in der Stunde davor abfliegen, was bei der Erfassung des Verkehrs berücksichtigt wird. Die Überlegungen zum Verkehrsaufkommen bzw. der daraus hervorgehende Gesamtverkehr in der Busy Hour der Flughäfen bilden die Grundlage für die Dimensionierung der entsprechenden Netzeinrichtungen. Flughäfen werden als separate Gebiete (vergleichbar mit den im Regelfall angewandten Siedlungsgebieten) in das Modell eingespeist. Sie liegen ebenfalls als geografische Information vor.

Tabelle 2-1: Flughäfen mit zusätzlicher Mobilfunkzellenabdeckung

Wien
Salzburg
Innsbruck
Graz
Linz
Klagenfurt

Neben Flughäfen werden auch die passagierstärksten Bahnhöfe mit zusätzlichem Mobilfunk-Equipment ausgestattet, weil auch hier ein besonders hohes Passagieraufkommen bzw. dichte Nachfrage vorliegt. Analog zu den Flughäfen wird auf die Bahnhöfe mit den höchsten Passagieraufkommen abgestellt; hier nehmen wir an, dass die 17 größten Bahnhöfe einzubeziehen sind (siehe Tabelle 2-2) und bei den dann folgenden Bahnhöfen angenommen werden darf, dass das Mobilfunkverkehrsaufkommen der Passagiere dort bereits ausreichend durch die flächenabdeckenden Mobilfunkeinrichtungen abgedeckt wird. Anders als bei Flughäfen wird angenommen, dass Bahnreisende nicht von einer Person begleitet werden und auch, dass sie sich nicht bereits eine Stunde vor Abfahrt am Bahnhof einfinden. Diese Festlegung lässt sich damit begründen, dass es sich bei den meisten Passagieren um Pendler handelt und damit um einen Typ von Reisenden, der sich von dem der Fluggäste signifikant unterscheidet. Die Netzelemente werden unter Rückgriff auf die Zahl der ein- und aussteigenden Passagiere als auch auf Transitreisende bzw. deren Verkehrsnachfrage ausgestaltet.

Tabelle 2-2: Bahnhöfe mit zusätzlicher Mobilfunkzellenabdeckung

Wien Meidling	Salzburg Hbf
Wien Westbahnhof	Graz Hbf
Wien Mitte	Wien Südbahnhof
Wien Floridsdorf	St. Pölten
Linz Hbf	Klagenfurt Hbf
Innsbruck Hbf	Leoben Hbf
Wien Handelskai	Bruck an der Mur
Wien Praterstern	Wörgl
Wiener Neustadt	

Die Ausbreitungseigenschaften von Funkfrequenzen hängen unter anderem von der topologischen Oberfläche der zu versorgenden Gebiete ab, insbesondere der Höhenunterschiede zwischen ihnen. Flache Ebenen beeinflussen die Reichweite von Funkmasten am wenigsten, hügelige bis bergige Gebiete dagegen vergleichsweise stark. In der

Modellogik werden topologische Eigenschaften von Gebieten und deren Konsequenz für den Strahlungsradius der Mobilfunkstationen berücksichtigt. Der Rückgriff auf ein so genanntes Höhenmodell, bei dem es sich um einen geografischen Daten-Layer mit Höheninformationen handelt, erlaubt die Eigenschaften der Erdoberfläche in die Modellumgebung einzubeziehen. Die Höheninformationen liegen als Raster vor. Eine entsprechende Aufbereitung der topologischen Geodaten durch ein GIS Tool erlaubt es, die Steigungen zwischen angrenzenden Rastern zu ermitteln. Die Höhenunterschiede zwischen angrenzenden Rastern werden schließlich für die Bestimmung der Funkausbreitungseigenschaften herangezogen, die individuell für jedes Siedlungsgebiet berechnet werden. Das Modell unterscheidet drei Klassen von Steigungen. Die Einteilung im Modell erfolgt nach „flach“, „hügelig“ und „bergig“, wobei jedes Raster je nach Grad der Steigung einer von diesen drei Kategorien zugeteilt wird. Tabelle 2-3 zeigt typische Werte von Höhenunterschieden für die genannten Einordnungen.

Tabelle 2-3: Topologische Klassen entsprechend Steigungskriterien

Topologische Klasse	Höhenunterschied (in %)
Flach	< 2,5
Hügelig	2,5 – 7,5
Bergig	> 7,5

2.3 Bestimmung der Nachfrage und ihrer räumlichen Verteilung

Die Verkehrs-Nachfrage, für die das Netz zu modellieren ist, ergibt sich aus der Nachfrage eines repräsentativen Mobilfunknutzers während der Hauptverkehrsstunden, die mit der Anzahl dieser repräsentativen Nutzer multipliziert wird.² Es gilt somit die Nachfrage, in Form von Privatpersonen, arbeitenden Personen und Touristen in ihrer räumlichen Verteilung zu erfassen. Diese Aufgabe wird im Modell durch ein den Netzplanungsmodulen vorgeschaltetes Modul erfüllt. Die Aufgabe besteht darin, die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Daten und Informationen so aufzubereiten, dass sie für die Netzplanungsmodule die erforderlichen Informationen über die Nachfrage in der richtigen Form zur Verfügung stellen. Konkret heißt dies, dass das Gebiet Österreichs in Distrikte aufgeteilt werden muss, die für sich jeweils relativ homogen sind, so dass für sie jeweils eine Versorgung mit den passenden Zellen und Basisstationen vorgenommen werden kann. Jeder dieser Distrikte wird dann weiter in Untergebiete unterteilt, wobei das Modell drei Typen von Untergebieten vorsieht, nämlich städtisch, vorstädtisch und ländlich. Ein Distrikt kann aus einem einzigen solcher Gebiete bestehen, z.B. aus einem reinen ländlichen Gebiet, aber auch aus mehreren, bis zu drei Untergebiete-

² Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, wird die Nachfrage pro individuellen Nutzer modellintern aus den im österreichischen Markt vorhandenen gesamten Verkehrsmengen ermittelt.

ten, z.B. einer kleineren Stadt mit einem städtische Untergebiet im Zentrum, einem vorstädtischen Ring und einem ländlichen Außenrand.

Der Ausgangspunkt ist eine Datei, in der alle Siedlungsgebiete mit den ihnen zugeordneten Informationen – wie in Abschnitt 2.2 beschrieben – abgebildet sind. Die einzelnen Gebiete sind dabei nach Dichte der Einwohnerzahl geordnet und nach Schwellenkriterien, die durch Parameterwerte vorgegeben werden, in städtisch, vorstädtisch und ländlich eingeteilt. Aus den Siedlungsgebieten werden die Distrikte gebildet, indem - wie unten beschrieben – zu nach Einwohnern dichten Gebieten die umliegenden Gebiete entsprechend einem Entfernungskriterium zugeordnet werden.

Dieser Aggregationsprozess funktioniert wie folgt:

- Die Liste der Siedlungsgebiete wird nach Personendichte, d.h. entsprechend dem Verhältnis der sich zum relevanten Zeitpunkt in ihnen befindlichen Personen relativ zur Fläche, geordnet.
- Der Algorithmus beginnt mit dem Siedlungsgebiet mit der höchsten Personendichte; in der Folge fährt er jeweils fort mit dem Gebiet, das dann die höchste Dichte unter den verbleibenden Gebieten aufweist.
- Die so identifizierten Siedlungsgebiete aggregieren in der Nachbarschaft befindliche Siedlungsgebiete, die innerhalb einer als Parameterwert vorgegebenen Entfernung von ihnen entfernt liegen. Dabei werden jeweils die Entfernungen zwischen den Mittelpunkten der Gebiete zugrunde gelegt.
- Die Entfernungsschwellenwerte differieren danach, ob die aggregierenden Siedlungsgebiete als städtisch, vorstädtisch oder ländlich eingeordnet sind. Der Schwellenwert für städtische Gebiete ist geringer als der für vorstädtische, und dieser ist geringer als der für ländliche. Der Grund ist, dass die resultierenden Distrikte kleiner sein sollen, wenn die Personendichte in ihnen relativ hoch ist, und umgekehrt, wenn die Dichte relativ gering ist, weil in Abhängigkeit von der Personendichte und der damit einhergehenden Nachfrage die Radiozellen kleiner oder größer sind, aber die Zellencluster in Bezug auf ihre Anzahl möglichst homogen sein sollen.

Indem aus den relativ kleinen Siedlungsgebieten auf diese Art und Weise Distrikte mit ihren zugehörigen Untergebieten für die Versorgung mit Radiozellen gebildet werden, wird sichergestellt, dass diese Distrikte in sich homogen sind.

Abbildung 2-5 zeigt das Flussdiagramm für diesen Algorithmus. In Tabelle 2-4 werden typische Werte für die relevanten Parameter aufgezeigt.

Abbildung 2-5: Flussdiagramm für den Prozess der Aggregation von Siedlungsgebieten zu Distrikten

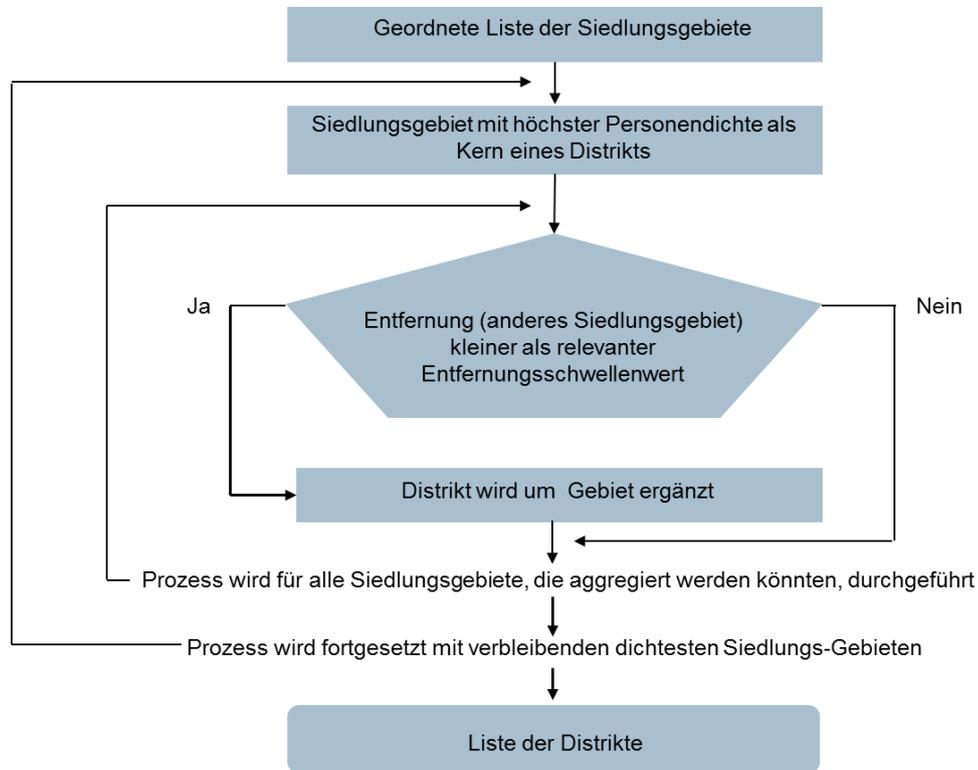


Tabelle 2-4: Typische Werte der Parameter für die Bildung der Distrikte

Parameter	Städtisch	Vorstädtisch	Ländlich
Personendichte (per km ²) für Einordnung in städtisch, vorstädtisch und ländlich	1000	500	>0
Entfernung zwischen den Mittelpunkten der relevanten Raster-Gebiete (km)	5	8	10

Der Algorithmus beginnt mit dem Siedlungsgebiet mit der höchsten Personendichte, und wiederholt den Prozess solange Siedlungsgebiete übrig bleiben, die Nachbargebiete mit niedrigeren Personendichten aufweisen. Wenn ein Gebiet aggregiert worden ist, wird es markiert und somit gekennzeichnet als ein Gebiet, das für eine Aggregation zu anderen Gebieten nicht mehr zur Verfügung steht. Nach jedem Aggregationsschritt wird der daraus resultierende Distrikt in der Distriktliste mit all seinen Detailinformationen abgespeichert. Distrikte können aus Untergebieten mit unterschiedlichen Zuordnungen bestehen (städtisch, vorstädtisch, ländlich), was bei der Versorgung mit Zellen und Basisstationen auch dementsprechend in Betracht gezogen wird. Ein Distrikt kann auch

aus einem einzigen Siedlungsgebiet bestehen. Dies kann dann der Fall sein, wenn der Mittelpunkt eines Gebietes hinreichend weit von dem Mittelpunkt eines sonst dieses Gebiet aggregierenden Siedlungsgebietes liegt. Solche relativ großen, typischerweise ländlichen, Siedlungsgebiete werden dann selbständige Distrikte.

Die obige Darstellung zielt auf die Ableitung der Nachfrage lokaler Nutzer des Netzes. Zusätzlich in Betracht zu ziehen sind jedoch roamende Nutzer. Allgemein gilt, dass roamende Nutzer Teilnehmer eines Netzes sind, die vorübergehend ein anderes Netz als das eigene nutzen. Jedes Netz hat Teilnehmer, die es so zeitweise verliert, aber auch Teilnehmer anderer Netze, die es so zeitweise gewinnt. Ein Ansatz für die Modellierung wäre, Roamer nicht explizit zu behandeln basierend auf der Annahme, dass sich in jedem Netz die zeitweise verlorenen und gewonnenen Teilnehmer gegenseitig ausgleichen. Falls jedoch dies nicht vertreten werden kann, muss auf der Basis entsprechender Informationen eine Anpassung der Nachfrage erfolgen.

Vorausblickend auf die Zellenplanung ist es Teil der Aufgaben dieses Moduls, die Verteilung der Nachfrage auf Einrichtungen der verschiedenen Radio-Zugangstechnologien festzulegen. So kann eine bestimmte Nachfrage zu unterschiedlichen Anteilen über GSM, UMTS, HSPA oder LTE realisiert werden. Diese Festlegung geschieht auf der Basis von Parametern, die vom Modellnutzer vorzugeben sind. Abschnitt 2.5 beschreibt im Einzelnen, welche Technologieoptionen zur Verfügung stehen und wie bei dieser Festlegung vorgegangen wird.

2.4 Beschreibung der Dienste-Kategorien

Die Dienste in den gegenwärtigen Mobilfunknetzen können auf zwei Ebenen beschrieben werden. Auf der oberen Ebene werden Dienste als Anwendungen durch die Nutzer betrachtet, die unter mehreren Dienste-Kategorien zusammengefasst werden können. Auf der unteren Ebene werden sie in physischen Kategorien definiert, von denen die für die Dimensionierung des Netzes benötigten Parameter abgeleitet werden. Dieses Referenzdokument beschränkt sich auf die Beschreibung entsprechend der oberen Ebene.

Die Dienste-Beschreibung basiert auf Studien des UMTS-Forums³, deren letzte Studie von 2011 auch diejenigen Dienste, die inzwischen über LTE ermöglicht werden, mit aufgenommen hat. Tabelle 2-5 zeigt einen Überblick über diese Dienste und ihre Merkmale.

³ Siehe UMTS Forum (2003, 2011).

Tabelle 2-5: Beschreibung der Dienste-Kategorien in der UMTS Forum-Studie

Kategorie	Beschreibung des Dienstes (Originaltext aus der Studie)	Marktsegment
Mobile Intranet/Extranet Access	A business 3G/4G service that provides secure mobile access to corporate Local Area Networks (LANs), Virtual Private Networks (VPNs), and the Internet. In an LTE environment, there is an increased potential for P2P file transfer, application sharing, M2M communication and access to mobile intranets and extranets.	Business
Customised Infotainment	A consumer 3G/4G service that provides device-independent access to personalised content anywhere, anytime via structured-access mechanisms based on mobile portals. It includes games, television, video on demand and music. Device development and the faster speeds of LTE make possible an enhanced entertainment-based content experience.	Consumer
Multimedia Messaging Service (MMS)	A consumer or business 3G/4G service that offers non-real-time, multimedia messaging with always-on capabilities allowing the provision of instant messaging. Targeted at closed user groups that can be services provider- or user-defined. MMS also includes machine-to-machine telemetry services. In an LTE environment this moves towards photo and video messages.	Consumer
Mobile Internet Access	A 3G/4G service that offers mobile access to full fixed ISP services with near-wireline transmission quality and functionality. It includes full Web access to the Internet as well as file transfer, email, and streaming video/audio capability. In an LTE environment, usage is likely to be closer to the PC experience, with super-fast browsing speeds and greater interaction with social networking.	Consumer
Simple Voice and Rich Voice	A 3G/4G service that is real-time and two-way. Simple Voice provides traditional voice services including mobile voice features (such as operator services, directory assistance and roaming). Rich Voice provides advanced voice capabilities (such as voice over IP (VoIP), voice-activated net access, and Web-initiated voice calls, and mobile videophone and voice enriched with multimedia communications. With LTE this will move towards VoLTE and high quality video conferencing.	Consumer and Business

Das UMTS Forum weist für jede dieser Dienste-Kategorien die Werte für folgende Merkmale aus:

- Anzahl der Sessions je Monat und Dienst,
- Anteile nach Ursprung und Ziel: On-Net, Off-Net outgoing, Off-Net incoming,
- Verhältnis von Uplink zu Downlink,
- Größe in Kilobytes des File von sowohl Uplink wie Downlink,
- Anteil am Verkehr während der Hauptverkehrszeit.

Das Modell betrachtet die vom UMTS-Forum ermittelten Dienste-Kategorien als Ausgangspunkt, nimmt jedoch einige Anpassungen vor, so dass die Definitionen mit gegenwärtigen Anwendungen kompatibel sind und ein Mapping auf Verkehrsklassen mit entsprechender QoS erleichtert wird. Tabelle 2-6 weist die sich ergebenden möglichen Dienste-Kategorien aus. Hervorzuheben ist, dass diese Dienste-Kategorien jeweils verschiedene einzelne Dienste zusammenfassen.

Tabelle 2-6: Die im Modell verwendeten Dienste-Kategorien

Dienste-Kategorie	Beschreibung
Sprache (leitungs-vermittelt)	Zweiwegekommunikation zwischen zwei Personen über eine Verbindung mit fest vorgegebener Kapazität.
Other Real Time	Aggregierter Verkehr von anderen Echtzeitdiensten wie Rich Voice, Video-Telefonie, Multimedia, Real Time Gaming.
Voice over LTE (VoLTE, paket-vermittelt)	Zweiwegekommunikation zwischen zwei Personen über eine virtuelle Verbindung.
Streaming	Video Streaming, typischerweise von Servern in anderen Netzen
Business Data	Daten-Kommunikation mit hohen QoS-Anforderungen bezüglich Delay, Jitter und PER, wie VPN, Intranet-Verbindungen zwischen mobilen Nutzern oder mobilen Endgeräten wie Maschine-Maschine-Kommunikation.
Best Effort Mobile	Daten-Kommunikation mit niedrigen QoS-Anforderungen, Zugang zu Diensten über mobile Portale und externe Dienste wie Web Services, Shopping, E-Mail,
SMS, MMS	Short Message Service und Multimedia Message Service.
Mobiler Breitband-Zugang	Multimedia- und Datenkommunikation mit großen Bandbreiten

Tabelle 2-7 zeigt für illustrative Zwecke plausible Werte für diese Merkmale. Zu erwähnen ist, dass diese Dienste-Kategorien für UMTS definiert sind und einige von ihnen von den anderen Technologien nicht dargestellt werden können, was in der letzten Spalte von vermerkt ist. Ferner ist zu erwähnen, dass die illustrativen Bandbreitenanforderungen für die Ebene des Application Layer gelten. Die konkret im Modell einzustellenden Bandbreitenanforderungen sind in der Befragung der Betreiber zu den Modellparametern zu erfragen.

Tabelle 2-7: Beispielhafte Werte für die Merkmale der betrachteten Dienste-Kategorien*

Dienste-Kategorien	Bitrate uplink (kbps)	Bitrate downlink (kbps)	mLu (Bytes)	mLd (Bytes)	Dauer (Min)	Anteile der Verbindungen nach Ursprung und Ziel					QoS- Klasse	Nicht verfügbar für
						On-Net	Off-net out	Off-net in	To ICIP	To other server		
Sprache	12,65	12,65	25	25	3	0,4	0,3	0,3	0	0	1	HSPA LTE
Other Real Time (hier als Beispiel Video-Telefonie)	64	64	240	240	5	1	0	0	0	0	1	GSM
VoLTE	12,65	12,65	35	35	3	0,4	0,3	0,3	0	0	1	GSM-UMTS- HSPA
Streaming	4,8	64	30	256	5	0	0	0	0,7	0,3	2	
Guaranteed Data	20	80	30	256	1	0,1	0	0	0,7	0,2	3	
Best Effort*	20	80	30	256	3	0,1	0	0	0,6	0,3	4	
SMS	9,6	9,6	100		0,001	0	0	0	0	1	4	
MMS	40	40	1000		0,002	0	0	0	0	1	4	
Mobiler Breitband-Zugang über HSPA	30	270	200	1150	5	0	0	0	0,4	0,6	4	GSM, UMTS
Mobiler Breitband-Zugang über LTE	500	1000	200	1150	5	0	0	0	0,4	0,6	4	GSM, UMTS

* Hier sind die Best Effort-Dienste der Tabelle 2-6 zu einer einzigen Dienste-Kategorie zusammengefasst. Unter Best Effort werden auch Machine to Machine Dienste mit erfasst.

Die in Tabelle 2-7 ausgewiesenen Dienste stellen die mögliche Auswahl an Diensten dar. Es können auch weniger Dienste berücksichtigt werden. Entsprechend den von den Betreibern zur Verfügung gestellten Informationen sind die folgenden Dienste-Gruppen implementiert: klassischer Sprachdienst, Voice over LTE sowie die Datendienste Video-Telefonie, Best Effort, SMS, MMS und Mobiler Breitband-Zugang über HSPA und Mobiler Breitband-Zugang über LTE. Video-Telefonie wird wie ein Datendienst betrachtet, da sie vergleichbare Anforderungen an die Qualität stellt.

2.5 Technologie-Mix

Das Modell sieht für das Radio-Zugangsnetz den Einsatz von vier Technologien vor:

- GSM/EDGE (d.h. GSM mit EDGE-Fähigkeiten),
- UMTS,
- UMTS/HSPA (d.h. UMTS mit HSPA-Fähigkeiten) und
- LTE.

Oben weisen wir UMTS und UMTS/HSPA als zwei getrennte Technologien aus, was den technischen Gegebenheiten entspricht. Dabei gilt allerdings, dass für Nachfrage, die über native UMTS, sowie für Nachfrage, die über UMTS/HSPA abgewickelt werden soll, das Modell bei der Zellenplanung wohl die Basisstationen der jeweiligen Technologie bestimmt, jedoch für beide Fälle stets UMTS/HSPA-Basisstationen installiert, da dies nach den Einlassungen der Betreiber in den gegenwärtigen Netzen so auch realisiert wird. Um der Netzstruktur der existierenden Netze Rechnung zu tragen, kann das modellierte Netz flächendeckend auch mit GSM/EDGE ausgerüstet werden. Von der expliziten Modellierung von GSM/GPRS wird abgesehen, da davon ausgegangen werden kann, dass die auf GPRS basierenden Dienste (z.B. Machine to Machine) inzwischen effizienter mit nach unten kompatibler GSM/EDGE Ausrüstung bereitgestellt werden können. Alle Technologien können differenziert in städtischen, vorstädtischen und ländlichen Gebieten eingesetzt werden. Es ist jedoch zu erwarten, dass diese Differenzierungsmöglichkeit in erster Linie für UMTS/HSPA und LTE relevant sein wird.

Netze mit folgenden Technologien bzw. hybriden Technologie-Kombinationen können im Modell abgebildet werden:

- Nur GSM/EDGE,
- Nur UMTS/HSPA,
- Nur LTE,
- UMTS plus GSM/EDGE,
- UMTS/HSPA plus GSM/EDGE,

- LTE plus GSM/EDGE,
- LTE plus UMTS/HSPA und
- LTE plus UMTS/HSPA plus GSM/EDGE.

In Bezug auf obige Aufzählung der Technologiekombinationen verweisen wir auf die im vorangegangenen Absatz gemachte Bemerkung, dass (native) UMTS Equipment, das entsprechend der Nachfrage eingesetzt würde, immer in Form von UMTS/HSPA Equipment realisiert wird.

Bei der Modellierung von hybriden Netzen wird es Distrikte geben, die Zellen sowohl von der einen wie der anderen Technologie aufweisen. Dabei wird ein Teil dieser Zellen Standorte gemeinsam nutzen, was heißt, dass Trägereinrichtungen mit den Radioeinrichtungen von mehr als einer Technologie versehen sind. Zellen mit nur einer Technologie sind dann Zellen mit der überwiegenden Technologie, d.h. der Technologie, mit der in dem Distrikt mehr Zellen versorgt werden als mit anderen.

Die Abdeckung der verschiedenen Gebietstypen mit den verschiedenen Arten von hybriden Netzen wird über Schwellenwerte der Personendichte in den einzelnen Gebieten gesteuert. Tabelle 2-8 zeigt zwei Optionsmöglichkeiten.

Tabelle 2-8: Beispiele von Schwellenwerten für die Bestimmung von hybriden Netzen

Option	Technologie-Mix	Städtisch	Vorstädtisch	Ländlich	Kommentar
		Personendichte: ² Anzahl Personen/km			
1	GSM/EDGE oder UMTS/HSPA	>0	>0	>100	Bis zur welchen Dichte nur GSM/EDGE, darüber nur UMTS/HSPA
	Mit LTE	> 0	> 0	>200	Ab welcher Dichte LTE
2	GSM/EDGE oder GSM/EDGE/UMTS/HSPA	>0	>0	> 100	Bis zur welchen Dichte nur GSM/EDGE, darüber GSM/EDGE/UMTS/HSPA
	Mit LTE	> 0	> 0	>200	Ab welcher Dichte LTE

Die Zellen der Zusatzversorgung entlang Autobahnen, Schnellstraßen und Haupteisenbahnstrecken werden mit GSM oder UMTS bzw. UMTS/HSPA ausgerüstet.

2.6 Verfügbarkeit und Nutzung von Frequenzen

Das Modell ermöglicht einen flexiblen Einsatz der verschiedenen für Mobilfunk verwendbaren Bänder des Frequenzspektrums. Die im Modell für die verschiedenen Technologien einsetzbaren Bänder sind:

- GSM/EDGE: 900 und 1800 MHz-Bänder,
- UMTS/HSPA: 800, 900, 1800, 2100 und 2600 MHz Bänder,
- LTE: 800, 900, 1800, 2100 und 2600 MHz Bänder.

Dabei können auch an einem Standort verschiedene Technologien, z.B. GSM/EDGE und UMTS/HSPA, im gleichen Frequenzband eingesetzt werden.

Das Referenz-Netz wird mit einer Standard-Frequenzausstattung zu versehen sein. Diese Standardausstattung soll der realen Situation der Betreiber in Österreich möglichst genau entsprechen. Dazu wird von der RTR bzw. der TKK eine regulatorische Entscheidung zu treffen sein.

3 Modellierung des Netzes

Aus Abbildung 2-2 in Abschnitt 2.1 geht hervor, dass das Mobilfunknetz aus mehreren Teilen besteht, den Radiozugangsnetzen, dem Core-Netz und den dazwischen liegenden Zugangsnetzen. Diese Netzteile setzen sich jeweils aus Funktionen ausübende Knoten und den Verbindungen zwischen diesen zusammen. Für die Beschreibung erweist es sich als nützlich, diese Aufteilung zu erweitern, indem wir unterteilen in

- (1) das aus den Zellen bestehende Radiozugangsnetz,
- (2) im Fall von GSM- und UMTS-Netzen, das Aggregationsnetz, das die Zellen mit den Controllern verbindet, einschließlich der Controller,
- (3) Im Fall von GSM- und UMTS-Netzen, das Backhaul-Netz, das die Controller mit den Einrichtungen des Core-Netzes verbindet,
- (4) im Fall eines LTE-Netzes, das Transportnetz anstelle von Aggregations- und Backhaul-Netz, und
- (5) Core-Netz mit seinen Einrichtungen und den Verbindungen der entsprechenden Standorte untereinander.

Die Themen, die für die oben angeführten Netzteile individuell zu behandeln sind, sind wie folgt:

- Netzdesign,
- Dimensionierung und
- Systemzuweisung.

Daneben bestimmen sich die behandelten Themen danach, ob die betrachteten Netzteile Funktionen in der Verkehrsführung ausüben oder Verbindungen zwischen diesen Einrichtungen herstellen. Ein gesonderter Abschnitt wird dem alle Netzteile betreffenden Thema der Redundanz und QoS gewidmet.

3.1 Radiozugangsnetz

Die Planung des Radiozugangsnetzes ist der erste und grundlegendste Schritt in der Planung eines Mobilfunknetzes. Sie basiert auf der geografischen Verteilung der Nachfrage, den verschiedenen vom Betreiber implementierten Diensten, der eingesetzten Technologie und dem zur Verfügung stehenden Frequenzspektrum. Die Planung der Zellen, aus denen das Radiozugangsnetz besteht, beinhaltet die Bestimmung der Anzahl der Zellen und damit der Anzahl der Basisstationen mit ihren spezifischen Einrichtungen, die in der Lage sind, die Nachfrage für die vom Betreiber angebotenen Dienste zu bedienen, sowie deren Verteilung über die vorher bestimmten Distrikte und deren

Untergebiete. Das hier beschriebene Modul zur Zellenplanung stützt sich zu diesem Zweck auf Daten, die bei der Bestimmung der Distrikte aufbereitet worden sind. Sie beinhalten neben den distriktspezifischen geographischen Informationen, die Verteilung der Nutzer innerhalb der Distrikte und die sich daraus ergebende Nachfrage.

Im Folgenden wird für jede in Frage kommende Technologie (GSM, UMTS, UMTS/HSPA und LTE) die Vorgehensweise bei der Zellenplanung beschrieben. Die Zellenplanung bestimmt jeweils für ein Untergebiet eines Distrikts den Typ der Zelle sowie den entsprechenden Typ der Basisstation und deren Anzahl in dem Gebiet. Als Standorte innerhalb des Gebiets wird eine symmetrische Verteilung der Basisstationen angenommen. Der Begriff "Basisstation" wird sowohl für Base Transceiver Stations (BTS) in Netzen mit GSM wie für NodesB bzw. eNodesB in Netzen mit UMTS bzw. LTE verwandt.

Wie erwähnt wird die Zellenplanung jeweils individuell für ein Untergebiet eines Distriktes durchgeführt. Dazu steht für jede der eingesetzten Technologien ein Algorithmus zur Verfügung, der in der Lage ist, anhand der Charakteristika des gegebenen Gebietes, der darin bestehenden Nachfrage und der technischen Parameter Größe und Anzahl der Zellen zu bestimmen.⁴

3.1.1 Die Systeme des Radiozugangsnetzes

Beim Radiozugangsnetz werden anders als bei den darüber liegenden Netzteilen das Netzdesign, die Dimensionierung und die Systemzuweisung in einem Zug durchgeführt. Dies liegt darin begründet, dass hier das Netzdesign – konkreter: die Planung der Größe der Zellen in den verschiedenen Distrikten – nur durchgeführt werden kann, wenn in den entsprechenden Berechnungen die Kapazitäten der zur Verfügung stehenden Basisstationen einbezogen werden, was dann auch bedeutet, dass diese Systeme den Zellen direkt zugeordnet werden.

Hier weisen wir die Zelltypen und die in diesen Zellen zum Einsatz kommenden Typen von Basisstationen aus. Bei GSM-Netzen sind dies:

- Makro-Zellen mit bis zu drei Sektoren, wobei jeder Sektor bis zu zwei TRX haben kann,
- Mikro-Zellen mit drei Sektoren, wobei jeder Sektor bis zu drei TRX haben kann, und
- Pico-Zellen mit drei Sektoren, wobei jeder Sektor bis zu drei TRX haben kann.

⁴ In den nachfolgenden Abschnitten wird die Modell-Methodik verbal beschrieben, eine detailliertere Beschreibung auf der Basis der entsprechenden mathematischen Modelle findet sich in Sanchez-García (2011).

Bei Netzen mit UMTS bzw. LTE kommen folgende Typen von Basisstationen zum Einsatz:

- Makro-Zellen mit einem Sektor, zwei Sektoren oder drei Sektoren,
- Mikro-Zellen mit einem Sektor, zwei Sektoren oder drei Sektoren und
- Pico-Zellen mit einem Sektor, zwei Sektoren oder drei Sektoren.

Streng genommen ist bei Zellen mit mehreren Sektoren jeder Sektor eine Zelle für sich, da jedem Sektor sein eigenes Spektrum zugewiesen wird. Wir folgen hier jedoch der Konvention, eine Zelle mit einem Standort einer Basisstation gleichzusetzen, und ggf. von mehrsektorischen Zellen bzw. mehrsektorischen Basisstationen auszugehen, so dass die (im strengen Sinne) unterschiedlichen Zellen an einem Standort als Sektoren bezeichnet werden und nicht als eigenständige Zellen.

Makro-Zellen/Basisstationen kommen für ländliche und vorstädtische Gebiete, Mikro-Zellen/Basisstationen für vorstädtische und innerstädtische Gebiete und Pico-Zellen/Basisstationen für innerstädtische Gebiete in Frage. Außerdem werden Makro-Zellen/Basisstationen mit zwei Sektoren auch für Zellen entlang den Autobahnen und den Eisenbahnstrecken eingesetzt.

Die Parameter, die den Typ der Basisstation bestimmen, und sowohl für BTS wie für NodesB gelten, sind wie folgt:

- Sendeleistung,
- Transceiver-Antennengewinn,
- Anzahl der Sektoren,
- Empfangsempfindlichkeit und Rauscheigenschaften,
- Parameter, die die BTS entweder als geeignet für eine Makro-, Mikro- oder Picozelle ausweisen,
- Investitionsbetrag für den Standort und
- Investitionsbetrag für die Radioausrüstung.

Bei einer BTS kommen zusätzlich hinzu:

- Anzahl der TRX,
- Mittlere Anzahl der Signalpakete,
- Anzahl der Slots, die für Handover reserviert sind,

und für NodesB und eNodesB:

- Maximale tolerierte Interferenz.

Bei der Zellenplanung wird für jedes Gebiet jeweils auf der Basis aller in Frage kommenden Typen von Basisstationen eine optimale Ausstattung berechnet. Diejenige, die die geringsten Investitionen erfordert, wird ausgewählt. Aus diesem Grund erscheinen bereits zum Zeitpunkt der Zellenplanung die Informationen zu den Investitionsbeträgen in der Liste der Parameter für die Basisstationen.

3.1.2 Die Bedeutung von Uplink- und Downlink-Verkehr bei der Zellenplanung

In den folgenden Abschnitten wird die Zellenplanung jeweils unter den Bedingungen der zur Verfügung stehenden Technologien (2G GSM, 3G UMTS/HSPA und 4G LTE) beschrieben. Die Fragestellung ist jedes Mal wie groß die zu bestimmende Zelle in dem gegebenen Gebiet unter den Bedingungen dieser Technologien und den Bedingungen der Nachfrage zu sein hat. Wie in jedem dieser Abschnitte deutlich gemacht wird, wird dabei jedes Mal abgewogen, ob die Zellengröße entsprechend den Wellenausbreitungseigenschaften oder entsprechend der verfügbaren Spektrums-Kapazität zu bestimmen ist. Das zuerst genannte Kriterium kommt bei geringer Nachfrage zum Tragen, wenn die noch akzeptable Signalstärke (bestimmt durch die Wellenausbreitungseigenschaften) am Rande der Zelle maßgeblich ist, das zweite bei starker Nachfrage, wenn der Umfang des Spektrums in dem Gebiet restringierend ist. Bei jeder dieser beiden Abwägungen, wellenausbreitungsgetrieben oder verkehrsgetrieben, gibt es zwei Verkehrsströme die restringierend sein können, den Uplink-Verkehr vom Endgerät zur Basisstation und den Downlink-Verkehr von der Basisstation zum Endgerät.

Wenn eine Zelle wellenausbreitungsgetrieben bestimmt wird, also die Signalstärke am Rande der Zelle maßgeblich ist, geht die Wirkung vom Uplink-Verkehrsstrom vom Endgerät zur Basisstation aus, da dieser Uplink-Verkehr durch die Signalstärke des Endgeräts getragen werden muss, die geringer ist als die der Basisstation und deshalb restringierend wirkt. Wenn umgekehrt eine Zelle verkehrsgetrieben bestimmt wird, also das Volumen der Nachfrage relativ zum verfügbaren Spektrum maßgeblich ist, geht die Wirkung vom Downlink-Verkehrsstrom aus, der in der Regel bis zu zehnmal größer ist als der Uplink-Verkehr und deshalb restringierend wirkt.

Diese hier geschilderten durch die Uplink- und Downlink-Verkehrsströme verursachten restringierenden Wirkungen gelten jeweils unabhängig von der eingesetzten Technologie. Deshalb werden diese hier gemachten Ausführungen den Abschnitten über die Zellenplanung aufgrund der verschiedenen Technologien vorangestellt.

3.1.3 Zellenplanung für 2G GSM

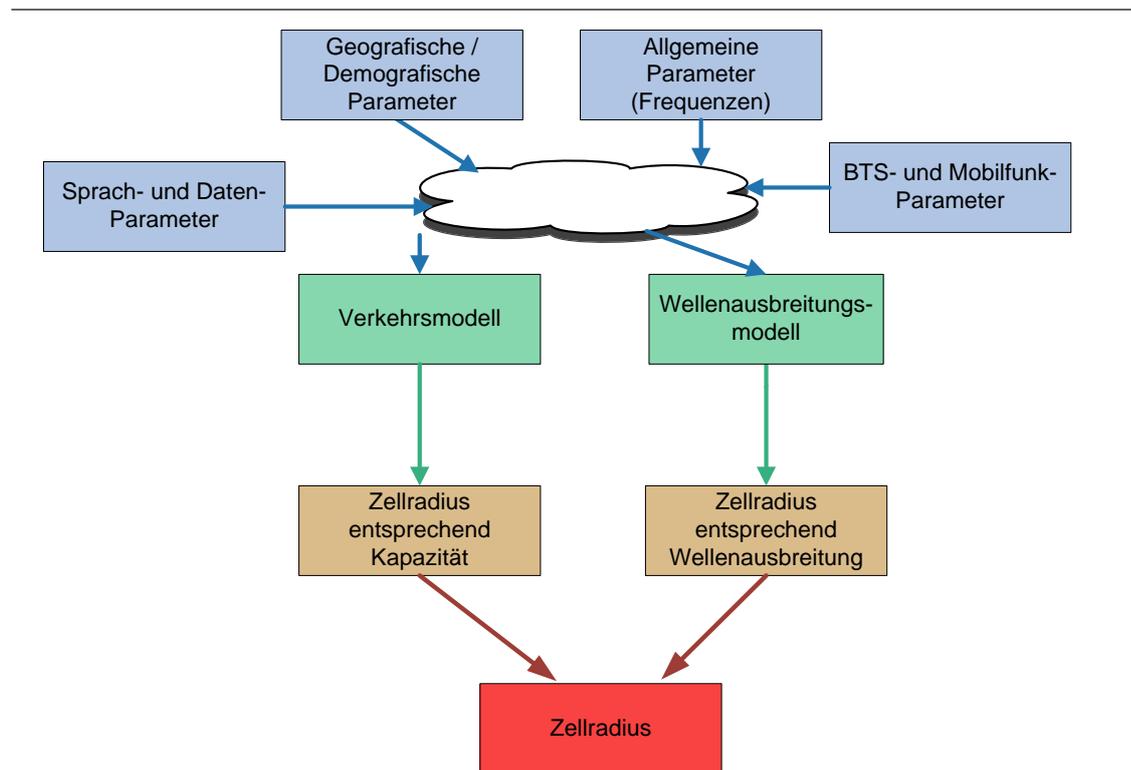
Die Aufgabe besteht darin, den Radius einer Zelle zu berechnen, daraus die Fläche einer Zelle, sowie die Anzahl der Zellen, die zur Bedienung des gegebenen Gebiets erforderlich ist. Als mögliche Frequenzbänder werden die Bänder in den Bereichen von 900 MHz und 1800 MHz zugrunde gelegt.

Auf der Basis der Werte für die im vorangegangenen Abschnitt genannten Parameter sowie der Charakteristika des Gebietes ermittelt der zuständige Algorithmus den Zellenradius. Die Berechnung erfolgt dabei getrennt nach den Eigenschaften der Wellenausbreitung des eingesetzten Spektrums und nach dem Verkehrsvolumen, da in GSM das Verkehrsvolumen die Ausbreitungseigenschaften nicht beeinflusst (im Gegensatz zur Berechnung des Zellenradius in UMTS, wie in den nächsten Abschnitten beschrieben wird). Zunächst bestimmt der Algorithmus den Radius entsprechend den Eigenschaften der Wellenausbreitung. Dieser Radius ist der größte, der durch die Zelle bei dem eingesetzten Spektrum abgedeckt werden kann, da jenseits dieses Radius die Eigenschaften der Wellenausbreitung einen mobilen Funkverkehr mit akzeptabler Qualität nicht mehr zuließen. Anschließend wird die Zellengröße entsprechend des Volumens des zu bedienenden Verkehrs ermittelt. Hier wird die Größe der Zellen bestimmt durch die Anzahl der Kanäle, die der anfallende Verkehr braucht, um befriedigt zu werden. Wenn bei einem einzigen Sektor die durch das zur Verfügung gestellte Spektrum ermöglichten Kanäle nicht ausreichen, kann durch Sektorisierung an einem Standort die Anzahl der Zellen und damit die Kapazität vergrößert werden. Dabei ist die Anzahl der möglichen Sektoren und die Anzahl der TRX pro Sektor begrenzt: Im Modell wird von maximal drei Sektoren und drei TRX pro Sektor ausgegangen, wobei die Anzahl der Sektoren und der TRX pro Sektor durch Parameterwerte pro Zellen-Typ einzustellen ist. Damit bestimmt sich die Kapazität eines Zellenstandortes aus dem Produkt der Sektoren und der TRX pro Sektor.

Bei der Zellenplanung ergibt sich dann, dass je dichter der Verkehr in einem Gebiet ist, desto höher die Anzahl der TRX über alle Sektoren hinweg bei gegebenem Radius aus der Wellenausbreitung sein muss. Wenn diese Anzahl die maximale Kapazität überschreitet, muss der Radius der Zellen reduziert werden. Daraus folgt, dass bei hohem Verkehrsaufkommen der Verkehr die Größe der Zellen bestimmt und umgekehrt bei geringerem Verkehrsaufkommen die Ausbreitungseigenschaften des Spektrums.

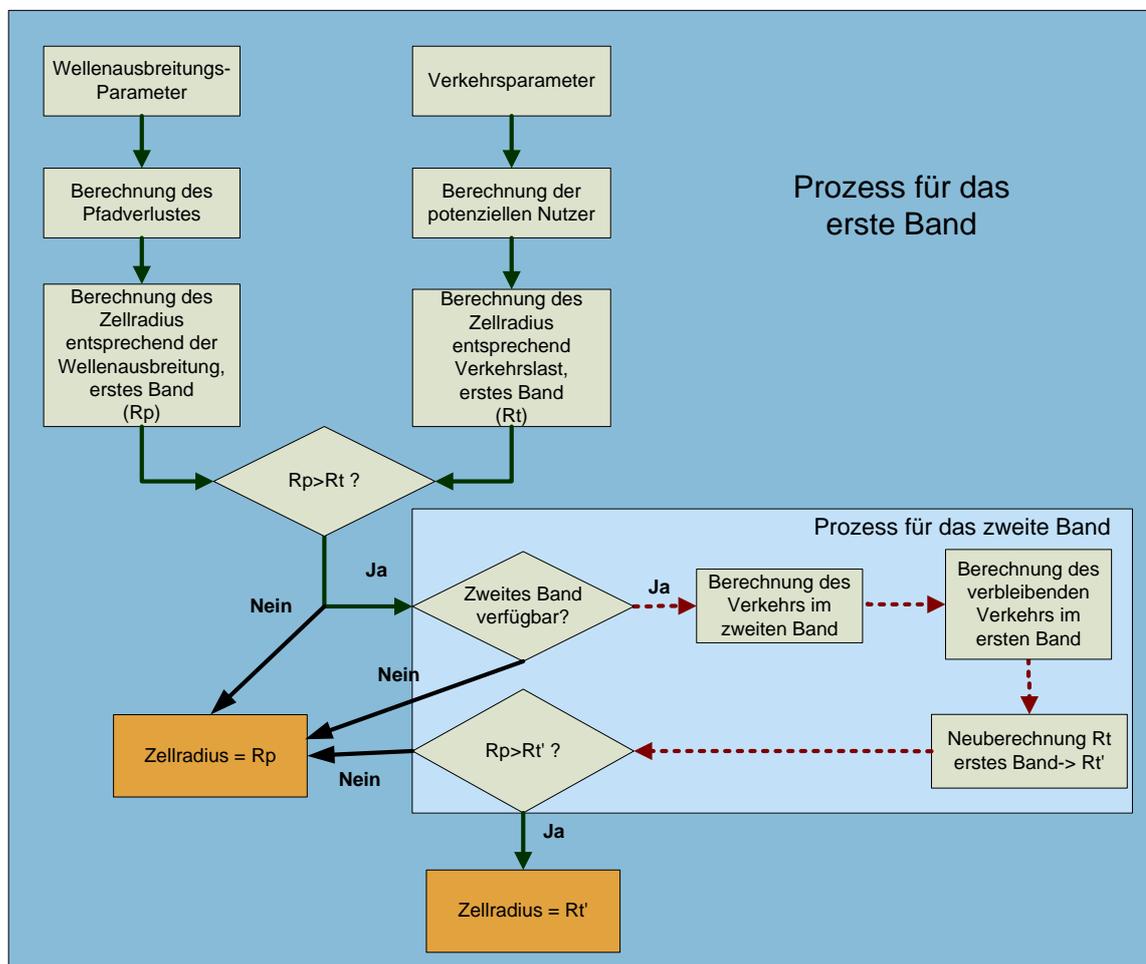
Abbildung 3-1 gibt einen schematischen Überblick über diesen Dimensionierungsprozess.

Abbildung 3-1: Schematischer Überblick über den Prozess der Dimensionierung von 2G GSM-Zellen



Obige Lösung gilt, wenn Spektrum nur in einem Band (entweder 900 MHz oder 1800 MHz) genutzt werden kann. Wenn Spektrum in beiden Bändern zur Verfügung steht und der Wellenausbreitungsradius größer ist als der Radius entsprechend Verkehr bei Ausnutzung des Sektorisierungspotenzials im ersten Band, der Verkehr also so groß ist, dass die Wellenausbreitungseigenschaften nicht den begrenzenden Faktor darstellen, besteht die Möglichkeit, dass durch Einsatz eines zusätzlichen Equipments (z.B. Sektoren und TRX als Dual-Band-Overlay-Equipment) am selben Standort, das das zweite Spektrumsband nutzt, weiterer Verkehr in dieser Zelle bewältigt werden kann, wodurch sich der Radius der Zelle vergrößert und somit die Gesamtzahl der Standorte in dem Gebiet verringert. Der gemeinsame Radius der beiden Zellen wird in einem iterativen Verfahren bestimmt. Da sich der Einsatz der zusätzlichen Zelle nur lohnt, wenn die dadurch ermöglichten Einsparungen von Standortkosten die zusätzlichen Kosten des eingesetzten Radiogeräts überwiegen, wird im Modell geprüft, ob per Saldo eine Einsparung stattfindet. Ohne diese Einsparung wird von einem Einsatz der zusätzlichen Zelle abgesehen. Abbildung 3-2 zeigt das Flussdiagramm für diesen Algorithmus.

Abbildung 3-2: Flussdiagramm zur Berechnung des Zellen-Radius für 2G GSM



Nach der Bestimmung des Radius für eine einzelne Zelle wird deren Fläche bestimmt. Die Anzahl der Zellen in dem Gebiet ergibt sich, indem die Fläche des Gebiets durch die Fläche einer einzelnen Zelle geteilt wird. Dabei wird berücksichtigt, dass sich die aus den Radien ermittelten Kreisflächen der Zellen teilweise überlappen, indem diese Flächen um einen entsprechenden Prozentsatz reduziert werden. Dieser Prozess wird für jedes Untergebiet eines Distrikts und für alle Distrikte durchgeführt, woraus sich die Zellenplanung für das gesamte abzudeckende Gebiet ergibt.

Der oben beschriebene Prozess berücksichtigt nicht den Aspekt von Funklöchern, die in städtischen und anderen Gebieten mit hohen Gebäuden auftreten und dort das Radiosignal erheblich schwächen können. Das Modell berücksichtigt diesen Aspekt, indem es einen Faktor vorsieht, der als Parameter vorgegeben wird (und dessen Wert auf empirischen Beobachtungen beruht), mit dem die Anzahl der Basisstationen dort, wo dies angebracht ist, um einen Prozentsatz erhöht werden kann.

3.1.4 Zellenplanung für 3G UMTS⁵

With the term “3G system” two standards, UMTS and HSPA, are meant. Both technologies are based on Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA), which implies that the cell size depends on the amount of interference in the cell. This interference is generated by the users of the cell as well as by system users from the adjacent cells. The allowed interference in the cell is defined by a parameter. In this section, descriptions of the dimensioning process for each of the two technologies are given.

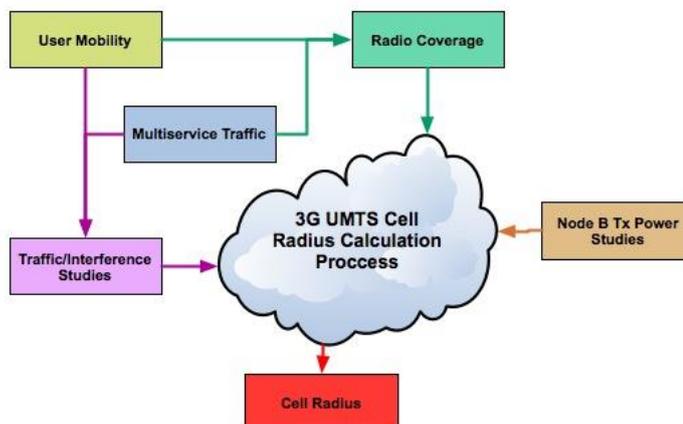
3.1.4.1 3G UMTS

3.1.4.1.1 Overview over the process for calculating the cell range of a 3G cell

As UMTS is a WCDMA technology, the cell size in a UMTS system depends on the allowed amount of interference in the system. In the model, this parameter is used by the algorithm to determine the link budget, from which based on the given propagation conditions the cell range is estimated. Every user within a cell is considered as a source of interference, and therefore the total interference caused by all the users within the propagation cell range must be in line with the maximum amount of allowed interference in the area defined by that range. There is an interdependency between the cell range due to propagation characteristics and the cell range due to the amount of interference caused by the traffic of the users within a cell. This requires the implementation of an iterative algorithm capable of managing this interdependency. Abbildung 3-3 shows a schematic representation of the process used to determine the cell range in 3G UMTS networks.

⁵ Der Text dieses Abschnitts 3.1.4 ist in Englisch gehalten.

Abbildung 3-3: Schematic representation of the process to determine the cell range for 3G UMTS cells



The available amount of bandwidth determines the cell sizes. UMTS/WCDMA is based on blocks of spectrum with a 5 MHz bandwidth each. The algorithm developed in the model is capable of dimensioning a network based either on a single 5 MHz frequency block or on multiple 5 MHz blocks which are then considered as one single larger block. In both cases, the algorithm optimises the cell size as described above, taking into account the allowed interference within a cell and the interference caused by the users within that cell.

The algorithm optimises the cell range of a NodeB for a given portfolio of services.⁶ For this, it considers that the services with the specified grade of service (GoS), expressed by a corresponding blocking probability, will be offered throughout the whole area covered by the NodeB.

The corresponding algorithm used to estimate the cell range consists of two steps:

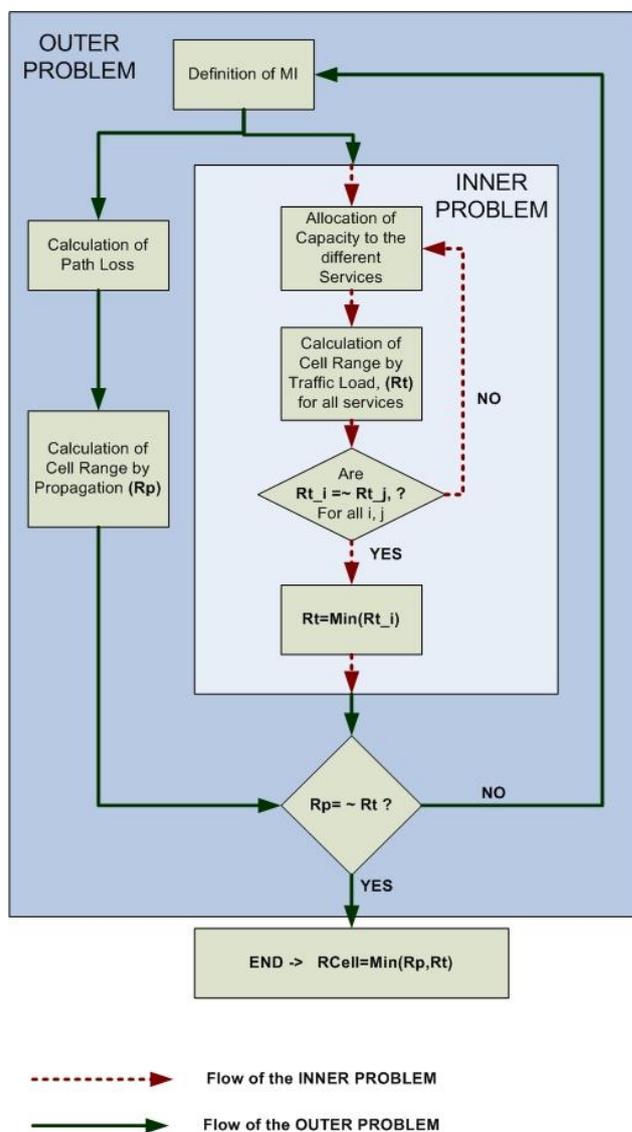
- Solving the so-called outer problem, which determines the maximum allowed interference within a cell that balances the cell range due to propagation conditions and due to capacity requirements.
- Solving the inner problem, by which the optimal allocation of capacity to every considered service is estimated. This optimal allocation of capacity is based on the value of interference defined at each iteration of the outer problem.

The solution is obtained by applying an interrelated iterative process. The outer problem consists in the determination of the cell range taking propagation impairments into ac-

⁶ See Portilla et al. (2009).

count. This is based on the interference margin which is defined for each iteration. This cell range obtained from each outer problem iteration step is used as a starting point for the next iterative step of the inner problem. The provisional cell range obtained by solving the inner problem (by capacity) forms the input for the outer problem. This one then compares both cell ranges and, if appropriate, defines a new interference margin. After this, a new iterative step is performed. A flow chart describing the two processes is given in Abbildung 3-4. The detailed description of this cell range process is found in Sub-section 3.1.4.1.2.

Abbildung 3-4: Flow chart for the calculation of the cell range in 3G networks



3.1.4.1.2 Step by step process for calculating the cell range of a 3G cell

This section gives a detailed description of the dimensioning process of a 3G UMTS radio access network. The discussion is quite technical so that readers without a background in mobile network design theory may choose to skip it.

The first step is the calculation of the cell range due to propagation characteristics. For this purpose, an individual analysis of coverage for each service in both, uplink and downlink, is performed. The most restrictive cell range, R_P , is the starting point of the capacity study. This cell range is used for allocating the initial load of each service. This procedure is based on a concept proposed by Lindberger⁷ for a multiservice loss network, extended here to cover the particular features of the WCDMA cell design.

The capacity analysis is based on two main parameters, the aggregated load factors of the whole set of services η_S and the maximum capacity of the cell (load factor of the cell) η_{cell} .

The aggregated load factor η_S is calculated as follows: Based on the previously calculated R_P , the allocation of the load factor for each of the services is carried out. For this purpose, the number of users within each cell is calculated based on the population density of the area under study, and therefore the total traffic demand per sector for each service is carried out. Making use of basic traffic concepts, based on the Erlang-B formula and the characteristic soft capacity concept for WCDMA⁸, the number of required channels to satisfy the calculated user demand with a specific blocking probability P_{bi} is obtained. The numbers of channels are assumed to be the maximum number of simultaneous connections for each service N_{aci} . The next step is to calculate the load factor of a single connection for each service, l_i , which depends on the defined input parameters of the services considered, such as binary rate, bit energy over noise ratio, etc. The load factor of each service, based on the number of simultaneous connections and the individual load factor per connection, L_i , is then estimated. Finally, the model calculates the total demanded load factor η_S as the sum of the different load factors for each service.

The maximum capacity of the cell η_{cell} is calculated as follows: It depends on two parameters: the amount of allowed interference in the system, defined as an input parameter, and the number of 5 MHz frequency blocks available. Initially and independently on the number of frequency blocks available, the model estimates the capacity of the cell for one single frequency block.

⁷ See Lindberger (1988).

⁸ For details about the Erlang-B formula, the soft capacity concept, and the load factor estimation, see chapter 8 in Holma and Toskala (2010).

The objective of the capacity analysis is to verify that the maximum capacity of the cell is larger than, or at least equal to, the demanded aggregated load factors of the services. For this purpose, once both η_S and η_{cell} are calculated, an iterative process, where the total amount of the allocated load of all the services is compared with the maximum capacity of the cell, is performed. In the case that $\eta_S > \eta_{cell}$, an additional frequency block (if available) is used and η_{cell} is recalculated and compared with η_S . This process is iteratively performed until $\eta_S < \eta_{cell}$ or there is no further frequency block available. In this last case, the total load assigned to the services is reduced to satisfy the following condition $\eta_S = \eta_{cell}$. The rest of the dimensioning process is performed using the maximum capacity available according to the last mentioned condition.

Considering the values of the service-depending load factors, a new solution of the cell radius for each individual service, as against that derived from propagation, is calculated. The load factor over the i services with the minimum value, $\min L_i$, then defines the cell radius.

This process is done for the downlink, which is typically the most restrictive direction in the capacity, and also for the uplink, typically the most restrictive in terms of propagation.

Once the cell radius is calculated, the algorithm checks whether the NodeB has enough power to simultaneously serve all users in the coverage area. If that is the case, the cell radius obtained is the final cell radius for the NodeB configuration. If that is not the case, the interference margin has to be decreased and the complete process has to start again.

Finally, when the final cell radius of the site/NodeB configuration is obtained, the number of sites is calculated similarly as it was done for 2G, dividing the extension of the area to be served by the area covered by one site.

In both cases (for a single or for several 5 MHz frequency blocks), the model will allow to define a pico cell increment factor, similarly to the 2G design to consider possible shadow areas or hot spots.

3.1.4.2 3G HSPA

As mentioned, HSPA is a technology of the WCDMA family and is usually deployed when there is also UMTS deployment. When the latter is the case and deployment of the two technologies takes place using the same frequency band, an integrated deployment, using the same frequency bands as UMTS, takes place. This means that if a 5 MHz-Block used for UMTS is not fully utilized by this technology, the remaining

transmission power after the provision of UMTS service is used for HSPA first, before further such available blocks are deployed for this technology.

The algorithm to calculate the number of required sites (either new or shared infrastructure with existing UMTS) works similarly as the algorithms for GSM and UMTS. In a first step it calculates the area covered by a single site and thereafter the number of sites is calculated by the division of the extension of the area under study by the area covered by the site.

The algorithm to calculate the HSPA cell range, and hence the area covered by the HSPA site, works as shown in Abbildung 3-5 below. From the technical information available for the services shown in Tabelle 2-7, it is possible to calculate the most suitable modulation and coding scheme (MCS) of HSPA. The MCS determines the type of modulation, codification and maximum bit rate achievable. This MCS directly corresponds to a specific signal to interference and noise (SINR) ratio at the receiver.

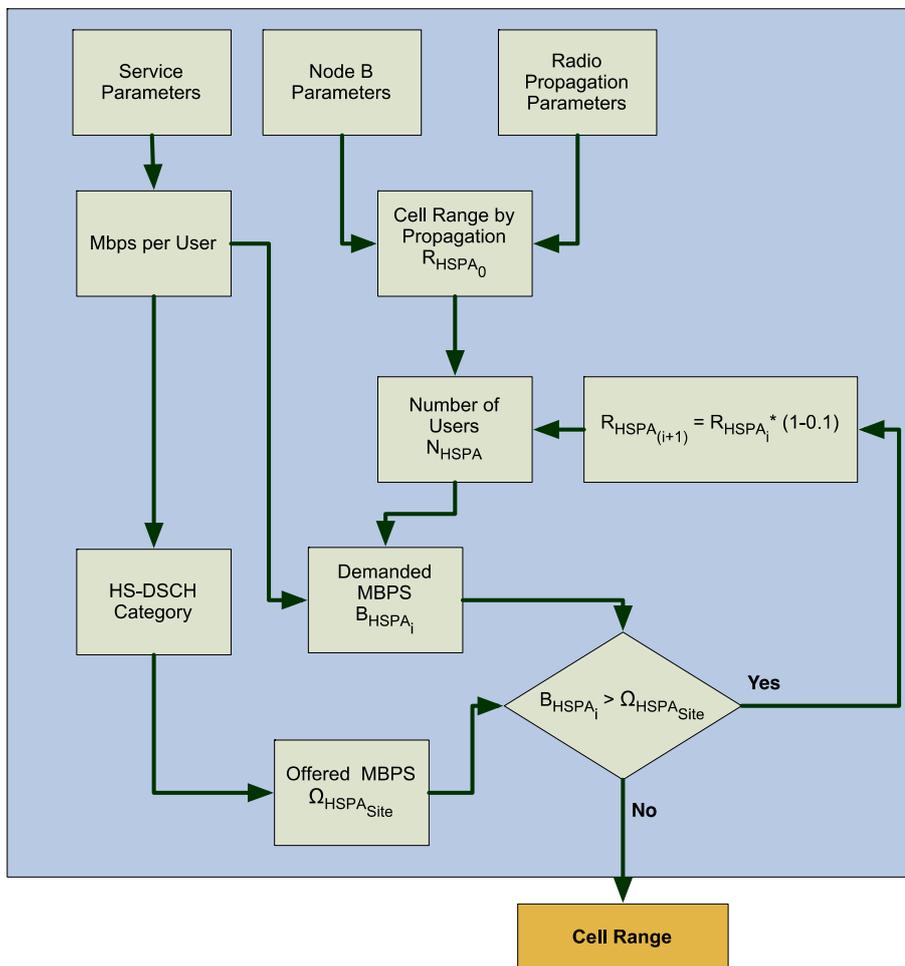
On the other hand, the transmission power of the NodeB is also known. With this value, it is possible to calculate the maximum path loss which guarantees the defined SINR at the edge of the cell. With this value of the path loss and a propagation method, typically Okumura-Hata⁹, it is possible to obtain an initial value for the cell range by propagation R_{HSPA_0} . Given this cell range, we know the number of HSPA users generating the throughput to be carried in this cell range (B_{HSPA_0}).

The next step is to estimate the maximum throughput of the NodeB. For this purpose, the model takes into consideration the number of sectors of the NodeB and the definition of the HSPA frame structure in terms of time transmission intervals (TTI) and number of available codes. In addition, the type of modulation and coding scheme (MCS) used is also considered. Based on these elements and the relevant technical equations, the maximum capacity of the NodeB is estimated ($\Omega_{\text{HSPA_Site}_0}$). If this value is equal or higher than the B_{HSPA_0} determined above, the cell range calculated R_{HSPA_0} is the final cell range of the site. If not, the algorithm starts an iterative procedure to reduce the cell radius (10 % in each iteration) until the throughput in a given iteration $\Omega_{\text{HSPA_Site}_i}$ is equal or higher than the B_{HSPA_i} .

Once this value is obtained, the number of sites required to provide HSPA services in the area is calculated. This number is compared with the number of UMTS sites. The larger value of the two will determine the final number of sites. In case of hybrid GSM/UMTS areas, the number of UMTS/HSPA sites is similarly compared with the number of GSM sites to determine the final number of locations.

⁹ For more details regarding the cell dimensioning under the Okumara Hata model, see chapter 8 in Holma and Toskala, (2010).

Abbildung 3-5: HSPA cell range calculation procedure



While above discussion has been in terms of HSPA, it also applies to HSPA+ which the model also installs. The use of the HSPA+ technology depends directly on the maximum demanded throughput per user. The latter makes the model to choose the most suitable modulation and coding scheme among the existing possibilities. If the maximum demanded throughput is larger than a given value, the model selects an HS-DSCH category corresponding to HSPA+ and follows the same process as described above.

3.1.5 LTE im Radiozugangsnetz

Der vorliegende Abschnitt, der hauptsächlich die Ergänzungen darstellt, die die neue Version des Modells ausmachen, enthält eine kurze Beschreibung der LTE-Technologie und die Darstellung ihrer Implementierung im Modell. Gleichfalls werden Verbesserungen aufgrund von zwei technischen Entwicklungen, Multiple-Input-und-Multiple-Output (MIMO) und Carrier Aggregation (CA) dargestellt. Anschließend wird in einem eigenen Abschnitt der über LTE realisierte Sprachdienst (Voice over LTE, VoLTE) und seine Implementierung im Radiozugangsnetz vorgestellt.

Dabei reflektiert die Darstellung des Einsatzes der LTE-Technologie den Zeitpfad, auf dem diese neue Technologie und ihre Verbesserungen und Anwendungen auf dem Markt inzwischen eingeführt worden sind, gegenwärtig eingeführt werden oder in Zukunft eingeführt werden sollen.

3.1.5.1 Eine kurze Beschreibung von LTE

Long Term Evolution (LTE) ist die Weiterentwicklung des 3G-Standards der 3GPP, die zuerst im Release 8 definiert worden ist. Dabei wurde von einer Uplink-Bitrate von bis zu 50 Mbps und einer Downlink-Bitrate von bis zu 150 Mps ausgegangen, sowie von einer 2X2 MIMO-Konfiguration und dem Einsatz von Typ 4-Endgeräten. Inzwischen sind Uplink-Bitraten von 75 Mbit/s bzw. Downlink-Bitraten von 300 Mbps bei Einsatz von 4X4 MIMO-Konfigurationen und Typ 5-Endgeräten definiert worden; diese Geschwindigkeiten sind jedoch als theoretisch erreichbare Maximalwerte bei einem verfügbaren Spektrum von 20 MHz anzusehen, wofür außerdem die Geräte erst noch auf den Markt gebracht werden müssen. LTE-Advanced wurde von 3GPP mit Release 10 eingeführt. Es enthält Verbesserungen bei der MIMO-Technik mit Konfigurationen von bis zu 8X8 im Downlink und 4X4 im Uplink, Carrier Aggregation und die Einführung des Sprachdienstes über LTE.

Sowohl LTE wie LTE-Advanced basieren auf zwei neuen Technologien im Radio-Zugangsnetz: Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) im Downlink und Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) im Uplink. Im Downlink erfolgt die Übertragung zwischen Basisstation und Endgerät über getrennte Sub-Carrier von jeweils 15 kHz. Die Anzahl der Sub-Carrier hängt dabei direkt von der Bandbreite des Spektrums ab, die für LTE verfügbar ist: es sind 72 im Fall einer Bandbreite von 1,4 MHz und 1200 im Fall einer Bandbreite von 20 MHz.

In LTE-Systemen erfolgt die Allokation von Ressourcen dynamisch durch den Scheduler, dessen Funktion in das eNodeB integriert ist. Diese Allokation basiert auf dem Konzept der Resource Blocks (RB), wobei ein RB als die geringste Ressourceneinheit ist, die einem Nutzer zugeordnet werden kann und die das Ergebnis der Aggregation von 12 Sub-Carrier ist. Jeder RB besteht aus diesen 12 Subcarrier in der Fre-

quenzdomäne (180 kHz) und einem Slot in der Zeitdomäne (0,5 ms). Die Anzahl der RB, die einem Nutzer zugeordnet werden, hängt vom Modulation and Coding Scheme (MCS) ab sowie von der Qualität der Verbindung zwischen dem Endgerät und dem eNodeB. Dabei wählt das Model unter 29 verschiedenen Optionen des MCS diejenige, die die Zellengröße entsprechend Ausbreitungseigenschaften und Anforderungen an die Kapazität in Übereinklang bringt.

3.1.5.2 Die Bestimmung des Zellenradius für LTE

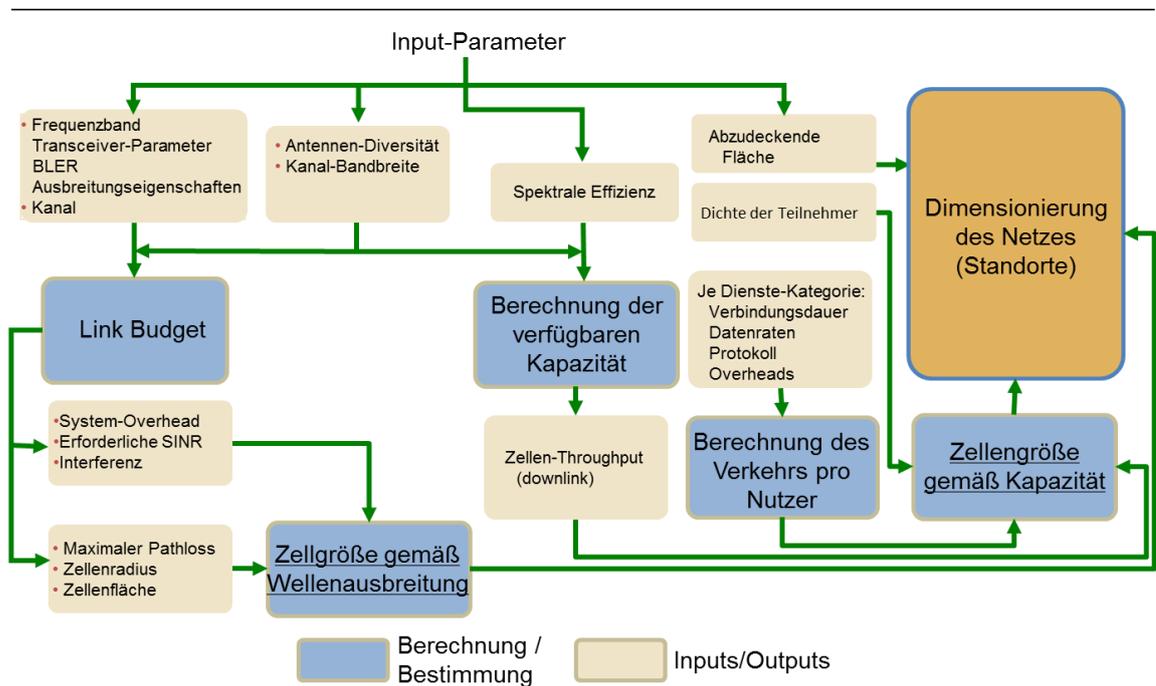
Im Folgenden wird die Dimensionierung eines LTE-Anschlussnetzes beschrieben, die in den meisten Punkten auch für LTE-Advanced gültig ist und wenn VoLTE zum Dienstportfolio gehört. Besondere Merkmale, die sich durch LTE-Advanced und VoLTE ergeben, werden im Anschluss an diese Unterabschnitte behandelt.

Die Dimensionierung eines LTE-Anschlussnetzes in einem Untergebiet eines Distrikts besteht im Wesentlichen aus zwei nicht voneinander unabhängigen Schritten:

- Berechnung der Zellengröße auf Basis der Wellenausbreitungseigenschaften und
- Berechnung der Zellengröße auf Basis der verfügbaren Kapazität.

Abbildung 3-6 skizziert den Ansatz, mit dem diese Schritte im Modell umgesetzt werden.

Abbildung 3-6: Ansatz zur Bestimmung des Zellenradius für LTE

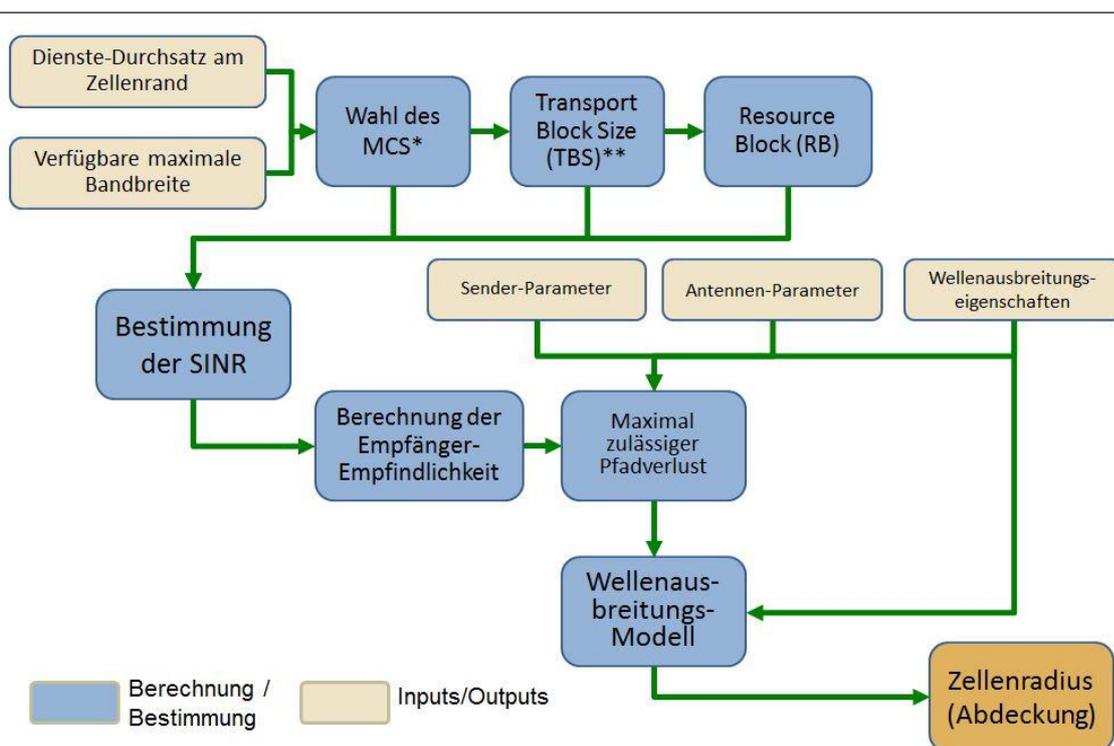


Die Abbildung verdeutlicht, dass wie bei GSM und UMTS/HSPA die Herangehensweise entsprechend zwei Ansätzen erfolgt. Mit dem einen Ansatz wird die Zellengröße auf Basis der Wellenausbreitungseigenschaften bestimmt. Dazu wird der Link Budget berechnet, dessen Output die maximale Reichweite des Signals ist, woraus sich der maximale Radius der Zelle ergibt. Siehe dazu die beiden blau gefärbten Kästen auf der linken Seite der Abbildung. Mit dem zweiten Ansatz wird die Größe der Zelle entsprechend der Anzahl der Nutzer berechnet, die bei gegebener Nachfrage je Nutzer mit dem verfügbaren Umfang des Spektrums bedient werden können. Siehe hierzu die drei blau gefärbten Kästen auf der rechten Seite des Abbildes. Wie auch bei den anderen beiden Technologien, wird dann das Ergebnis zugrunde gelegt, das den kleinen Zellenradius ergibt. Die zwei Ansätze werden im Folgenden weiter erläutert.

Der Prozess zur Berechnung der Zellengröße auf Basis der Wellenausbreitungseigenschaften wird in Abbildung 3-7 grafisch dargestellt. Den blau hinterlegten Kästchen folgend, wird zunächst das Modulation and Coding Scheme (MCS) ausgewählt, das die beste Abdeckung ermöglicht und die Anforderungen in Bezug auf die Bitrate am Zellenrand erfüllt. Dazu berücksichtigt das Modell 29 verschiedene MCS in der Form von Nachschlagetabellen. Jedes MCS wird einem bestimmten Transport Block Size (TBS) zugeordnet und damit einer entsprechenden Anzahl von Resource Blocks (RB). Die vom Modell benutzten Nachschlagetabellen enthalten die benötigten Informationen für die Dimensionierung der Zellen zur Abdeckung des relevanten Gebiets, insbesondere die Anzahl der RB und die Signal to Interference Noise Ratio (SINR) entsprechend der vor-

gegebenen Bandbreite des Kanals. Dann wird der maximal zulässige Pfadverlust (MAPL) auf Basis der folgenden Parameter bestimmt, der am Zellenrand erforderlichen Bitrate (wobei diese Bitrate der SINR entspricht), den Ausbreitungseigenschaften des Kanals, den Fading Margins, den Building Penetration Losses, den Clutter Types, sowie technischen Parametern wie Antennensensitivität, Sendeleistung, Antennengewinn und –verlust, sowie anderen mehr. Der Wert dieses Pfadverlustes geht in das Modell ein, das die Reichweite eines hinreichend starken Signals entsprechend den Ausbreitungseigenschaften der Wellen des eingesetzten Spektrums bestimmt (Cost 231 Okumura Hata Model), um dementsprechend den Radius und damit die Fläche einer Zelle abzuleiten. Indem die Fläche des insgesamt abzudeckenden Gebiets durch die Fläche einer einzelnen Zelle, die diesem Radius entspricht, geteilt wird, ergibt sich die Mindestanzahl von benötigten eNodeB.

Abbildung 3-7: Berechnung des Zellradius nach den Wellenausbreitungseigenschaften des Spektrums

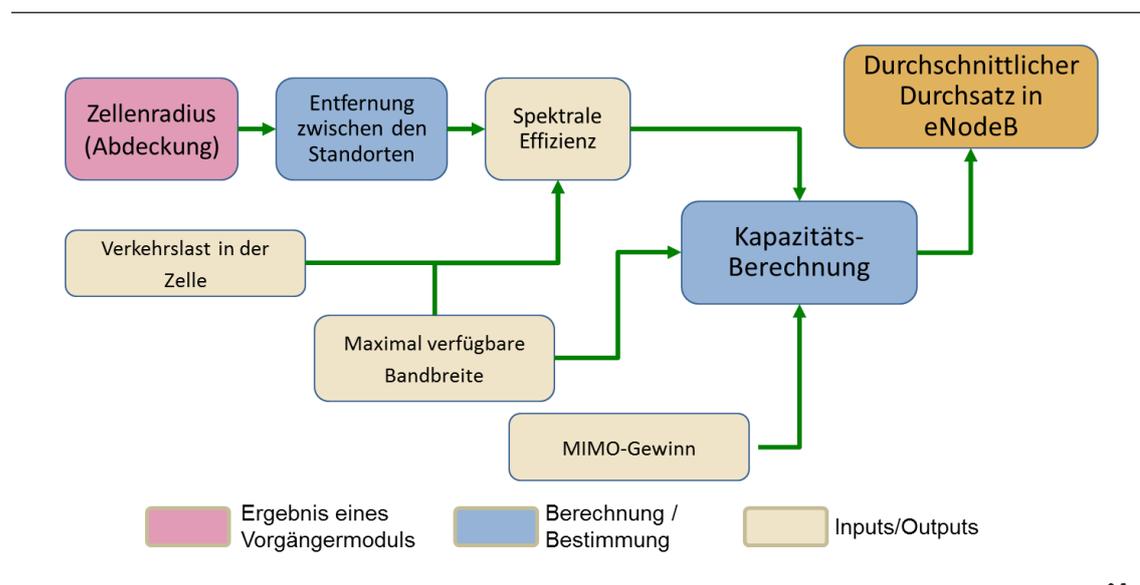


* MCS: Modulation and Coding Scheme; Wahl erfolgt aus 29 verschiedenen Optionen

** TBS: Transport Block Size; definiert als die Anzahl der Bits, die während einer Millisekunde übertragen werden kann, die durch die benutzte MCS bestimmt wird,

Der nächste Schritt besteht in der Berechnung der Zellengröße entsprechend der vorhandenen Systemkapazität. Da LTE ein durch Interferenz begrenztes System ist, wird die Kapazität einer eNodeB auf der Basis der verfügbaren Bandbreite, der Antennen-Konfiguration und der Verkehrslast in der Zelle berechnet. Die für die Dimensionierung benötigte Nachfrage wird auf Basis der durchschnittlichen Nachfrage eines Nutzers berechnet. Die Dimensionierung erfolgt dann auf der Basis dieser durchschnittlichen Nachfrage und der Kapazität der eNode B. Nachdem als Ergebnis der Kapazitäts-Berechnung die durchschnittliche Leistung eines eNodeB bekannt ist, kann die Anzahl der eNodeB ermittelt werden, die installiert werden muss, um die Nachfrage in dem betrachteten Gebiet zu erfüllen. Abbildung 3-8 zeigt eine detailliertere grafische Darstellung.

Abbildung 3-8: Kapazitäts-Berechnung

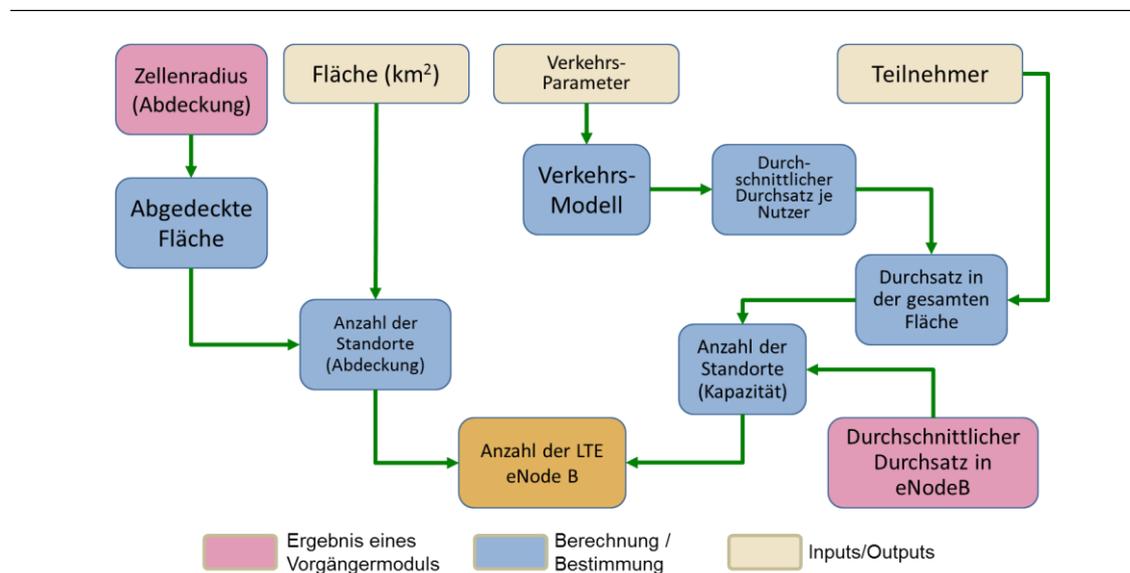


Wie in der Abbildung gezeigt, ist für diese Berechnung der die Abdeckung des Gebiets gewährleistende Zellenradius nach den Wellenausbreitungseigenschaften des Spektrums ein Inputparameter (siehe rosafarbiges Kästchen oben links). Dieser Radius bestimmt implizit die Entfernung zwischen den Standorten, die bei der folgenden Berechnung eine Rolle spielt. Zunächst ist die in der Zelle verfügbare Kapazität zu bestimmen. Dies geschieht auf der Basis der spektralen Effizienz je Resource Block und der Anzahl der Resource Blocks, die durch die verfügbare Bandbreite gegeben ist. Die spektrale Effizienz wird durch Simulationen auf der Basis der Entfernungen zwischen den Standorten bestimmt. Wir nutzen dabei die Ergebnisse aus Elnashar (2014), die zu Durchschnittskapazitäten in der Reichweite von 1 Mps für 1,4 MHz bis 17.5 Mps für 20 MHz führen. Dabei gehen wir, Elnashar (2014) folgend, davon aus, dass jeweils nur 70 % der maximalen Kapazität zur Verfügung gestellt werden. Für den Fall, dass der Gewinn durch MIMO in dieser Berechnung einbezogen wird, erhöhen sich die Werte

entsprechend dem MIMO-Effizienzfaktor. Nachdem nun die durchschnittliche in Mps gemessene Zellen-Kapazität vorliegt (siehe blaues Kästchen rechts), ist der Durchsatz je Nutzer zu bestimmen. Dies geschieht auf der Basis des durchschnittlich von einem Nutzer nachgefragten Volumens. Die Anzahl der Nutzer je Zelle erhält man dann durch die einfache Division der Zellen-Kapazität durch die Verkehrslast je Nutzer.

Abbildung 3-9 zeigt, wie aus den Ergebnissen der beiden Ansätze, die für das betreffende Untergebiet eines Distrikts verwendete Zellengröße ermittelt wird.

Abbildung 3-9: Berechnung der Anzahl der eNodeB



Die Ergebnisse aus den beiden Ansätzen sind in der Abbildung durch die rosafarbenen Kästchen dargestellt. Das Ergebnis nach Wellenausbreitungseigenschaften (oben links) ist der maximale Radius, den eine Zelle in dem Distrikt-Untergebiet haben kann. Aus ihm wird ihre maximale Größe errechnet, durch die dann die gesamte abzudeckende Fläche geteilt wird. Daraus ergibt sich die Anzahl der Standorte, die zur Abdeckung der Fläche des Distrikts erforderlich sind. Das Ergebnis auf Basis der verfügbaren Kapazität des Spektrums (unten rechts) ist der durchschnittliche Durchsatz einer eNodeB. Wenn der erforderliche Durchsatz der gesamten Fläche des Untergebiets, der entsprechend der durchschnittlichen Nachfrage je Nutzer und der Anzahl der Nutzer dort ermittelt worden ist, durch diesen Durchsatz je eNodeB geteilt wird, führt dies zu der Anzahl der Standorte die erforderlich ist, um die Nachfrage zu bedienen. Die vom Modell implementierte Anzahl an eNodeB ist dann die größere der beiden.

3.1.5.3 MIMO

Wie bereits in der Einführung zu LTE in Abschnitt 3.1.5.1 erwähnt, ist MIMO zuerst mit Release 8 von 3GPP eingeführt worden, Das definierende Merkmal von MIMO ist, dass eine Radioeinrichtung mit mehr als einer Antenne ausgestattet ist, die gemeinsam für das Senden und den Empfang desselben Signalstroms sorgen. Obwohl Release 10 die Möglichkeit von bis zu 8 Sende- und 8 Empfangsantennen definiert, können realistisch in absehbarer Zeit nur 2 X 2 Konfigurationen in den Netzen zur Anwendung kommen, wobei 2 X 2 darauf hinweist, dass die Konfiguration auch in den Endgeräten verfügbar sein muss. Es werden zwei Typen von MIMO unterschieden, Single User MIMO (SU-MIMO) oder Multiple User MIMO (MU-MIMO). Im ersteren Fall wird die maximale Datenrate jedes versorgten Nutzers in der Zelle erhöht, im zweiten Fall wird eine größere Anzahl von Nutzern ermöglicht, ohne dass deren Datenrate erhöht würde. Beide Typen laufen auf eine gleiche Erhöhung der insgesamt in der betreffenden Zelle verfügbaren Kapazität hinaus. Die Umsetzung im Modell zielt auf eine solche Erhöhung der Kapazität durch die Möglichkeit der Versorgung einer größeren Anzahl von Nutzern bei einer vorgegeben Datenrate je Nutzer.

Da MIMO die Batterie des Endgeräts stark in Anspruch nimmt, werden in absehbarer Zeit lediglich Endgeräte eingesetzt, die zwar mit zwei Antennen ausgerüstet sind, die gleichzeitig empfangen können, von denen aber nur eine Antenne für das Absenden von Signalen eingesetzt wird. Daraus folgt, dass MIMO nur für die Downlink- und nicht für die Uplink-Verbindung zur Verfügung steht. Dies wird auch im Modell so umgesetzt.

Aus dem Umstand, dass MIMO nur für die Downlink-Verbindung zum Einsatz kommt, und dass in der Regel die hohen Bitraten für die Downlink-Verbindungen gebraucht werden, folgt, dass diese Technik zur Erhöhung der Kapazität dient und somit für einen größeren Zellen-Radius sorgt, wenn dieser durch die Kapazität begrenzt wird. Sie dient nicht der Erweiterung eines Zellen-Radius, der durch die Wellenausbreitungseigenschaften begrenzt wäre, da dieser durch die Reichweite der Uplink-Verbindung, die am Zellenrand noch ein Mindestmaß an Signalstärke aufweisen muss, bestimmt wird.

Die Implementierung von MIMO wird im Rahmen des existierenden Algorithmus für LTE vorgenommen. Sie erfolgt, indem die Basisstationen mit Radiogeräten mit jeweils zwei Antennen ausgerüstet werden, unter der Annahme, dass, wie gerade beschrieben, die versorgten Endgeräte für den Empfang ebenfalls mit zwei Antennen versehen sind. Die Bestimmung des Zellen-Radius auf Basis der verfügbaren Kapazität erfolgt dann wie dies in vorangegangenen Abschnitt abgehandelt worden ist. Da der LTE-Algorithmus auf der Bereitstellung einer vorgegebenen garantierten Bitrate für einen Nutzer am Rand der Zelle basiert, wird hierbei berücksichtigt, dass sowohl SU-MIMO wie MU-MIMO diese Kapazität erhöht. Diese Kapazitätserhöhung beruht auf der Verbesserung der spektralen Effizienz, die durch den Einsatz von MIMO zum Tragen kommt. Der dadurch erzielte Gewinn wird durch einen Faktor ausgedrückt, der als Parameterwert einzugeben ist. Aus entsprechenden Untersuchungen folgt, dass bei einer 2 X 2 Konfi-

guration dieser Gewinn sich auf 54 % beläuft, unabhängig von der Entfernung des Nutzers von der Basisstation.¹⁰ Das Modell berücksichtigt die Wirkung von MIMO, indem die spektrale Effizienz je Resource Block erhöht wird. Dies hat zur Folge, dass wenn zum Beispiel durch einen 10 MHz-Block 50 Resource Blocks zur Verfügung gestellt werden, durch die Erhöhung der spektralen Effizienz deren Kapazität sich um 54 % vergrößert, so als ob 77 anstelle 50 Ressource Blocks zum Einsatz kämen. Außer dieser Änderung in der Parametrisierung braucht in der Programmierung des Algorithmus im Netzplanungsmodul nichts weiter angepasst werden. Im Kostenmodul ist darauf zu achten, dass der Investitionswert der Basisstation entsprechend der Ausrüstung - mit oder ohne MIMO - eingestellt wird.

3.1.5.4 Carrier Aggregation

Carrier Aggregation (CA) wurde zuerst mit Release 10 von 3GPP eingeführt. Mit dieser Entwicklung ist es möglich, getrennte Blöcke des Spektrums (auch Component Carrier genannt) zu aggregieren und damit die für die Dienste bereitgestellte Kapazität zu vergrößern. Hierbei ist zwischen Intra-Band CA und Inter-Band CA zu unterscheiden. In der ersten Version handelt es sich um getrennte Blöcke im selben Band, bei der zweiten Version um Blöcke, die verschiedenen Bändern angehören.

Bei Intra-Band CA kommen in Bezug auf Gebietsabdeckung für die verschiedenen Component Carrier dieselben Wellenausbreitungseigenschaften zur Geltung. In Bezug auf Verkehrskapazität kann die Summe der Component Carrier als ein einziger Carrier betrachtet werden. Daraus folgt, dass in der Modellierung selber nichts geändert werden braucht. Es ist lediglich erforderlich, dass in den Eingabefeldern für die verfügbare Spektrums-Kapazität die entsprechenden Spektrums-Kapazitäten eingetragen werden.

Dies ist anders bei Inter-Band CA. Hier werden Component Carrier aus verschiedenen Bändern zusammengefügt, die unterschiedliche Wellenausbreitungseigenschaften aufweisen. Dies ist von Bedeutung, sowohl wenn bei der Bestimmung der Zellengröße diese Ausbreitungseigenschaften bestimmend sind, wie auch wenn die aggregierte Kapazität aus beiden Frequenzbändern für die Zellengröße maßgeblich ist. Dies wird deutlich, wenn im Folgenden die Implementierung von CA mit Component Carrier aus verschiedenen Frequenzbändern beschrieben wird, wobei auch hier die Implementierung im Rahmen des existierenden Algorithmus für LTE geschieht.

Wir gehen davon aus, dass die Betreiber Carrier Aggregation aus verschiedenen Frequenzbändern dann einsetzen, wenn die Kapazität des verfügbaren Spektrums eines einzelnen Bandes nicht ausreicht, um die bestehende Nachfrage nach mobilen Breitbanddiensten zu bedienen. Dies heißt für die Modellierung, dass CA für die Fälle zur Verfügung steht und durch einen Parameter aktiviert werden kann, wenn mit einem

¹⁰ Siehe Kuipers und Correia (2008).

großen Teil an Zellen gerechnet wird, bei denen die oben geschilderte Bedingung gilt. Natürlich wird dabei auch der Fall behandelt, dass sich die Zellengröße entsprechend den Wellenausbreitungseigenschaften bestimmt, so dass für den Fall, dass diese Zellengröße die kleinere sein sollte, diese als maßgeblich angesehen wird.

Im Folgenden werden die im Modell vorgenommenen einzelnen Schritte bei der Bestimmung der Zellengröße beschrieben, sowohl für den Fall, dass Kapazität beschränkend ist, wie für den Fall, dass die Wellenausbreitungseigenschaften die Größe der Zelle bestimmen (der besseren Übersicht halber jeden der einzelnen Schritte unter einem eigenen Aufzählungspunkt):

- (1) Bestimmung der Zellengröße auf der Basis der insgesamt zur Verfügung stehenden Spektrums-Kapazität (unter Anwendung der in Abschnitt 3.1.5.2 dargestellten Methodik): Zu diesem Zweck können die in MHz gemessenen Spektrums-Kapazitäten der verschiedenen Carrier Components addiert werden.
- (2) Bestimmung der Zellengröße auf der Basis der (schlechteren) Wellenausbreitungseigenschaften des Spektrums aus dem höher gelegenen Band (z.B. aus dem 2,6 GHz-Band, wenn gleichzeitig Spektrum aus dem 1.800 MHz-Band eingesetzt wird): Wenn dieser Zellradius größer als der unter (1) ausfällt, ist der Findungsprozess bereits beendet, da die Nachfrage dann so groß ist, dass die Kapazität aus beiden Bändern gebraucht wird, um Nutzer in einer kleineren Zelle, als die, die durch die Wellenausbreitungseigenschaften des höher gelegenen Bandes bestimmt würde, zu bedienen.
- (3) Falls die Zellengröße nach (1) größer ist als die unter (2), wird bestimmt, welcher Teil der Kapazität gebraucht wird, um die Nachfrage in dem Zellenbereich unter (2) zu bedienen, d.h. in dem Zellenbereich, der auf Spektrum aus beiden Bändern zurückgreifen kann. Es wird ein Rest an Kapazität verbleiben, der in der Regel aus dem niedriger gelegenen Band stammt¹¹ und der in dem Teil der Zelle, in dem CA nicht mehr greift, zum Einsatz kommen kann. Diese Restkapazität bestimmt das Gebiet in einem Ring um den durch Carrier Components aus den beiden Bändern bedienten Zellenteil. Hierzu wird wiederum die in Abschnitt 3.1.5.2 entwickelte Methodik eingesetzt.
- (4) Wenn die Prüfschritte ergeben, dass der Zellenradius durch die Wellenausbreitungseigenschaften des Spektrums bestimmt wird, stellt sich die Frage,

¹¹ Es ist nicht ausgeschlossen, dass die gesamte Kapazität aus dem niedrigeren Band mit einem Rest aus dem anderen Band verbleibt. In diesem Fall würde nur die Kapazität aus dem niedrigeren Band dazu verwendet werden können, in dieser Zelle weitere Nachfrage zu bedienen (da für den Rest aus dem anderen Band die Ausbreitungseigenschaften eine Verwendung hier nicht zuließen). Dieser Fall würde allerdings dem Zweck des CA zuwiderlaufen, da die Kapazität des Spektrums aus dem weiter oben liegenden Band ausreicht, um die Nachfrage innerhalb des durch seine Wellenausbreitungseigenschaften definierten Gebiets zu bedienen.

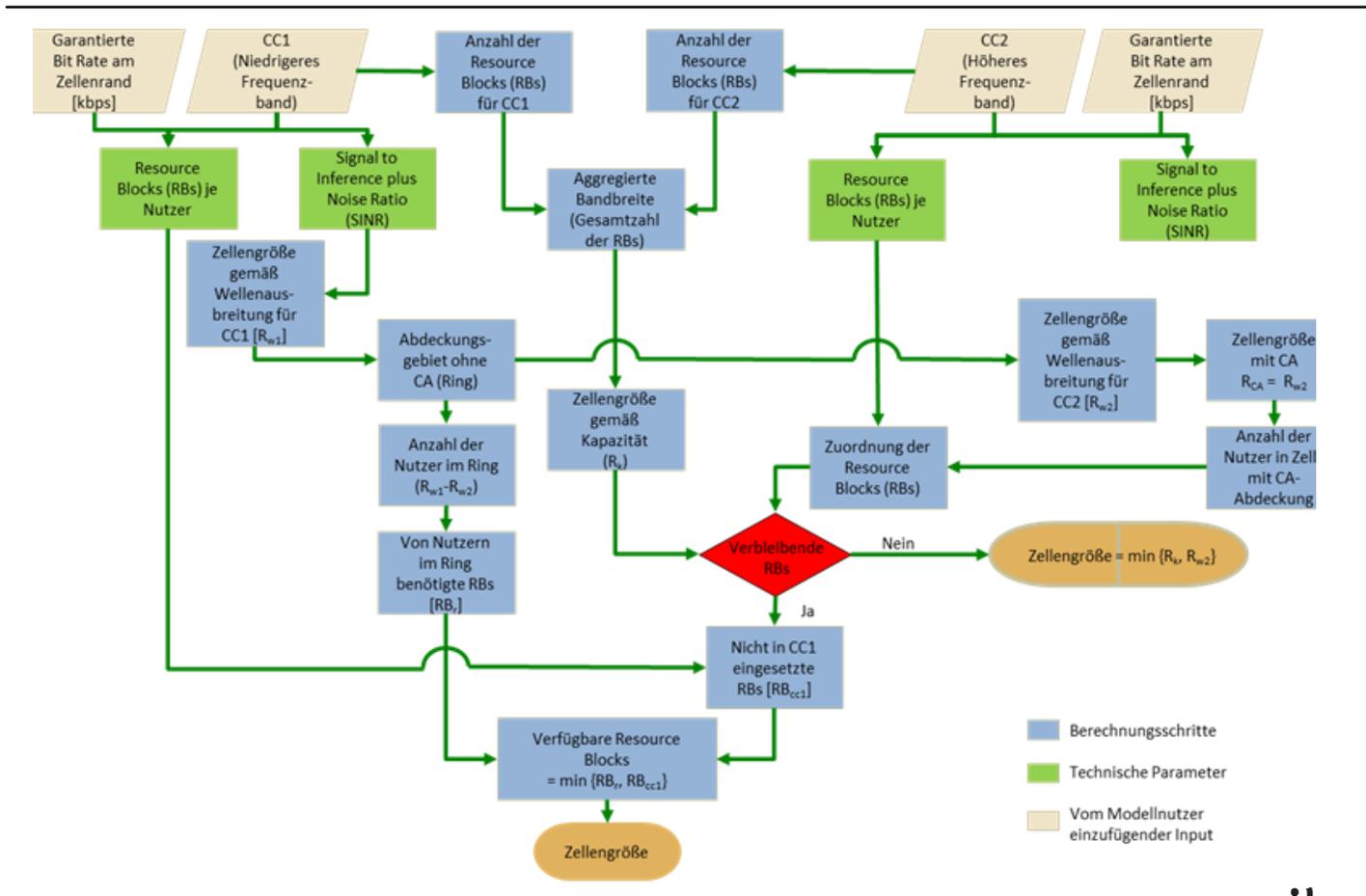
welche Wellenausbreitungseigenschaften zugrunde zu legen sind; die des Spektrums aus dem unteren oder oberen Frequenzband? Es kann gezeigt werden, dass die (besseren) Ausbreitungseigenschaften des weiter unten liegenden Bandes, welche einen weiteren Radius der Zelle ermöglichen – die Größe der Zelle bestimmen. Das Modell prüft, ob der entsprechende Fall vorliegt, und bestimmt im gegebenen Fall die Größe der Zelle nach den Wellenausbreitungseigenschaften des weiter unten liegenden Spektrums.¹²

Abbildung 3-10 zeigt das Flussdiagramm, das diesen Modellierungsprozess wiedergibt.

Bezüglich der Bereitstellung des Spektrums, das für Inter-Band CA eingesetzt werden kann, gilt es zu berücksichtigen, dass dafür bis zu fünf Frequenzbänder zur Verfügung stehen können. Im Modell ist ein Mechanismus implementiert, der für jeden Distrikt aus den zur Verfügung gestellten (bis zu fünf) Bändern die beiden für CA einsetzbaren Bänder auswählt. Dies geschieht, indem der entsprechende Algorithmus jede mögliche Kombination von zwei Frequenzbändern zugrunde legt und dafür die Größe der Zellen berechnet. Die Kombination, die die Zellen mit den geringsten Kosten verursacht, wird dann implementiert. Hieraus folgt, dass je nach den Gegebenheiten eines bestimmten Gebiets unterschiedliche Frequenzbänder eingesetzt werden können.

¹² Der Fall ist vergleichbar zu dem in der vorangegangenen Fußnote. Bei einer solchen Nachfrage würde der Einsatz von CA nicht sinnvoll erscheinen.

Abbildung 3-10: Berechnung der Zellengröße bei Einsatz von Carrier Aggregation



3.1.6 Voice over LTE (VoLTE)

3.1.6.1 Überblick über die VoLTE betreffenden Entwicklungen

VoLTE bezeichnet die Abwicklung von Sprachverkehr im LTE-Netz. VoLTE basiert auf VoIP und stellt die vollständige Integration aller Dienste unter dem IP Protokoll dar. Derzeit bieten Mobilfunknetzbetreiber über LTE in der Regel Datendienste an, die die verbesserte LTE Bandbreite verwenden, während Sprachdienste zum überwiegenden Teil noch über UMTS bzw. GSM abgewickelt werden. Eine weitgehende Migration von Sprachdiensten auf LTE ist erst mit der Einführung von sogenannten auf den Massenmarkt zielenden Rich Communications Services (RCS)¹³ zu erwarten, wenn die für VoLTE – als Teil von RCS – benötigten Einrichtungen im Core-Netz auch gerechtfertigt erscheinen.

Es findet somit eine schrittweise Einführung von VoLTE statt. Dazu wurden verschiedene Verfahren entwickelt und standardisiert, von denen

- Circuit Switched Fallback (CSFB) und
- VoLTE in Verbindung mit IP Multimedia Subsystem (IMS)

die wichtigsten sind. Von diesen beiden Ansätzen ist der zweite derjenige, der sich wahrscheinlich in zukünftigen Netzen, in denen Sprache vornehmlich als VoLTE realisiert wird, durchsetzen wird. In der gegenwärtig geltendem schrittweisen Einführung, kommen jedoch beide Verfahren zur Geltung und werden, wie im Folgenden beschrieben, im Modell eingesetzt.

Neben CSFB und VoLTE über IMS, ist Voice over LTE via Generic Access (VoLGA) entwickelt worden. VoLGA vermeidet die Nachteile des relativ langsamen Aufbaus von CSFB, erfordert aber umfangreichere Änderungen sowohl in den Endgeräten wie auch im Netz. VoLGA ist derzeit nicht vom 3GPP standardisiert und hat sich am Markt nicht durchgesetzt.

3.1.6.2 Befriedigung von Nachfrage nach VoLTE – Mögliche Abbildungen im Modul für die Zellenplanung

In Abschnitt 3.1.5 ist die modellmäßige Implementierung von LTE dargestellt worden, ohne dass nach den Dienste-Arten unterschieden wurde. Wenn neben Datendiensten auch der Sprachdienst über LTE bereitgestellt wird, bedeutet dies zunächst aus verein-

¹³ RCS ist ein von der GSMA definierter Standard, der den Nutzern erweiterte Kommunikationsdienste anbietet und unter LTE mittels IMS implementiert wird.

fachter Sicht, dass im Radiozugangsnetz ein weiterer Dienst mit seinen Kapazitätsanforderungen sowohl für Hardware wie für Spektrum hinzugefügt wird. Insofern ändert sich in der Planung und Dimensionierung der LTE-Zellen methodisch nichts, außer dass die zusätzliche Kapazität für Sprache bereitgestellt werden muss. Dabei bedarf es allerdings der Klärung, was genau als Nachfrage nach VoLTE zu gelten hat und wie sie unter den unterschiedlichen Voraussetzungen zu realisieren ist.

Wenn Nutzer ihren Verkehr über LTE-fähige Endgeräte abwickeln, fragen sie auch Sprachverbindungen über diese Technologie nach, obwohl die technischen Voraussetzungen im Netz dafür noch nicht vorhanden sein mögen. In diesem Fall kommt das Circuit Switched Fall Back (CSFB) zum Einsatz. Als Ergebnis der vom Endgerät ausgehenden Signalisierung wird dann bereits beim Verbindungsaufbau im Radiozugangsnetz eine auf UMTS oder GSM basierende Verbindung bereitgestellt und diese Verbindung dann auch bis zum anderen Ende über eine solche Kapazität geführt. Das heißt, dass im LTE-Netz nur die entsprechende Signalisierung zum Verbindungsaufbau bzw. Verbindungsabbau im UMTS- oder GSM-Netz über Einrichtungen des LTE-Core-Netzes vorgenommen wird und Einrichtungen des IMS nicht benötigt werden. Die Bereitstellung von VoLTE gilt dann für den das Gespräch initiiierenden Teilnehmer virtuell, da dieser – abgesehen von der zusätzlich aufkommenden Zeitverzögerung für den Verbindungsaufbau – nicht wahrnimmt, dass das Gespräch tatsächlich nicht mit der LTE-Technologie ausgeführt wird. Für einen Teilnehmer, der im LTE-Netz eingeloggt ist und ein solches Gespräch empfangen soll, wird durch die CSFB-Signalisierung ebenfalls sichergestellt, dass er es über UMTS oder GSM empfängt. Als Voraussetzung dafür muss im Radiozugangsnetz parallel zu LTE auch UMTS und/oder GSM implementiert sein, was in der Praxis wie auch im Modell gewährleistet ist.

Eine realistische Version als Vorgabe für die Modellierung ist ein Netz, in dem VoLTE-ermöglichende LTE-Netzteile existieren und ein Anteil der Teilnehmer über Endgeräte verfügen, die sowohl Daten als auch Sprache über LTE ermöglichen. Nachfrage nach VoLTE von diesen Teilnehmern kann über das LTE-Radiozugangsnetz abgewickelt werden, vorausgesetzt, die B-Teilnehmer sind ebenfalls im LTE-Radiozugangsnetz eingeloggt und verfügen über ein VoLTE-fähiges Endgerät. Die Vorgabe ist auch, dass im Core-Netz die für VoLTE erforderlichen IMS-Funktionalitäten implementiert sind. Der Endpunkt der Entwicklung solcher Netze ist ein vollständig auf LTE basierendes Netz.

Im Modell steht jedoch eine Version des Radiozugangsnetzes im Fokus, in dem Circuit Switched Fallback (CSFB) und "echtes" VoLTE in Verbindung mit IMS nebeneinander realisiert werden können. Die Nachfrage nach "echtem" VoLTE wird von vornherein auf den Anteil beschränkt, der von Rufenden bis zum Empfänger genuin über das LTE-Radiozugangsnetz läuft. Bei dem über CSFB realisierten Anteil wird ebenfalls von vornherein bestimmt, dass er Teil des Volumens des Sprachdienstes ist, der entweder über UMTS oder GSM abgewickelt wird. Dies geschieht deswegen, weil die Durchführung dieser Verbindungen über die Legacy-Netze durch Signalisierung veranlasst wird, was keine Auswirkungen auf die Radiozugangsnetze hat. Für den Anteil von VoLTE,

der über das LTE-Radiozugangsnetz läuft, wird, wie im folgenden Unterabschnitt dargestellt, entsprechende Kapazität mit dimensioniert. Wenn oben gesagt wird, dass die erwartete Entwicklung zu einem vollständig auf LTE basierendem Netz führen wird, so impliziert dies, dass das modellierte Netz dies auch durch entsprechende Parametrisierung abbilden kann.

3.1.6.3 Zellenplanung im Radiozugangsnetz bei über IMS realisiertem VoLTE

Mit der Einführung von echtem VoLTE gibt es faktisch einen zweiten Sprachdienst im Modell, nämlich einen, der vollständig paket-vermittelt ist. Dieser Dienst wird im Modell als ein separater Dienst behandelt, da bei ihm bei gegebener Nachfrage die Kapazitätsanforderungen je nach eingesetztem Codec unterschiedlich hoch ausfallen und sich deshalb von denen des leitungsvermittelten Sprachdienstes unterscheiden können. Der Codec ist der Mechanismus, der das analoge Signal eines Gesprächs in digitale Signale umwandelt und dabei pro gegebenem Intervall von 20 Millisekunden je nach Typ eine größere oder kleinere Anzahl von Bits generiert. Für VoLTE wird standardmäßig der AMR-WB Sprach-Codec mit einer Bitrate von 12,65 kbit/s, der eine dem leitungsvermittelten Sprachdienst äquivalente Qualität gewährleistet und von der GSM Association empfohlen wird, eingesetzt. Die Spezifizierung des Modells lässt auch zu, über entsprechende Parametrisierung weitere Varianten des genannten Sprach-Codec zu implementieren, die mit höheren Bitraten (z.B. 23,85 kbit/s) arbeiten.¹⁴

Das Volumen der Nachfrage nach VoLTE wird zunächst, wie dies auch bei dem üblichen leitungsvermittelten Sprachdienst geschieht, in Minuten erfasst und dann im Modell als ein Erlang-Wert in der Hauptverkehrsstunde dargestellt. Um die Vergleichbarkeit des VoLTE-Dienstes mit den anderen LTE-Daten herbeizuführen, wird dieses Volumen in Kilobit umgewandelt. Dazu wird das in Erlang ausgedrückte Sprachvolumen in Sekunden umgewandelt und mit der Kilobitrate des eingesetzten Codec multipliziert: $(\text{Volumen in Erlang} \cdot 3600) \cdot \text{kbit/s} = (\text{Volumen in Kilobit})$.

Wie oben bereits ausgeführt, wird im Modell für VoLTE standardmäßig der AMR-WB Sprach-Codec mit einer nominalen Bitrate von 12,65 kbit/s eingesetzt. Da VoLTE paketvermittelt ist, und jedes Paket mit einem Overhead versehen werden muss, ist der nominalen Bitrate noch die Rate für diesen Overhead hinzuzufügen. Die Berücksichtigung dieses Overhead führt zu einer faktischen Bitrate von 15,85 kbit/s, die erforderlich ist,¹⁵ um die Sprachsignale während einer Sekunde mit entsprechender Qualität zu

¹⁴ Beim leitungsvermittelten Sprachdienst war im bisherigen Modell der AMR-NB Sprach-Codec, der 12,2 kbit je Sprachsekunde generiert, zum Einsatz gekommen. Da in Österreich gegenwärtig alle Betreiber den WB-AMR-Codec flächendeckend einsetzen, wird in der neuen Version des Modells dieser Codec auch für den leitungsvermittelten Sprachdienst implementiert. Dies geschieht durch eine einfache Änderung des Wertes des entsprechenden Parameters.

¹⁵ Die Länge eines jeden der Pakete, mit denen VoLTE übertragen wird, beträgt 20 Millisekunden. Daraus folgt, dass jedes Paket 253 Bits transportiert ($12.650 \text{ bit/s} \cdot 20 / 1.000$). Der Overhead eines Pakets, bestehend aus den Anforderungen für Header und weitere Kontrollfunktionen, erfordert insge-

übertragen. Wenn ein Codec mit höherer Bitrate eingesetzt wird, wird ein Overhead derselben Größe hinzugefügt.

Wenn nun das vom Erlang-Volumen abgeleitete Kilobit-Volumen durch die Anzahl der Sekunden in einer Stunde, d.h. 3.600, geteilt wird, erhalten wir die durchschnittliche Bitrate, die die Zelle je Sekunde leisten muss, um die Sprachsignale zu befördern. Diese Bitrate wird der für Daten hinzugefügt, so dass sich eine einzige zu übermittelnde Bitrate ergibt. In anderen Worten, das System muss so dimensioniert werden, dass die Bitrate, die sich aus der Addition der erforderlichen Bitrate für Sprache und der für Daten ergibt, realisiert wird.

Hier ergibt sich allerdings ein wichtiger Punkt. Oben ist darauf verwiesen worden, dass es sich um durchschnittlich nachgefragte Volumina während der Hauptverkehrsstunde und daraus abgeleitet um durchschnittliche Übermittlungsraten handelt. Sprache ist jedoch zeitsensitiv, was heißt, dass nicht die durchschnittliche Erfüllung der Bitraten-Anforderung hinreichend ist, sondern eine, die möglichst Echtzeit für Sprache gewährleistet, was wiederum heißt, dass die Pakete für VoLTE prioritär behandelt werden müssen. Zu diesem Zweck wird zu der Kapazität, die auf jeden Fall für VoLTE benötigt würde, mittels eines vorgegebenen Faktors zusätzliche Kapazität eingeplant, die für diese Priorisierung dann zur Verfügung steht.

Wenn auf die oben geschilderte Weise die erforderliche Bitrate, die sowohl den nachgefragten Sprach- wie Datenvolumina entspricht, bestimmt worden ist, erfolgt die Dimensionierung der Zellen des LTE-Radiozugangsnetzes wie oben in Abschnitt 3.1.5 beschrieben.

Es bleibt zu vermerken, welche Konsequenzen sich für die Zellenplanung im Radiozugangsnetz daraus ergeben, dass ein Teil von anfangs im LTE-Netz geführten Gesprächen an Legacy-Netze übergeben werden müssen, da sich wenigstens ein Teilnehmer aus einem von LTE abgedeckten Raum heraus bewegt. In diesem Fall sorgt die Signallerung dafür, dass die Übergabe der Gespräche an die Legacy-Netze erfolgt. Für die Modellierung bedeutet dies Folgendes: Die in das Modell eingepflegte Nachfrage beruht auf empirisch erfassten Verkehrsmengen. Dabei beinhalten die Anteile dieser Nachfra-

samt 64 zusätzliche Bits, so dass jedes Paket insgesamt aus 317 Bits besteht. Wenn diese Anzahl von Bit in 20 Millisekunden zu übertragen ist, dann ergibt sich die oben genannte Bitrate von 15,85 kbit/s. Die erwähnten zusätzlichen 64 Bit entsprechen der Gesamtlänge nach der Anwendung von Robust Header Compression (RoHC) auf einen Teil der Header. Vor RoHC ist die Länge des Headers für das Real Time Protocol (RTP) 12 Bytes, die für das User Datagram Protocol (UDP) 8 Bytes und die für Internet Protocol (IP) entweder 20 oder 40 Bytes. Welcher Wert für IP gilt, hängt von der Version des IP ab; für IPv4 ist die Länge 20, für IPv6 ist sie 40 Bytes. Die maximale Größe des Headers insgesamt ist dann 40 oder 60 Bytes, je nach dem ob IPv4 oder IPv6 gilt. In beiden Fällen ist die Länge des Headers größer als die Payload von 253 Bits (31,625 Bytes). Deshalb wird RoHC angewandt, die die Gesamtlänge der Header im Durchschnitt auf eine Länge von 3 Bytes oder 24 Bits reduziert. Schließlich sind die Header für Packet Data Convergence Protocol (PDCP), Radio Link Control (RLC) und Medium Access Control (MAC) zu berücksichtigen, wofür im Modell 40 zusätzliche Bits hinzugefügt werden. Daraus resultiert eine gesamte Länge des Overhead von 64 Bits.

ge, die jeweils über die verschiedenen Technologien realisiert werden, immer schon diese weitergegebenen Verbindungen, so dass keine zusätzliche Anpassung vorgenommen werden braucht.

3.1.7 Besonderheiten bei Zellen mit hybriden Technologie-Kombinationen

Wenn in bestimmten Distrikten eine Zellenplanung mit hybriden Technologie-Kombinationen vorgesehen ist, ist die Nachfrage in diesen Zellen (städtisch, vorstädtisch oder ländlich) danach aufzuteilen, ob sie mit der einen oder anderen Technologie erbracht werden soll. Die Zellen werden dann für jede der spezifizierten Technologien mit der ihr entsprechenden Nachfrage geplant. Da die Planung so vorgenommen werden soll, dass die gemeinsame Nutzung von Infrastruktur ermöglicht wird, wird festgelegt, dass in dem Gebiet die Gesamtanzahl der Standorte gleich der Anzahl derjenigen Technologie entspricht, die die meisten von ihnen benötigt. Die Technologie mit der geringeren Anzahl an Basisstationen wird dann an Standorten mit der dominanten Technologie platziert. Es können dann Standorte verbleiben, an denen ausschließlich die dominante Technologie vertreten ist. Die Technologie-Kombinationen, die für solche hybriden Gebiete in Frage kommen, sind bereits in Abschnitt 2.5 dargestellt worden.

3.1.8 Zusatzversorgung entlang Autobahnen, Schnellstraßen und Haupteisenbahnstrecken

Wie bereits ausgeführt, wird im Modell entlang Autobahnen, Schnellstraßen und Haupteisenbahnstrecken, sowie Tunnel entlang beiden Arten von Verkehrswegen, eine Zusatzversorgung vorgesehen. Dabei besteht die Möglichkeit, durch einen entsprechenden Parameter als Technologie entweder GSM, UMTS oder UMTS mit HSPA vorzugeben.

Die zu versorgenden Gebiete entlang Autobahnen und Zugstrecken, sowie in den entsprechenden Tunneln, ähneln eher einer Linie als einem Kreis, woraus folgt, dass lediglich eine bestimmte Untermenge an verfügbaren Basisstationen dort eingesetzt werden kann. Die Merkmale dieser Basisstationen sind:

- Typ für Makrozellen in ländlichen Gegenden, mit hohen Trägereinrichtungen, so dass große Entfernungen überbrückt werden können;
- Hohe Sendeleistung und
- Zwei Sektoren.

Die Tunnel auf diesen Verkehrsstrecken werden mit Repeater versorgt, die am Tunnelleingang installiert werden und das Mobilfunksignal von dort aus in die Tunnelröhren

emittieren. Das Modell berücksichtigt, dass Repeater in ihrer Strahlungsreichweite beschränkt sind, so dass bei längeren Tunneln vom Algorithmus mehrere solcher Einheiten vorgesehen werden.

3.1.9 Signalisierung

Neben der eigentlichen Signalisierung sind zusätzlich diverse interne Kontrollfunktionen zu berücksichtigen, für die entsprechende Kanäle vorzusehen sind. In den folgenden Ausführungen wird der gesamte daraus resultierende Verkehr unter dem Begriff Signalisierungsverkehr zusammengefasst. Der Signalisierungsverkehr wird im Radiozugangsnetz und im Transportnetz jeweils unterschiedlich behandelt. Ferner gibt es im Radiozugangsnetz bezüglich der Signalisierung systematische Unterschiede zwischen GSM einerseits und UMTS/HSPA und LTE andererseits, die wie nachfolgend dargestellt im Modell berücksichtigt werden.

Da GSM auf dem Prinzip der Leitungsvermittlung basiert, werden für den Signalisierungsverkehr physikalisch getrennte Kapazitäten bereitgestellt. Im Modell wird dafür in jeder TRX mit acht Slots ein Slot für diesen Verkehr reserviert, daneben ein zweiter Slot für das Handover, um sicherzustellen, dass eine bestehende Verbindung nicht unterbrochen wird, wenn der Nutzer sich von einer Zelle in eine Nachbarzelle bewegt. Die Verkehrsführung in den Verbindungen im Aggregationsnetz von der BTS-Zelle zum BSC-Kontroller-Standort wird über 2 Mbps E1 Gruppen vorgenommen. Diese aus dem Festnetz bekannten Gruppen haben einen Slot von 64 kbps für den Signalisierungsverkehr reserviert (Slot 16).

Sowohl in UMTS/HSPA wie in LTE werden weder für den Nutzer- noch für den Signalisierungsverkehr physikalische Verbindungen reserviert. Vielmehr teilt sich der gesamte aufkommende Verkehr die gesamte Kapazität der Zelle und die entsprechenden Verbindungen werden nur virtuell vorgehalten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der Radio-Schnittstelle dem Nutzerverkehr nur ein Teil der Spektrums-Kapazität zugeordnet wird, so dass für Signalisierung, die nur einen geringen Spektrums-Bedarf hat, immer hinreichend Bandbreite zur Verfügung steht. Dies gilt auch, wenn für neue Dienste ein erhöhter Signalisierungsverkehr (z.B. "Always online" bei Smartphones) zu gewährleisten ist. Für die Verbindungen von der NodeB zum RNC bzw. zur entsprechenden Core-Netz-Einrichtung wird ein entsprechender Kapazitätzuschlag für diese Verkehre vorgenommen.

Zusammenfassend ergibt sich, dass für den Signalisierungsverkehr in der Funkschnittstelle stets hinreichend Kapazität zur Verfügung steht, während dies bei der Dimensionierung der Übertragungskapazitäten nicht explizit geschieht, da der Signalisierungs-Kapazitätsbedarf gegenüber dem des Wirkverkehrs relativ gering ist. Das Modell sieht Mark-up-Faktoren vor (siehe Tabelle 3-5 in Abschnitt 3.6), die die Auslastung durch den Wirkverkehr begrenzen und somit auch Kapazität für den Signalisierungsverkehr bereitstellen. Anzumerken ist, dass in der hier beschriebenen Version 2.0 des Modells, in der virtueller VoLTE-Dienst eine neue Funktionalität ist, die Werte dieser Mark-up-Faktoren ggf. angepasst werden müssen, um den größeren Bedarf an Signalisierung abzudecken. Dieser kann dadurch entstehen, dass diese Funktionalität unter Inanspruchnahme von Circuit Switched Fallback realisiert wird, das zusätzliche Signalisierungskapazitäten beansprucht,

3.2 LTE-Transportnetz

Durch die Hinzufügung der LTE-Technologie im modellierten Netz besteht nun im Festnetzteil der Bedarf nach einem Transportnetz auf der Basis von Schicht 1 und 2, das den LTE-Verkehr zu den Einrichtungen des Core-Netzes führt, ohne dass dabei Controller-Funktionen, wie sie im GSM- und UMTS-Netz erforderlich sind, in Anspruch genommen werden müssen. In einem hybriden Netz, in dem alle drei Technologien zur Anwendung kommen, werden die Verkehre aus allen drei Technologien in einem gemeinsamen Transportnetz integriert, bzw. das LTE-Transportnetz liegt parallel zum Aggregations- und Backhaul-Netz des GSM- und UMTS-Netzes. Daraus folgt, dass, wenn in den folgenden Abschnitten 3.3 und 3.4 die beiden letzteren Netzsegmente beschrieben werden, es jedes Mal in Bezug auf die Dimensionierung der Aggregations- und Verbindungssysteme gilt, dass bei dieser Dimensionierung der LTE-Verkehr mit einbezogen wird. An den entsprechenden Textstellen wird jeweils darauf verwiesen, wenn Kapazitäten für den LTE-Verkehr mit bestimmt werden.

Es gilt auch, dass bei einem reinen LTE-Netz, das LTE-Transportnetz mit Konzentrationspunkten modelliert wird die geographisch zwischen den eNodeB und dem Core Netzteil liegen und sich an Standorten befinden, die den Standorten des GSM- und UMTS-Netzes entsprechen würden, da diese ja auch unter Gesichtspunkten der minimalen Transportkosten bestimmt werden. Konkret heißt dies, dass in diesem Fall – wie für die Controller-Einrichtungen in einem GSM- und UMTS-Netz – die Anzahl der Standorte für solche Konzentrationspunkte vom Modellnutzer vorgegeben wird, an diesen Standorten aber nur die Aggregations-Funktion erfüllt wird und keine Investition in Controller-Einrichtungen stattfindet.

3.3 Aggregationsnetz

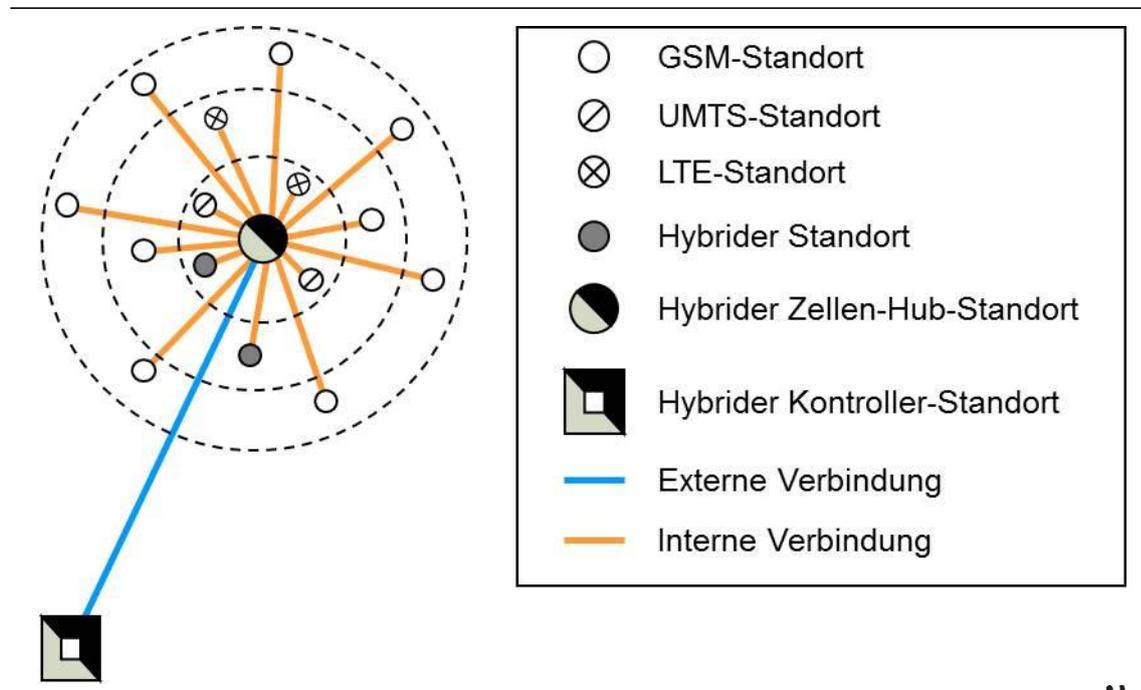
Das Aggregationsnetz verbindet in einem GSM- und UMTS-Netz die Basisstationen mit den Kontrollern. Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, übernimmt in einem LTE-Netz das Transportnetz anstelle des Aggregationsnetzes und des Backhaul-Netzes (siehe folgenden Abschnitt) die Aufgabe, den Verkehr zwischen den eNodeB und den Knoten des Cores-Netzes zu führen. Der vorliegende Abschnitt befasst sich mit der Modellierung des Aggregationsnetzes in Bezug auf ein GSM- und UMTS-Netz, wobei allerdings, wie oben ausgeführt, in Bezug auf die Übertragungssysteme der LTE-Verkehr mit einbezogen wird. Im abschließenden Abschnitt 3.3.3 wird dann gezeigt, welche der für dieses Netzsegment modellierten Netzelemente relevant sind, wenn das modellierte Mobilfunknetz ein reines LTE-Netz (ohne Kontroller-Funktionalitäten) ist.

Aus Sicht des physikalischen Netzes ist es sinnvoll, das Aggregationsnetz in zwei Teile zu unterteilen: (a) in die Verbindungen von den einzelnen Basisstationen zu einem Konzentrador je Distrikt, im Folgenden als Zellen-Hub bezeichnet, welcher den ersten Konzentrationspunkt im Mobilfunknetz darstellt, und (b) die Verbindungen von den Zellen-Hubs zu den Standorten der Kontrollerinrichtungen (BSC in 2G und RNC in 3G). Außerdem werden bei der Dimensionierung die Kontroller-Einrichtungen als Teil des Aggregationsnetzes angesehen.

Für die Modellierung wird davon ausgegangen, dass jeder Distrikt einen Zellen-Hub hat, der geografisch in seiner Mitte liegt. Die Bestimmung der Standorte der Kontroller erfolgt endogen als Untermenge aus den Standorten der Zellen-Hubs. Dabei ist die Anzahl der Kontroller-Standorte ein vorzugebender Parameter. Die Dimensionierung der Verbindungen im Aggregationsnetz und deren Einrichtungen sowie die Zuweisung der Systeme im Zellen-Hub wird durch die aggregierten Verkehre und die zugehörigen Bandbreiten bestimmt. Die Zellen-Hub-Systeme aggregieren den Verkehr auf der Basis von Einrichtungen der OSI Schicht 2, die durch Carrier Ethernet-Systeme abgedeckt werden.

Eine Besonderheit des Aggregationsnetzes in einem hybriden Netz ist, dass dort GSM und UMTS noch getrennt implementiert werden, aber die Infrastruktur zur Verkehrs- und Bandbreiten-Aggregation an den Hub- und Kontroller-Standorten von allen Zellen unabhängig von ihrer Technologie genutzt werden. Je nach Typ des Netzes kann es somit Zellen-Hubs geben, über die BTS-, NodeB und eNodeB-Verkehre geführt werden, oder solche, an denen zusätzliche Verkehre aus HSPA und LTE aufkommen und entsprechend zu bündeln sind. Abbildung 3-11 zeigt schematisch ein Beispiel.

Abbildung 3-11: Schematisches Beispiel eines Aggregationsnetzes in einem hybriden Netz



Für das Design und die Dimensionierung des Aggregationsnetzes hat das Modell folgende Aufgaben zu lösen:

- (1) Bestimmung der Standorte der Kontroller-Einrichtungen,
- (2) Zuordnung der Zellen-Hubs zu den Kontrollern,
- (3) Bestimmung der optimalen Topologie für jeden Kontroller-Cluster (bestehend aus dem jeweiligen Kontroller-Standort und den ihm zugeordneten Zellen-Hubs) und der Führung des Verkehrs (einschließlich des LTE-Verkehrs) über die entsprechenden Verbindungen (blaue Linie in Abbildung 3-11),
- (4) Berechnung der benötigten Verbindungskapazitäten (einschließlich der für LTE-Verkehr) zwischen individuellen Zellen bzw. Basisstationen und entsprechenden Zellen-Hubs (hellbraune Linien in Abbildung 3-11),
- (5) Berechnung der benötigten Verbindungskapazitäten (einschließlich der für LTE-Verkehr) zwischen Zellen-Hubs und Kontrollern und
- (6) Dimensionierung der Einrichtungen an den Kontroller-Standorten.

Aufgaben (1) und (2) sind ein klassisches Standortbestimmungsproblem, während Aufgabe (3) ein Topologie-Problem beschreibt, welches durch einen Baum-Algorithmus (Spanning Tree Algorithm) zu lösen ist. Die Herangehensweise des Modells an diese beiden Probleme wird zuerst beschrieben. Es folgen die Beschreibungen zur Lösung der Aufgaben (4) bis (6), d.h. der Bestimmung der Verbindungskapazitäten und der Zuweisung der Systeme.

3.3.1 Bestimmung der Controller-Standorte

3.3.1.1 Algorithmus zur Bestimmung der Controller-Standorte und der Zuweisung der Zellen-Hubs

Im Modell wird die Anzahl der Controller-Standorte extern vorgegeben, während die konkreten Standorte der Controller und die Zuordnung der Zellen-Hubs zu ihnen vom Modell endogen bestimmt wird. Die Lösung führt zu Controller-Clustern bestehend aus jeweils einem Controller-Standort und den ihnen zugeordneten Zellen-Hub-Standorten. Für die Lösung des Problems berücksichtigt das Modell folgende Kostentreiber:

- Kosten der Bandbreite des Verkehrs (einschließlich des LTE-Verkehrs), der von den Zellen-Hubs zu den Controller-Standorten geführt werden muss, und
- Längenabhängige Kosten, die durch die geografischen Entfernungen zwischen Zellen-Hubs und Controller-Standorten in jedem Controller-Cluster verursacht werden.

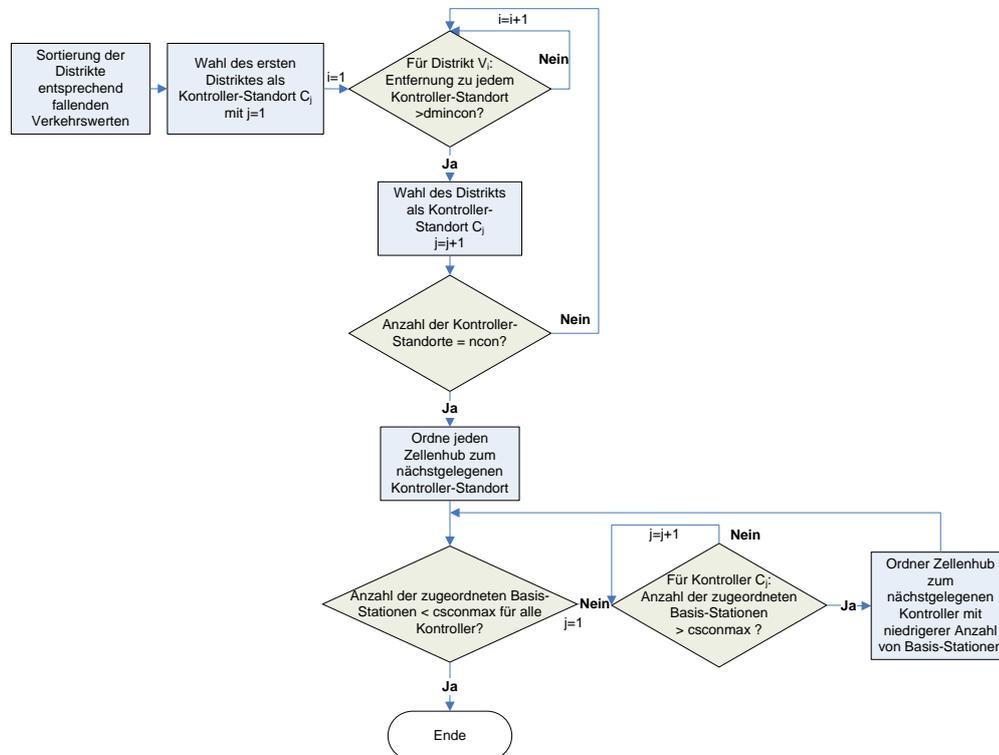
Es wird davon ausgegangen, dass Controller-Standorte eine Untermenge von Zellen-Hub-Standorten sind. Der Algorithmus wählt als erste Kandidaten für die Controller-Standorte die Zellen-Hub-Standorte aus, über die die höchsten Verkehrsvolumina geführt werden. Bei hoher Konzentration von Verkehr in Ballungsräumen könnte dies dazu führen, dass Controller-Standorte sehr nahe beieinander liegen und somit sehr große Entfernungen zwischen Controller-Standorten und Zellen-Hub-Standorten entstünden. Der Algorithmus kann daher so eingestellt werden, dass eine räumlich ausgeglichene Struktur entsteht, wofür Verfahren aus der Graphen-Theorie eingesetzt werden. Das Ergebnis wäre gegebenenfalls eine Wahl von Standorten mit geringem Verkehrsaufkommen, so dass u. U. große Verkehrsmengen von untergeordneten Zellen-Hub-Standorten über größere Entfernungen zu Controller-Standorten geführt werden müssten. Es wird deshalb ein heuristischer Algorithmus eingesetzt, mit dem die beiden Probleme unter der Kontrolle des Modellanwenders simultan gelöst werden können. Dazu wählt der Algorithmus Standorte mit großen Kapazitätsgewichten aus, die ein Mindestentfernungskriterium, das vom Nutzer als ein Parameterwert gesetzt wird, erfüllen müssen. Der Algorithmus wird durch numerische und grafische

Informationen unterstützt, so dass der Nutzer das Mindestentfernungskriterium auf der Basis von Iterationen optimal bestimmen kann.

Nach Wahl der Controller-Standorte wird jeder Zellen-Hub-Standort dem geografisch nächsten Controller-Standort zugeordnet. Um eine möglichst ausgeglichene Zuordnung der Standorte der Zellen-Hubs zu denen der Controller zu erreichen, wird eine maximale Anzahl von Zellen-Hub-Standorten, die einem Controller-Standort zugeordnet werden können, festgelegt. Der Wert dieses Parameters wird ebenfalls exogen vorgegeben. Im Fall, dass der vorgegebene Wert für die Anzahl der Zellen-Hubs je Controller nicht ausreicht, um alle Zellen-Hubs zuzuordnen, erfolgt eine Warnung, worauf der Wert der maximalen Anzahl erhöht werden kann.

Der Algorithmus basiert auf einer nach Verkehrsnachfrage geordneten Liste der Zellen-Hub-Standorte, aus der er, entsprechend dem Deepest First Search Principle, den jeweils (verbleibenden) verkehrsstärksten Standort, der das Mindestentfernungskriterium erfüllt, als einen Controller-Standort auswählt. Der Algorithmus ordnet dann Zellen-Hub-Standorte zu dem jeweils nächstgelegenen Controller-Standort und kalibriert schließlich die Zuordnung dergestalt, dass der Höchstzahlbeschränkung an Zellen-Hubs je Controller-Standort entsprochen wird. Abbildung 3-12 zeigt ein Flussdiagramm für diesen Algorithmus.

Abbildung 3-12: Bestimmung der Controller-Standorte und der Zuweisung der Zellen-Hubs



Legende:

- d_{mincon} – Minimum-Entfernungskriterium
- c_{sconmax} – maximale Anzahl der Zellen-Standorte pro Controller-Standort
- n_{con} – Anzahl der Controller-Standorte (Input-Parameter)

3.3.1.2 Algorithmus für die Verbindungen von Zellen-Hub-Standorten mit Controller-Standorten

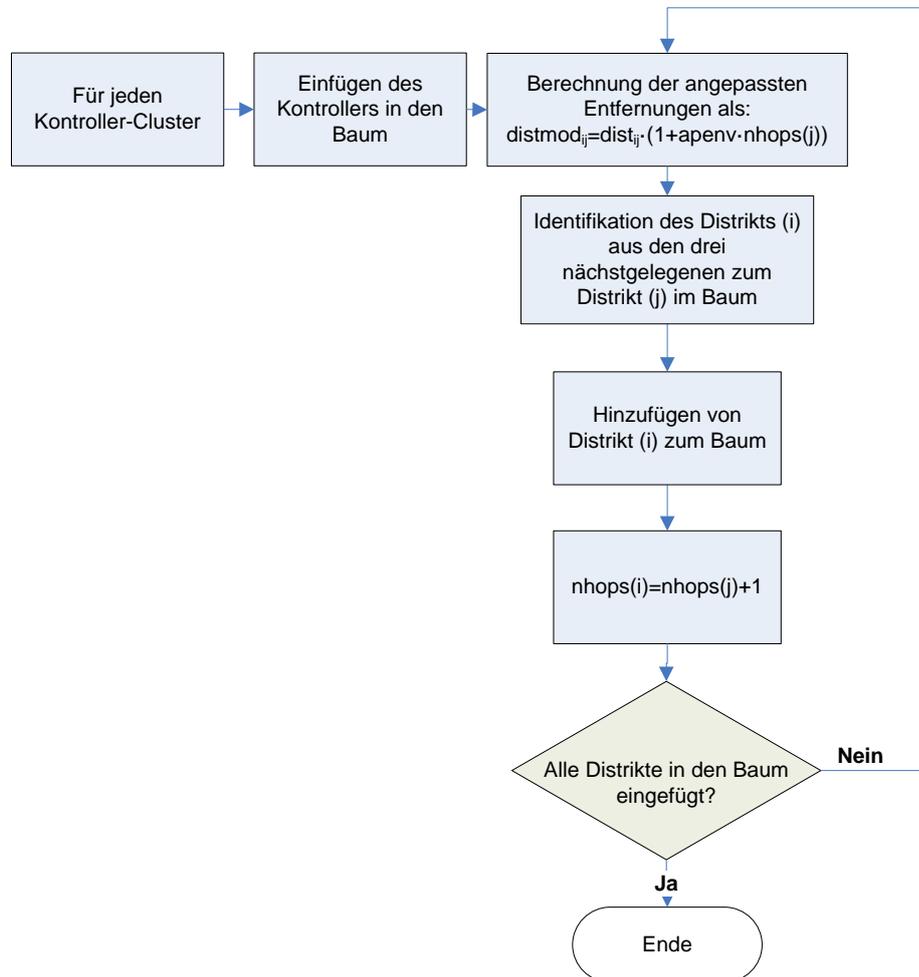
Wenn N Zellen-Hub-Standorte an einen Controller-Standort angebunden werden müssen, ergibt dies bei einer Baumstruktur, die diese Verbindungen realisiert, N-1 Kanten. Im Allgemeinen existiert eine große Anzahl unterschiedlicher Baumstrukturen, die dieses ermöglichen, wobei hier als optimale Struktur die gesucht wird, die die geringsten Kosten verursacht. Für diese Kosten gibt es wieder zwei Treiber, nämlich die aus den entsprechenden Verkehrsnachfragen resultierenden in Bandbreiten ausgedrückten erforderlichen Kapazitäten, die über die jeweiligen Kanten des Baumes geführt werden, und die Längen der Kanten. Für den Fall, dass der Kostentreiber der geografischen Entfernung keinen oder nur einen untergeordneten Einfluss hat, ergibt sich als optimale Lösung eine Topologie in Form eines Sterns, und umgekehrt, falls die längenabhängigen Kosten dominieren, ist die Topologie zu wählen, die die Entfernung

minimiert, was auf die Lösung des sogenannten Minimum Spanning Tree, d.h. eine Baumtopologie mit minimaler Gesamtlänge, hinausläuft. Eine Stern-Topologie ergibt sich in der Regel, wenn ein Betreiber auf Mietleitungen zurückgreift, die von einem Festnetzbetreiber zur Verfügung gestellt werden, während eine Baum-Topologie eingesetzt wird, wenn der Betreiber eine eigene physikalische Infrastruktur aufbaut, in der Regel durch Richtfunkssysteme, ggf. aber auch auf der Basis von Dark Fiber.

Zur Berechnung einer optimalen Baum-Topologie berücksichtigt das Modell beide Kostentreiber (Länge und erforderliche Bandbreiten-Kapazitäten). Dazu wird ein aus der Literatur bekannter Algorithmus zur Berechnung eines Baumes minimaler Länge (Minimum Spanning Tree; MST) angewendet, der dabei dergestalt angepasst wird, dass die Anzahl der Kanten zwischen den Zellen-Hubs und dem Controller Standort – auch als Tiefe bezeichnet – begrenzt wird. Um diese Tiefenbegrenzung zu erreichen, wird ein zusätzlicher Parameter eingeführt, der die Länge der Kanten künstlich erhöht, was wiederum zur Folge hat, dass die Längen der Kanten bei der Dimensionierung stärker ins Gewicht fallen. Der adäquate Wert dieses Parameters hängt hauptsächlich von der geografischen Topologie des abzudeckenden Gebietes ab, den Parametern der Übertragungssysteme, die für die Kanten eingesetzt werden, und den Kosten der in Frage kommenden Systeme, hier in erster Linie Richtfunkssysteme und Mietleitungen. Der Wert des Parameters wird exogen bestimmt unter Berücksichtigung der gerade genannten Einflussgrößen dergestalt, dass sich die kostengünstigste Lösung ergibt.

In Abbildung 3-15 wird das Flussdiagramm für den oben beschriebenen Prozess gezeigt. Weiter unten, in Abschnitt 3.3.2.2.2 zur Dimensionierung der Verbindungen zwischen Zellen-Hubs und Controllern, wird anhand eines in Abbildung 3-17 dargestellten zahlenmäßigen Beispiels der Prozess detailliert erläutert.

Abbildung 3-13: Berechnung zur Bestimmung der Topologie zwischen den Standorten von Zellen-Hubs und Controllern

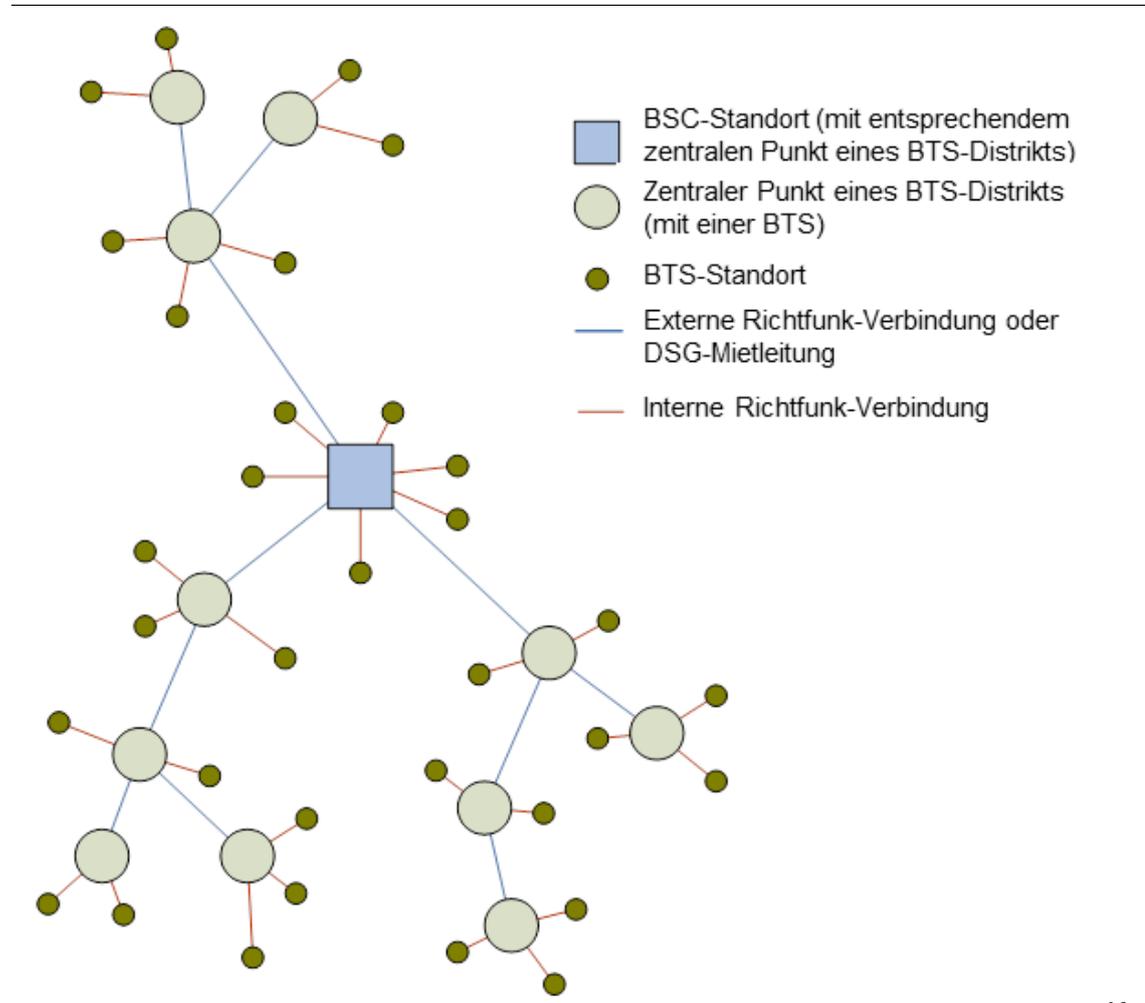


3.3.2 Topologie, Dimensionierung der Kapazitäten und Bestimmung der Systeme

3.3.2.1 Topologie

Die logische Struktur im Aggregationsnetz für die Verbindungen von den einzelnen Zellen/Basisstationen zu den Zellen-Hubs wird durch eine Stern-Struktur approximiert, wobei die entsprechenden Längen als Durchschnittswerte für jedes Untergebiet bestimmt werden. Diese Approximation ist ausreichend, da das Modell von einer gleichmässigen Verteilung der Zellen-Standorte in einem Untergebiet eines Distriktes ausgeht. Für die logische Topologie von den Hubs zu den Controllern bestehen die Optionen des Sterns und des Baums. Welche der beiden Optionen umgesetzt wird, hängt von den eingesetzten Übertragungssystemen ab. Beim Einsatz von Mietleitungen ist sowohl die logische wie die physische Topologie ein Stern; beim Einsatz von Systemen, die vom Mobilfunkbetreiber selbst errichtet werden, z.B. über Richtfunk oder Dark Fiber, ist die optimale Topologie die des Baums. Die Kapazitäten, die über diese Verbindungen geführt werden, entsprechen der Summe der Verkehre der Zellen-Hubs, die über sie an Controller angeschlossen werden. Abbildung 3-14 zeigt das Beispiel einer Baum-Topologie in einem GSM-Netz für einen Controller-Cluster von Zellen, Zellen-Hubs und der entsprechenden BSC.

Abbildung 3-14: Beispiel einer Baum-Topologie für ein Controller-Cluster, die die Standorte von Zellen, Zellen-Hubs und Controllern in einem GSM-Netz verbindet



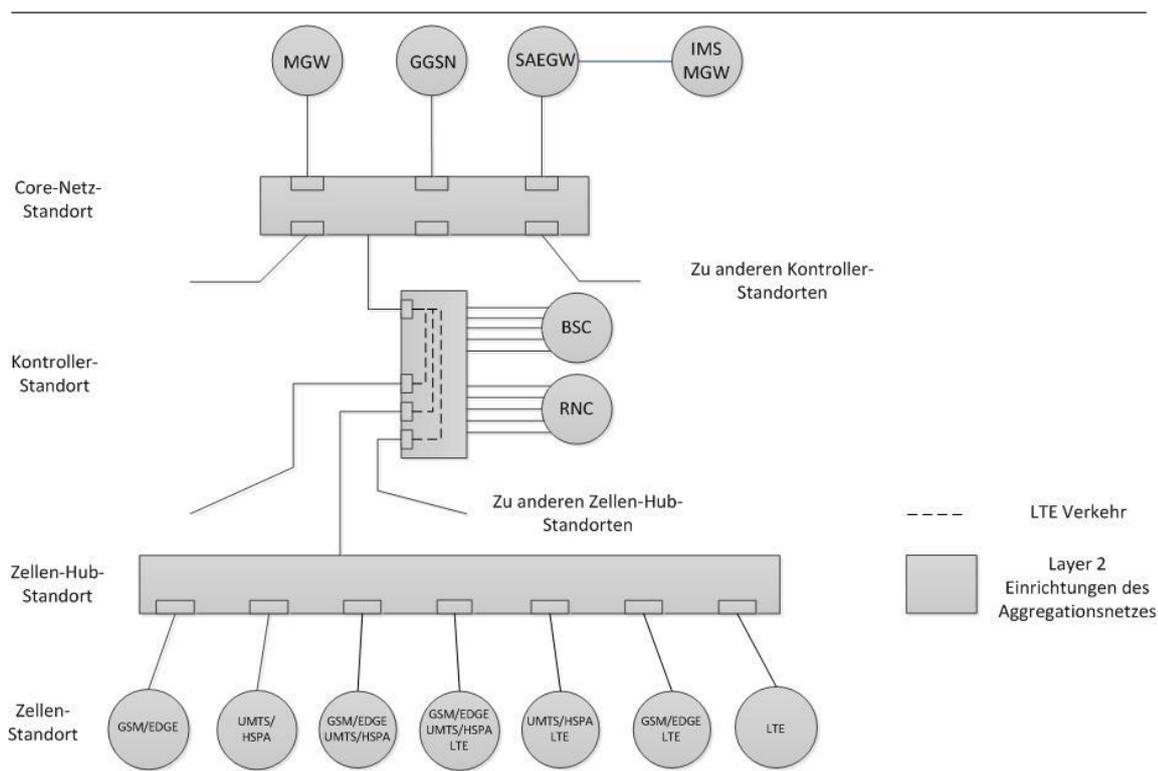
3.3.2.2 Dimensionierung

Die Information über Führung von Kapazität über Stern- oder Baumstrukturen und die Länge der Kanten sind die hauptsächlichen Informationen, die benötigt werden, um Typ und Anzahl der Systeme, mit denen die Verbindungen realisiert werden, zu bestimmen. Darüberhinaus sind sowohl auf der Ebene der Zellen-Hubs wie der Aggregations-systeme (Layer 2 Ethernet-Konzentratoren) in den Controller-Standorten, die die Signale aus allen Zelltechnologien bündeln bzw. entbündeln, zu dimensionieren.

Die Dimensionen für Verbindungen werden durch zwei Parameter erfasst: Verkehrsfluss, der in Bandbreite gemessen wird, und Entfernung. Für die Verbindungen

zwischen Hubs und Controllern berücksichtigt das Modell die konkreten Werte (Fluss und Länge) für jede individuelle Verbindung. Für die Verbindungen zwischen Basisstationen und Zellen-Hubs berechnet das Modell Durchschnittswerte für die Entfernung, wobei berücksichtigt wird, dass die Standorte der einzelnen Basisstationen im Modell nur annähernd bestimmbar sind (was jedoch für die Bestimmung der Kosten von untergeordneter Bedeutung ist). Die Einzelheiten zur Bestimmung des Flusses auf den Basisstationen-Hub-Verbindungen variieren danach, ob es sich nur um Verkehr von GSM und UMTS handelt, oder auch Verkehr von HSPA und LTE hinzukommt; sie werden in dem entsprechenden nachfolgenden Unterabschnitt beschrieben. Abbildung 3-15 zeigt die hauptsächlichen Komponenten eines Mobilfunknetzes in Form von Einrichtungen der Schicht 2 und Verbindungen zwischen den hauptsächlichen Einrichtungen.

Abbildung 3-15: Hauptkomponenten eines Aggregationsnetzes, basierend auf Release 10 des 3GPP



Die Dimensionierung und Zuweisung von Systemen erfolgt in den folgenden Schritten:

- Dimensionierung der Verbindungen von den einzelnen Zellen/Basisstationen zu den Zellen-Hubs und die Zuweisung der entsprechenden Übertragungssysteme,

- Dimensionierung der Verbindungen von den Zellen-Hubs zu den Controllern und die Zuweisung der entsprechenden Übertragungssysteme, und
- Dimensionierung der Aggregations-Systeme sowohl an den Hub-Standorten wie den Standorten der Controller sowie Dimensionierung der Controller-Einrichtungen (BSC, RNC).

Einzelheiten werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Später in diesem Dokument wird ausgeführt, dass die Dimensionierung der Einrichtungen durch generische Parameter geschieht, so dass verschiedene Arten der Realisierung (Mietleitungen oder eigene Infrastruktur z.B. in Form von Richtfunk) ermöglicht werden.

3.3.2.2.1 Dimensionierung der Verbindungen zwischen den Standorten der Zellen und Zellen-Hubs sowie Systemzuweisung

Aus der Zellenplanung liegen für jeden Distrikt die folgenden Informationen vor, welche für die Dimensionierung der einzurichtenden Systeme erforderlich sind:

- Anzahl der reinen GSM-, reinen UMTS/HSPA- und reinen LTE- sowie der hybriden Zellen jeweils für innerstädtische, vorstädtische und ländliche Gebiete sowie
- Radius der Zellen in den verschiedenen Gebieten.

Diese Informationen erlauben es, für jedes Untergebiet eines Distrikts die durchschnittliche Länge der Kanten von den Standorten der verschiedenen Zellen zum Standort des Zellen-Hub zu bestimmen.

Die Übertragungssysteme unterscheiden sich danach, ob sie Basisstationen für GSM (BTS), UMTS/HSPA (NodeB) oder LTE (eNodeB) mit dem Zellen-Hub verbinden; deren Bandbreitenanforderungen sind dementsprechend unterschiedlich abzuleiten. Für Bandbreitenanforderungen von hybriden Zellen werden gemeinsame Übertragungssysteme eingerichtet.

Es wird angenommen, dass die Schnittstellen für GSM-Basisstationen (BTS) auf E1-Signalen basieren und die für UMTS/HSPA- und LTE-Basisstationen (NodeB, eNodeB) auf IP/Ethernet Karten, mit 100 Mbps bzw. 1000 Mbps, wenn HSPA bzw. LTE eingesetzt wird. Diese Schnittstellen können entweder bereits in den Basisstationen integriert sein oder einen Adapter benötigen. Im Falle von hybriden Zellen ist immer ein Adapter erforderlich, der die Signale von den verschiedenen Basisstationen (GSM, UMTS/HSPA, LTE) auf eine gemeinsame Übertragungskapazität aggregiert.

Von der Zellenplanung folgt für die GSM-Basisstationen, dass deren Höchstzahl für TRX $3 \times 3 = 9$ ist und somit eine Standard-E1-Verbindung immer ausreicht, um den Verkehr einer Basisstation zum Zellen-Hub zu bewältigen. Der aggregierte Verkehr in einem Zellen-Hub resultiert aus der Summe der Verkehre aus den verschiedenen BTS in einem Distrikt und entspricht höchstens der Kapazität einer E1 multipliziert mit der Anzahl der Zellen.

In Bezug auf Basisstationen mit UMTS/HSPA bzw. LTE berechnet das Modell die erforderlichen Kapazitäten auf der Basis der Anzahl der Nutzer und der gesamten Bandbreite als Ergebnis des aus der Zellenplanung einer Funkzelle sich ergebenden Verkehrs und dessen durchschnittlicher Bandbreite, die sich aus den jeweils zu integrierenden Diensten ergibt.

Es wird angenommen, dass die Schnittstellen für Basisstationen mit UMTS/HSPA bzw. LTE auf IP/Ethernet basieren und dass diese Schnittstellen in den Basisstationen integriert sind. Die QoS-Anforderungen an die verschiedenen Verkehrs-Klassen werden in durchschnittliche Verzögerungen von Eintritt des Signals in das Netz bis zu seinem Ausgang aus dem Netz ausgedrückt. Diese Verzögerungen werden hauptsächlich durch die Layer 2-Einrichtungen und die sie verbindenden Übertragungssysteme auf den unteren Netzebenen (vor allem von den Funkzellen zu den Zellen-Hubs) verursacht, da die Systeme entsprechend den tatsächlich benötigten Bandbreiten dimensioniert werden und noch im Mbps-Bereich liegen, während die Kapazitäten der höheren Netzebenen vor allem im Backhaul- und Core-Netz sich in Gigabit-Domänen befinden, so dass deren Anteil an Verzögerungen nicht signifikant ist.

Der hauptsächliche Ansatz der Betreiber, die QoS-Anforderungen der verschiedenen Verkehrsklassen zu erfüllen, besteht darin, die Auslastung ihrer Systeme auf ein bestimmtes Maß zu begrenzen. Um dem zu entsprechen, berücksichtigt das Modell für jede Netzebene oberhalb des Radiozugangsnetzes einen Auslastungsfaktor, der vom Nutzer als ein Parameterwert einzugeben ist. Daraus folgt, dass die aggregierte Bandbreite auf jedem Übertragungsweg mit einem globalen Mark-up-Faktor multipliziert wird, der dem inversen Wert des eingestellten Auslastungsfaktors entspricht. Der Frage, wie allgemein den QoS-Anforderungen entsprochen werden soll, wird in Abschnitt 3.6 nachgegangen.

Wie bereits ausgeführt, wird für die Verbindungen zwischen den einzelnen Zellen und den Zellen-Hubs eine reine Stern-Topologie implementiert. Dies ist eine Annäherung an die Realität, die durch folgende Überlegungen gerechtfertigt wird:

- Die genauen Standorte der Zellen werden vom Modell nicht bestimmt, da dies für den Zweck des Modells nicht erforderlich ist und auch nicht geleistet werden könnte. Es wird unterstellt, dass die Standorte innerhalb jedes Untergebietes eines Distriktes symmetrisch verteilt sind.

- Es ist einleuchtend und hat sich in den Anwendungen früherer Modelle bestätigt, dass die Kostenunterschiede, die durch Unterschiede in den Standorten der Basisstationen verursacht werden, statistisch gesehen sich fast vollständig gegenseitig neutralisieren, und was bleibt in keiner Weise signifikant ist.
- Wegen der Annahme über die geografische Verteilung der Basisstationen wäre eine andere Topologie als die des Sterns willkürlich. Die Kosten der Übertragungssysteme zwischen Basisstationen und den Hubs machen nur einen geringen Teil der gesamten Kosten aus, wobei einerseits die auf der Basis einer Stern-Topologie eine Obergrenze ausmachen, die andererseits durch eine Optimierung nur geringfügig gesenkt werden könnte.

Die Kapazitäten der Verbindungen zwischen Basisstationen und Hubs werden für GSM-Basisstationen durch E1-Systeme bereitgestellt. Für UMTS/HSPA- bzw. LTE-Basisstationen werden die Kapazitäten durch äquivalente Bandbreiten dargestellt, die bereits bei der Dimensionierung der Zellen-Hubs bestimmt worden sind. Für hybride Zellen werden diese Kapazitäten in einem entsprechenden Layer 2-Adapter aggregiert und daraus die gemeinsame Bandbreite für die Verbindung zum Zellen-Hub bestimmt. Dabei wird angenommen, dass der Adapter ein integrierter Bestandteil der Einrichtungen der Basisstation ist.

Die Kapazitäten für die Verbindungen von den Basisstationen zu den Zellen-Hubs können wahlweise über Richtfunk-Einrichtungen oder Mietleitungen realisiert werden. Der Modellnutzer kann die dazu verwendete Übertragungstechnologie durch einen entsprechenden Eingabeparameter vorgeben. Falls eine Mischung von Richtfunk und Mietleitungen installiert werden soll, kann dies ebenfalls durch Eingabeparameter, von denen einer die jeweiligen Anteile der beiden Technologien vorgibt, bestimmt werden.

3.3.2.2.2 Dimensionierung der Verbindungen zwischen Zellen-Hubs und Controllern und Zuordnung der Systeme zu diesen Verbindungen

Wie bereits ausgeführt, werden die benötigten Kapazitäten durch die Breitbandanforderungen in den Zellen-Hubs bestimmt. Bezüglich der Topologie für diese Verbindungen kommen die Stern- und die Baum-Struktur in Frage. Wie bereits ausgeführt, ist der Stern ein Spezialfall des Baums, wobei im Modell die Wahl zwischen Stern- und Baumstruktur durch einen exogen einzugebenden Parameter erfolgt, (siehe Abschnitt 3.3.2.1). Wenn eine Sternstruktur gewählt wird, entspricht die Kapazität jeder Verbindung im Stern der Kapazität des angeschlossenen Zellen-Hub, bei Wahl eines Baums entspricht die Kapazität eines Baumes der Summe der Kapazitäten der angeschlossenen Hubs.

Nachdem die Kapazitäten in der Form von äquivalenten Breitbandanforderungen für jede Verbindung in der Topologie bestimmt worden sind, bestimmt das Modell die

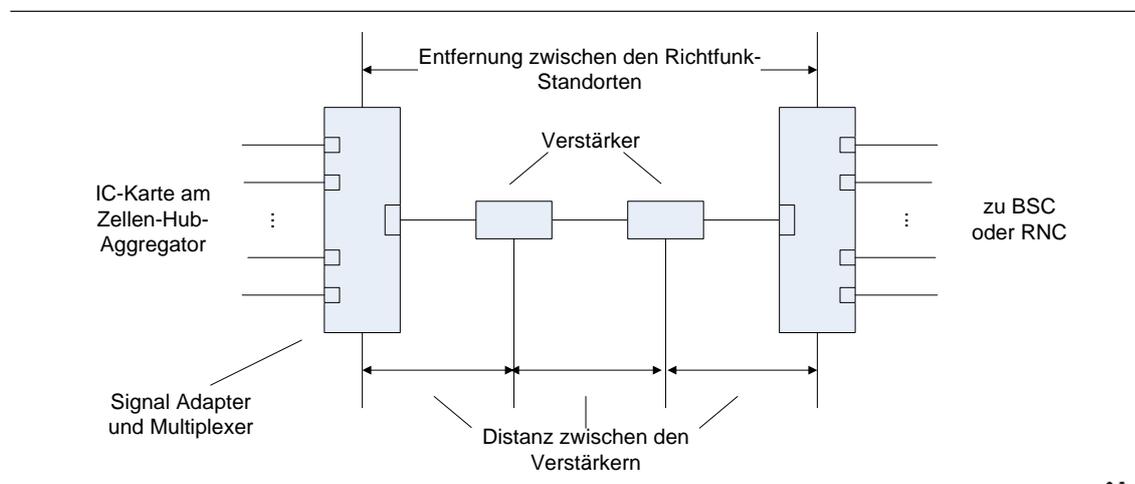
Systeme für diese Verbindungen im Wesentlichen auf die gleiche Art und Weise wie für die Verbindungen zwischen Basisstationen und Hubs (siehe vorangegangenen Abschnitt).

3.3.2.2.1 Dimensionierung für eine Sternstruktur und entsprechende Zuordnung der Systeme

Bei einer Sternstruktur wird die Kapazität zwischen einem Zellen-Hub und dem entsprechenden Controller als die Summe der Kapazitäten der einzelnen Zellen ermittelt. Die sich ergebende durchschnittliche Bandbreite wird durch einen globalen Mark-up-Faktor $g\text{MuF}$ erhöht. Dieser $g\text{MuF}$ ist erforderlich, da im Festnetzteil die Informationen in Form von Schicht-2-Rahmen, typischerweise Ethernet, übertragen werden und eine zu hohe Auslastung der Verbindungen zu einer erhöhten Laufzeitverzögerung oder aber zu einem Wartespeicherüberlauf führen würde.

Für die Realisierung der physischen Verbindungen in einer Sternstruktur kommen sowohl Mietleitungen oder vom Betreiber selbst errichtete Punkt-zu-Punkt-Übertragungssysteme auf der Basis von Richtfunk zum Einsatz. In Abhängigkeit von der Entfernung sind dabei Repeater einzusetzen. Bei Einsatz von Dark Fiber kann eine direkte Verbindung auf der Ebene von Schicht 2 (zwischen den beiden Ports der entsprechenden Geräte der Schicht 2) eingesetzt werden, ohne dass zusätzliche Übertragungssysteme verwendet werden. In ein Richtfunk-Übertragungssystem wird ein Adapter integriert, der das Träger-Signal in das vom Übertragungssystem benötigte Signal umwandelt. Im Fall, dass mehr als ein Träger-Signal transportiert werden muss, wird dieser Adapter durch einen Multiplexer realisiert. Abbildung 3-16 zeigt schematisch die Elemente einer solchen physischen Verbindung.

Abbildung 3-16: Hauptsächliche Komponenten einer physischen Verbindung in einer Sternstruktur zwischen Zellen-Hub und Controller



Die Zuweisung von Übertragungssystemen zu den Verbindungen geschieht nach gleichen Kriterien wie für die Verbindungen zwischen Basisstationen und Zellen-Hubs. Die Inputs, die vom Aggregator am Zellen-Hub zur Verfügung gestellt werden und die die Systemzuweisung dominieren, sind:

- Gesamte zu transportierende äquivalente Bandbreite zwischen dem gegebenen Zellen-Hub und dem entsprechenden Controller und
- Entfernung der Sternverbindung zwischen Zellen-Hub und Controller.

Tabelle 3-1 zeigt die Parameterwerte einer Liste von verschiedenen System-Konstellationen, die für die Systemzuweisung in Frage kommen.

Tabelle 3-1: Beispiel von möglichen Übertragungssystemen für die Verbindung von Zellen-Hubs mit dem entsprechenden Controller

Merkmale des Systems	Index des System-Typs			
	1	2	3	4
	Mögliche Werte der Merkmale			
Maximale Netto-Bandbreite (Mbps)	8	32	140	560
BWport [Mbps]	100	100	1000	1000
Maximale Länge (km)	50	50	50	50
Als Parameter einzusetzender Schwellenwert, der die Anzahl der Systeme angibt, ab dem aus Kostengründen das nächsthöhere System einzusetzen ist	3	3	3	

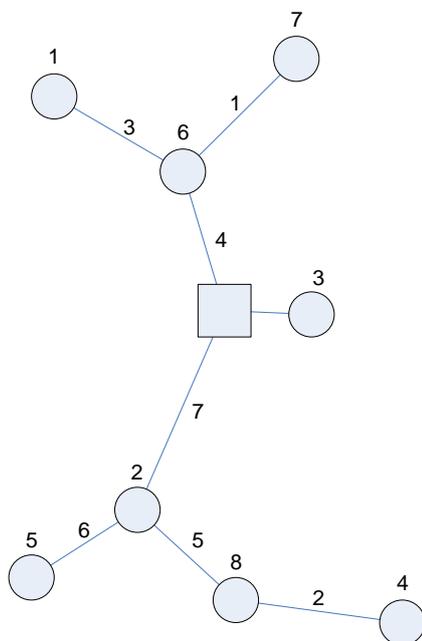
3.3.2.2.2 Dimensionierung für eine Baumstruktur und entsprechende Zuordnung der Systeme

Bei Verwendung einer Baum-Topologie muss die konkrete Baumstruktur vorliegen, entlang der die Übertragungssysteme zur Verbindung der Zellen-Hubs mit den Controllern zu dimensionieren sind. Diese Struktur wird durch das in Abschnitt 3.3.1.2 beschriebene Verfahren zur Verfügung gestellt.

Abbildung 3-17 zeigt ein Beispiel für die Anwendung des in Abschnitt 3.3.1.2 beschriebenen Algorithmus, wobei die 7 Zellen-Hub-Standorte (Distrikte) mit dem durch ein Quadrat gekennzeichneten Controller-Standort, der am Standort des Distrikts 3 liegt, mittels einer Baumstruktur verbunden werden. Aus der Abbildung ergibt sich, dass der Standort 4 mit einer Tiefe von drei Kanten, die Standorte 1, 7, 5 und 8 mit einer Tiefe von jeweils zwei Kanten und die Standorte 2 und 6 mit einer Tiefe von nur einer Kante

mit dem Controller-Standort verbunden sind. Die Legende zeigt die Datenstruktur, die benötigt wird, um die entsprechende Verkehrsführung vom Zellen-Hub zum Controller-Standort vorzunehmen. Dazu wird jedem Distrikt ein „Pointer“ auf den nächsten Distrikt und auf die zugehörige Kante in Richtung des Controller-Standortes zugeordnet. Um die Verkehrsnachfrage von Distrikt 7 zum Controllerstandort zu führen, ist diese zunächst der Kante 1 zuzuschlagen, und der Prozess ist vom nächsten Distrikt mit Nummer 6 über die Kante 4 fortzusetzen. Der nächste Distrikt ist Nummer 3 und damit ist der Controller-Standort erreicht, was durch eine 0 im „Pointer“ auf dem nächsten Distrikt gekennzeichnet wird.

Abbildung 3-17: Beispiel einer Baumstruktur des Aggregationsnetzes mit einem Controller und der zugeordneten Zellen-Hubs und Verbindungen



Legende								
Index des betrachteten Distrikts	1	2	3	4	5	6	7	8
Index des nächsten Distrikts auf dem Weg zum Controller	6	3	0	8	2	3	6	2
Index des Hop	3	7	0	2	6	4	1	5

Der entsprechende Routing-Algorithmus führt die in den Zellen-Hubs aggregierten Verkehre in Form ihrer Breitbandanforderungen über die Verbindungen des Baumes zum Controller, wodurch sich nach Abschluss des Routing-Algorithmus die Bandbreitenanforderungen je Baumkante ergeben.

Die Konfiguration der Zellen-Hub-Aggregationssysteme geschieht vergleichbar zu der für eine Stern-Topologie, wobei allerdings der zusätzliche Transit-Verkehr, der sich aus dem Routing Algorithmus ergibt, berücksichtigt wird. Die Zuweisung der Übertragungssysteme erfolgt je Baumkante in gleicher Weise wie für die Stern-Topologie.

3.3.2.2.3 Dimensionierung der Aggregations-Systeme und der Controller

Die Dimensionierung der Aggregationssysteme findet auf Basis ihrer Treiber statt. Diese sind für die Aggregationssysteme die gesamte Bandbreite und die Anzahl der erforderlichen Ports sowie deren Bandbreite.

3.3.3 Dieses Netzsegment im Fall eines reinen LTE-Netzes

Wie in Abschnitt 3.2 ausgeführt, verbleibt in einem reinem LTE-Netz für das hier betrachtete Netzsegment die Aufgabe der Heranführung des Verkehrs an die Konzentrationspunkte, an denen der Verkehr auf dem Weg zu bzw. von den Einrichtungen des Core-Netzes gebündelt bzw. entbündelt wird. Auch hierfür ist die Anzahl der entsprechenden Standorte vom Modellnutzer vorzugeben, während deren geografische Lage vom Modell bestimmt wird. Dabei werden vergleichbare Kriterien herangezogen wie bei der Bestimmung der Controller-Standorte. Allerdings wird bei einem reinen LTE-Netz nur das Transportnetz optimiert und nicht wie im GSM/UMTS-Netz auch die Controller-Einrichtungen (BSC und RNC). Aus methodischer Sicht erfolgt damit die Modellierung der Aggregations- und Übertragungssysteme entsprechend denselben Planungs- und Dimensionierungsregeln wie im Falle des Aggregationsnetzes für eine hybrides Netz. Der Unterschied besteht allerdings darin, dass ein reines LTE-Netz nur unter stark erhöhten Bandbreitennachfragen aus den Nutzerverkehren sinnvoll eingesetzt wird und damit die anzuwendenden Systeme entsprechend bestimmt werden müssen. Dies ist im Modell ohne Weiteres möglich, da die Wahl der zu verwendenden Transportsysteme durch entsprechende Parametrisierung vorgenommen werden kann. So würden in einem reinen LTE-Netz kaum Richtfunk-Systeme zum Einsatz kommen sondern vornehmlich auf Glasfaser basierende Systeme, die im Modell als Mietleitungen modelliert werden.

3.4 Backhaul-Netz

Das Backhaul-Netz verbindet in einem GSM- und UMTS-Netz die Controller-Standorte mit den Vermittlungs- und Routing-Einrichtungen, die auf der Ebene des Core-Netzes angesiedelt sind. In einem LTE-Netz ist (siehe Abschnitt 3.2) das vergleichbare Netzsegment Teil des Transportnetzes, das den LTE-Verkehr zwischen den Konzentrationspunkten und den Einrichtungen des Core-Netzes führt, wobei das Modell

für ein hybrides Netz (gemeinsamer Einsatz von GSM-, UMTS/HSPA- und LTE-Technologien) Kollokation der Konzentrationspunkte mit den Controller-Standorten annimmt. Der vorliegende Abschnitt befasst sich mit der Modellierung des Backhaul-Netzes in Bezug auf ein GSM- und UMTS-Netz. Wie beim Aggregationsnetz wird dabei der LTE-Verkehr für die Planung der Verkehrssysteme mit einbezogen. Im abschließenden Abschnitt 3.4.3 wird dann gezeigt, welche der für dieses Netzsegment modellierten Netzelemente relevant sind, wenn das modellierte Mobilfunknetz ein reines LTE-Netz (ohne Controller-Funktionalitäten) ist.

Die Planung des Backhaul-Netzes beinhaltet:

- Wahl der Standorte für Systeme des Core-Netzes als eine Untermenge der Standorte der Controller-Einrichtungen,
- Zuordnung der Standorte der Controller-Einrichtungen zu den Standorten des Core-Netzes und
- Dimensionierung und Zuweisung der Systeme.

3.4.1 Bestimmung der Standorte für Core-Netz-Funktionen

Die Herangehensweisen an die Wahl der Standorte der Core-Netz-Einrichtungen und die Zuordnung der Standorte der Controller-Einrichtungen zu ihnen sind ähnlich wie im Fall des Aggregationsnetzes (siehe Abschnitt 3.3.1). Die gleichen Algorithmen werden angewendet mit ähnlichen Anpassungen über Mindestentfernungen zwischen Standorten der verschiedenen Core-Netz-Funktionen und der Festlegung von Kapazitätsgrenzen in Bezug auf die Anzahl der Controller, die jeweils einer Core-Netz-Einrichtung zugeordnet werden kann. Es wird zusätzlich vorgesehen, dass zur Erhöhung der Sicherheit und Ausfallvermeidung jeder Controller-Standort zwei Core-Netz-Standorten zugeordnet werden kann. Für diesen Fall kann durch Festlegung eines Parameters die Kapazität dieser Verbindungen im Intervall zwischen 50 % und 100 % festgelegt werden, sofern Mietleitungen eingesetzt werden. Bei Einsatz von Richtfunkverbindungen über eine Ringtopologie kann aus technischen Gründen nur zwischen 50 % oder 100 % gewählt werden.

3.4.2 Topologie, Dimensionierung und Bestimmung der Systeme

3.4.2.1 Topologie

Für die physikalische Topologie bestehen die Optionen des Sterns oder des Rings. Wenn bei der Wahl eines Sterns die Implementierung über Mietleitungen erfolgt, erfolgt

die physische Topologie ebenfalls in der Form eines Sterns, wobei die Bandbreiten, die für die Verbindungen benötigt werden, den Typ der jeweiligen Mietleitung bestimmen. Wenn die Standorte des Backhaul-Netzes mit zwei Standorten des Core-Netzes verbunden werden, wird das physische Netz entweder als Doppelstern über Mietleitungen oder in der Form von Ringen über Richtfunk-Systeme oder Mietleitungen mit entsprechenden ADM/ROADM Einrichtungen realisiert.

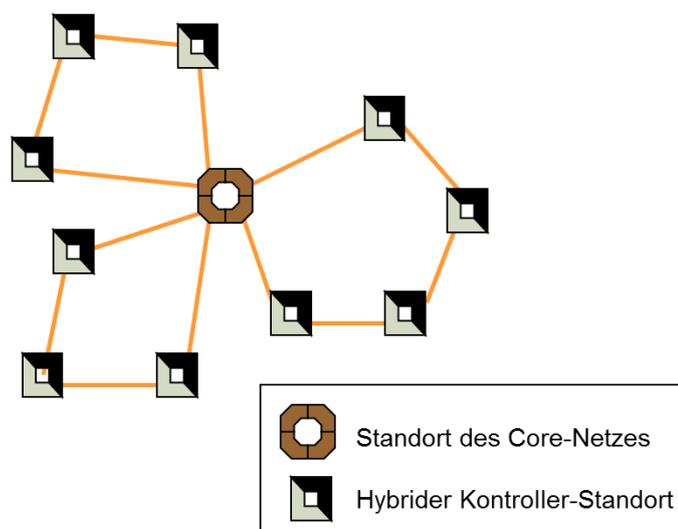
Eine Ring-Topologie kann entweder über ADM/ROADM-Einrichtungen mit einer Sicherheit von entweder 50 % oder 100 % realisiert werden, oder über Ethernet mit einem Grad an Sicherheit zwischen 50 % und 100 %. Dabei können als physische Systeme entweder Richtfunk oder Mietleitungen eingesetzt werden.

Das Modell sucht für die Ring-Topologie Verbindungen, die die von den Längen abhängigen Kosten minimieren und berechnet deshalb Ringe, die die Gesamtlänge minimieren. Dazu wird ein Algorithmus für die Lösung des Travelling Salesman Problem eingesetzt. Zusätzlich berücksichtigt das Modell, dass zum Zwecke der Ausfallvermeidung die Anzahl der Knoten in dem Ring begrenzt wird. Der spezielle Algorithmus, der dafür herangezogen wird, ist als "Shamrock Algorithmus" bekannt, der aus zwei Schritten besteht:

- Bestimmung der Cluster, die demselben Ring zugeordnet werden, und
- Berechnung der Topologie für jeden Ring.

Abbildung 3-18 zeigt das Beispiel eines Backhaul-Netzes, das aus drei Ringen besteht, wobei die Anzahl der Controller in einem Ring auf vier begrenzt ist.

Abbildung 3-18: Beispiel für die Topologie eines Backhaul-Netzes



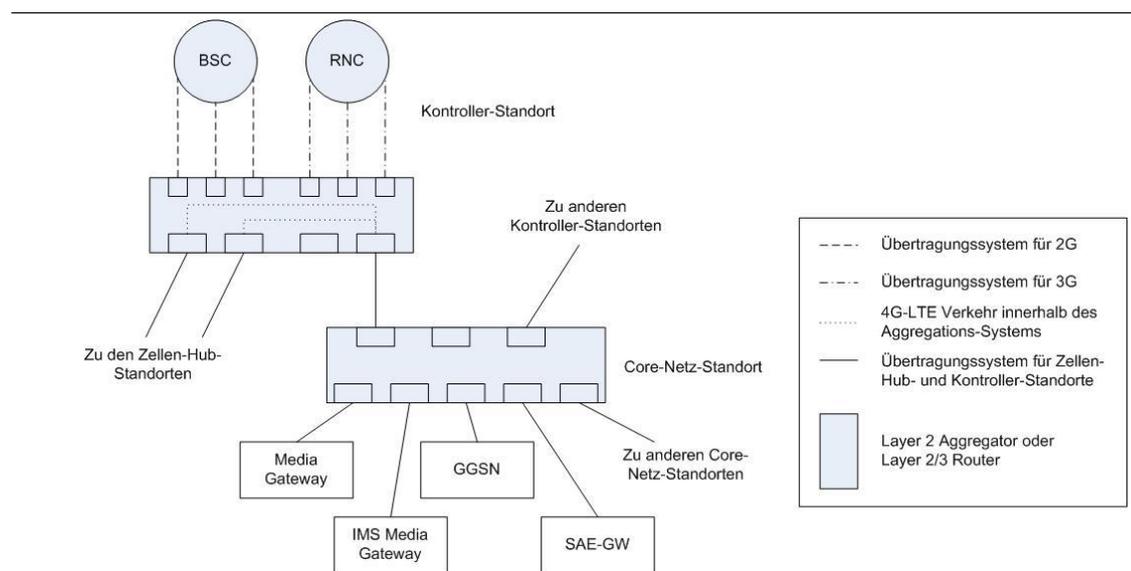
3.4.2.2 Dimensionierung

Die Dimensionierung des Backhaul-Netzes betrifft die folgenden Netzkomponenten:

- Die Aggregations-Systeme an den Controller-Standorten,
- die Controller-Einrichtungen, BSC für GSM und RNC für UMTS und
- die Übertragungssysteme, die die Standorte mit den Standorten des Core-Netzes verbinden.

Abbildung 3-19 gibt einen Überblick über die wesentlichen Komponenten des Backhaul-Netzes. Das Modell verfährt wie bei der Dimensionierung des Aggregationsnetzes. Wie dort werden dabei Tabellen genutzt, nach deren Angaben Systeme ausgewählt werden, die für die zu realisierenden Verkehrsflüsse die erforderliche Kapazität zur Verfügung stellen.

Abbildung 3-19: Das Backhaul-Netz mit seinen wesentlichen Komponenten



3.4.2.2.1 Dimensionierung der BSC und RNC

Aus den Verkehrsflüssen auf den Verbindungen von den Zellen-Hubs zu den Controllern ergeben sich die Kapazitätsanforderungen für die Dimensionierung der Controller-Einrichtungen. Bei der Dimensionierung der BSC und RNC wird eine maximale Ausnutzung der Systeme (Nutzungsfaktor) berücksichtigt, da die Betreiber bei der Dimensionierung üblicherweise freie Kapazitäten für unvorhergesehene Verkehrszuwächse bereit halten.

Die Dimensionierung der BSC für 2G GSM erfolgt auf der Basis einer Kombination folgender Variablen:

- Anzahl der BTS, die an einer BSC aggregiert werden,
- die Gesamtzahl der Nutzer, die in den entsprechenden Basisstationen versorgt werden und
- maximale Anzahl der aktiven Verbindungen (in Slot-Einheiten aus den aggregierten TRX).

Für jede BSC wird eine PCU Einrichtung vorgesehen, über die der aus den BTS kommende Datenverkehr an die SGSN abgeleitet wird.

Tabelle 3-2 zeigt das Beispiel einer Dimensionierung an einem Controller-Standort, für den mehrere Einheiten desselben BSC-Typs zur Verfügung stehen, um eine bestimmte Kapazität zu bewältigen. Die vier Parameter, die zur Dimensionierung herangezogen werden, sind stark miteinander korreliert, so dass für verschiedene auf dem Markt erhältliche Produkte nicht Werte für alle Parameter zur Verfügung stehen. In diesem Fall sind die fehlenden Parameter nicht zu berücksichtigen, was heißt, dass für diese Parameter die maximal erlaubten Werte sehr hoch angesetzt werden, so dass sie keinen Einfluss auf die Dimensionierung ausüben.

Tabelle 3-2: Beispiel einer Dimensionierung eines BSC-Standortes, für den mehrere Einheiten desselben BSC-Typs zur Verfügung stehen

Merkmale eines BSC-Standortes	BSC-Typ		
	1	2	3
	Mögliche Werte der Merkmale		
Maximal erlaubte Anzahl der BTS	200	400	600
Maximal erlaubte Anzahl der Nutzer	$8.6 \cdot 10^5$	$17.2 \cdot 10^5$	$25.8 \cdot 10^5$
Maximal erlaubte Anzahl der aktiven Verbindungen	$1.44 \cdot 10^4$	$2.88 \cdot 10^4$	$4.32 \cdot 10^4$
Als Parameter einzusetzender Schwellenwert, der die Anzahl der Systeme angibt, ab dem aus Kostengründen das nächst höhere System einzusetzen ist	2	2	

Die Dimensionierung der RNC erfolgt nach demselben Ansatz wie die der BSC bei GSM unter Berücksichtigung folgender Kostentreiber:

- Aggregierter leitungsvermittelter Verkehr (vor allem Sprache),
- aggregierter paketvermittelter Verkehr und

- aggregierte Anzahl von Ports für 10, 100 und ggf. 1000 Mbps.

Tabelle 3-3 weist die wesentlichen Kostentreiber für die Dimensionierung von BSC und RNC aus sowie die Auslastungsgrade, mit denen sie im Modell eingestellt werden. Dabei basiert der Auslastungsgrad für RNC auf Informationen von den Betreibern.

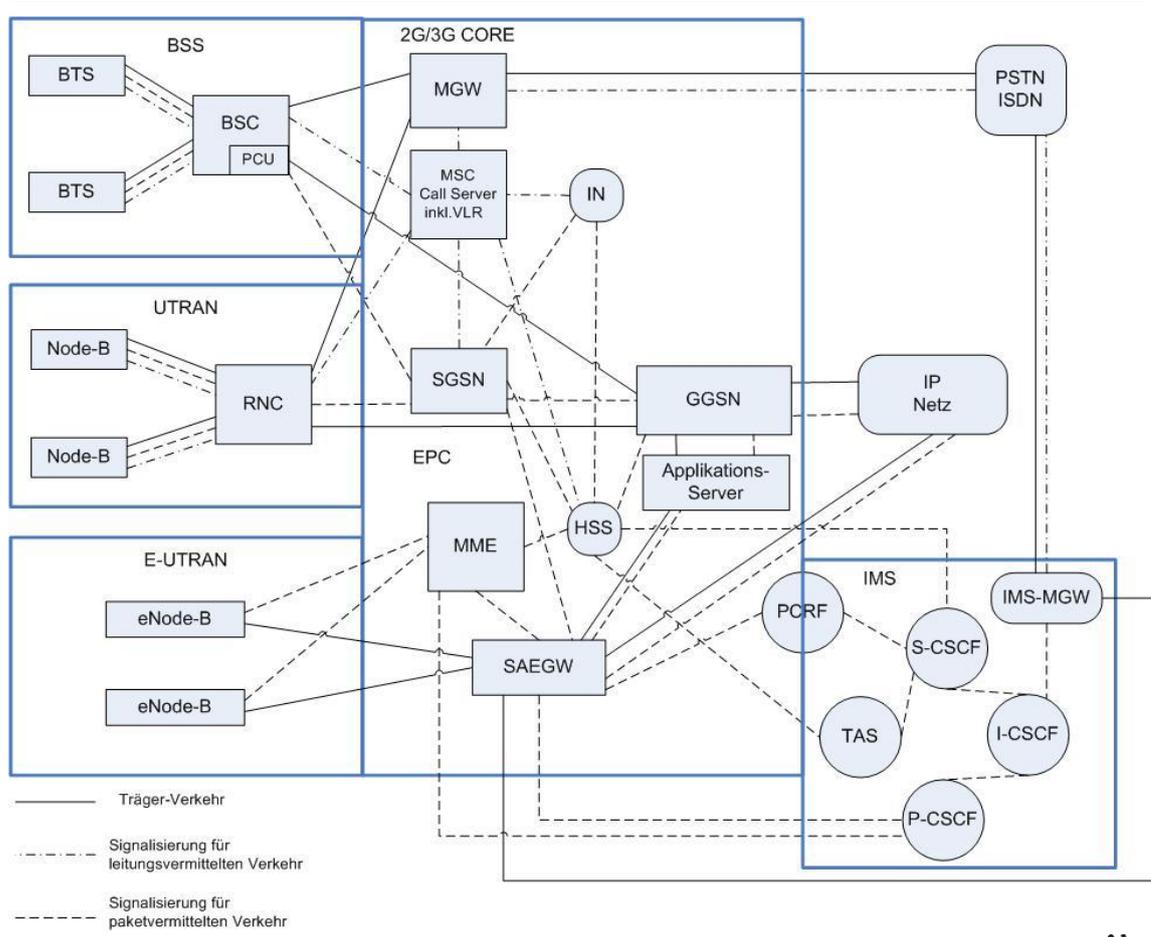
Tabelle 3-3: Kostentreiber für BSC und RNC und typische Auslastungsgrade

Kontroller-Typ	Kostentreiber	Auslastungsgrad
BSC	Anzahl der TRX von allen angeschlossenen BTS	80 %
RNC	(a) Aggregierter Sprachverkehr während der Spitzenlastzeit (b) Aggregierte Anzahl von 10, 100 oder 1000 Mbps-Schnittstellen (c) Aggregierte Paketverkehrs-Leistung in Mbit/s	80 %

3.4.2.2.2 Dimensionierung der Verbindungen von den Controllern zu den Einrichtungen des Core-Netzes

Bei der Dimensionierung der Kapazitäten für die logischen Verbindungen zum Core-Netz geht das Modell davon aus, dass der gesamte GSM/UMTS-Nutzerverkehr für leitungsvermittelte Dienste, hauptsächlich Sprache, zu den Media Gateways (MGW) an den entsprechenden Core-Netz-Standorten geführt wird, während der Signalisierungsverkehr zu den MSC Call Server läuft. Sowohl Nutzerverkehr wie Signalisierungsverkehr des 2G-paketvermittelten Verkehrs wird über sogenannte Packet Control Units (PCU) des BSC zum Gateway GPRS Support Node (GGSN). Für den 3G-paketvermittelten Verkehr laut UMTS Release 6 gilt der selbe Verkehrsfluss. Für den 3G-paketvermittelten Verkehr über HSPA wird im Modell Direct Tunnel unterstützt, indem dieser Verkehr den SGSN umgeht und direkt zwischen einem RNC und einem GGSN geführt wird. Wir zeigen hier noch mal als Abbildung 3-20 die bereits in Abschnitt 2.1 gezeigte Abbildung, die die entsprechenden funktionalen Blöcke im logischen Netz aufweist. Bei der Dimensionierung der physischen Verbindungen zwischen den Aggregations-Einrichtungen an den Controller- und Core-Netz-Standorten wird der Signalisierungsverkehr vernachlässigt, da die dafür erforderlichen Bandbreiten gering gegenüber denen aus dem Nutzerverkehr sind und durch die vorgesehenen Reservekapazitäten abgedeckt werden. Die erforderlichen Bandbreiten, die sich aus dem LTE-Verkehr ergeben, werden in gleicher Weise wie die Bandbreiten aus den GSM- und UMTS- Verkehren behandelt.

Abbildung 3-20: Logische Verbindungen zwischen den Funktionsblöcken an den Controller-Standorten und denen an den Standorten des Core-Netzes, basierend auf Elementen von Release 4 bis 10 des 3GPP



Für die Determinierung der Übertragungssysteme für entweder Stern- oder Ringstrukturen sind dieselben Aufgaben zu erfüllen, für die dann dieselben Algorithmen eingesetzt werden, wie bei der Dimensionierung und der Zuweisung von Systemen für das Aggregationsnetz (siehe Abschnitt 3.3.2.2.1 und 3.3.2.2.2).

Für eine Sternstruktur beinhaltet die Dimensionierung folgende Aufgaben:

- Determinierung der jeweilig gesamten Bandbreiten-Anforderung für jede Stern- oder Doppelstern-Verbindung;
- Erhöhe sie mit einem Mark-up-Faktor, der die Begrenzung in der Ausnutzung der Systeme beschreibt¹⁶ und der vom Nutzer für diese Netzebene festgelegt worden ist;
- Berechne den Mark-up-Faktor (qMUF) und die äquivalente Bandbreite, die sich aus den Qualitätsanforderungen für den Verkehr jeder Dienste-Kategorie ergeben (hierzu siehe Abschnitt 3.6);
- Bestimme die Dimensionierung der Stern-Verbindungen auf der Basis einer Dimensionierungstabelle, die für jeden Verkehr die entsprechende Dimensionierung vorgibt, in derselben Art und Weise wie bei der Dimensionierung im Aggregationsnetz;
- Bestimme die entsprechenden Übertragungssysteme, wie für das Aggregationsnetz beschrieben (siehe Abschnitt 3.3.2.2).

Für eine Ringstruktur sind die Aufgaben wie folgt:

- Determinierung der gesamten Bandbreiten-Anforderung für jede Ring-Verbindung, in Abhängigkeit von der Option, ob der Verkehr 50 % oder 100 % gesichert werden soll;
- Erhöhe sie mit dem Mark-up-Faktor, der die Begrenzung in der Ausnutzung der Systeme beschreibt, der vom Nutzer für diese Netzebene festgelegt worden ist;
- Bestimme die entsprechenden Übertragungssysteme wie im Folgenden beschrieben.

Das Modell implementiert Ring-Topologien auf der Basis allgemein bekannter Algorithmen,¹⁷ die bereits in früheren analytischen Kostenmodellen¹⁸ eingesetzt worden sind. Ring-Topologien werden hauptsächlich eingesetzt, wenn der Betreiber für die Übertragungswege im Backhaul-Netz eine eigene Infrastruktur errichtet. Dazu sind

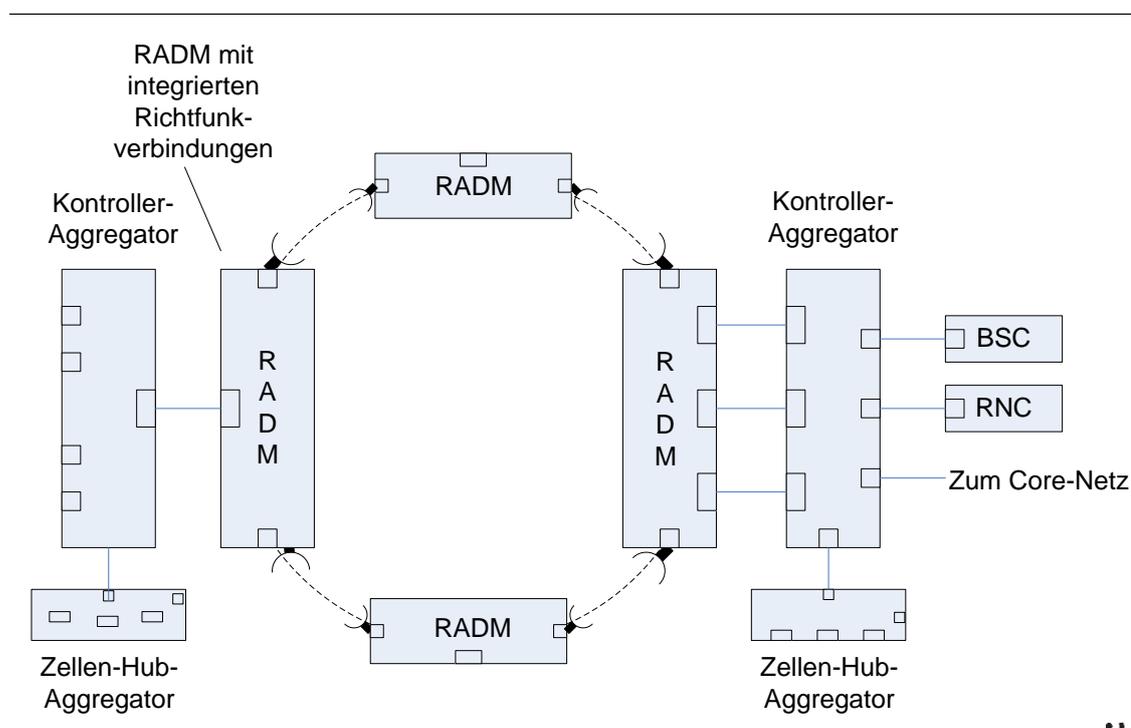
¹⁶ Für die Übertragungseinrichtungen bei paketvermittelten Netzen wird der Auslastungsgrad der Systeme begrenzt, was durch den relativen Nutzungsfaktor beschrieben wird. Dieser liegt üblicherweise je nach Netztyp (Mobil- oder Festnetz) sowie der auf jeder Netzebene aggregierten Bandbreite zwischen 0,7 und 0,9. Daraus ergibt sich eine Überdimensionierung, die durch entsprechende Mark-up-Faktoren je Ebene (abgekürzt mit gMuF und berechnet als 1/Nutzungsfaktor) ausgedrückt wird.

¹⁷ Siehe Lin and Kernigham (1973).

¹⁸ Siehe WIK-Consult (2007, 2010).

auf der Schicht 1 Add-and-Drop Multiplexer (RADM)¹⁹ einzusetzen, mit denen die Verkehrsabsicherung im Ring vorgenommen wird. Die Ethernet Ports aus den Aggregatoren in den Controller Standorten und in den zugehörigen Core Standorten werden mit entsprechenden Ethernetports in den RADM verbunden. Die netzseitigen Ports aus dem RADM werden mit den Ports der zugehörigen Übertragungssysteme, typischerweise Richtfunk, verbunden. Aus Sicht des Kostenmodells wird eine integrierte Einrichtung für beide Funktionen (RADM und Richtfunk) angenommen, siehe Abbildung 3-21. Alternativ können statt eigener Richtfunk-Einrichtungen Mietleitungen mit entsprechender Bandbreite verwendet werden. Dabei sind die Kosten der weiterhin notwendigen RADM in den Kosten der Mietleitungen zu integrieren. In beiden Fällen kann die Absicherung für Werte zwischen 50 % und 100 % konfiguriert werden.

Abbildung 3-21: Schematische Darstellung einer Ring-Topologie auf der Basis von Richtfunk mit RADM



¹⁹ RADM bezieht sich auf eine bestimmte Konfiguration von Add-and-Drop Multiplexer. Gegenwärtig sind alle ADM auf der Basis des RADM-Typs.

3.4.3 Dieses Netzsegment im Fall eines reinen LTE-Netzes

Die Aufgabe dieses Netzsegmentes in einem reinen LTE-Netz bleibt die gleiche wie im gerade beschriebenen Backhaul-Netz für eine hybrides Netz. Der Unterschied ist lediglich, dass das Netz von Konzentrationspunkten und nicht von Controller-Standorten aus geplant wird. Die Planungs- und Dimensionierungsregeln für die Aggregations- und Übertragungs-Systeme bleiben dabei dieselben, nur dass sie in diesem Fall lediglich auf LTE-Verkehr anzuwenden sind. Allerdings sind wie auch schon für das Aggregationsnetz beschrieben die zu verwendenden Transportsysteme entsprechend den Verkehrsvolumina auszuwählen. Auch hier gilt, dass kaum mehr Richtfunksysteme eingesetzt werden können, da die zu erwartenden Bandbreiten die Kapazität dieser Systeme überschreiten. Vielmehr sind auch hier Glasfasersysteme einzusetzen, die im Modell durch Mietleitungen erfasst werden.

3.5 Core-Netz

Das Core-Netz besteht aus den ihm zugeordneten Funktionseinheiten und den Verbindungen zwischen ihnen. Insbesondere im Core-Netz gibt es Einrichtungen, die jeweils dediziert für Sprache oder für Daten gebraucht werden, sowie solche, die gemeinsam beide Dienste unterstützen. Da dies ein Kostenmodell zur Bestimmung der Kosten der Terminierung von Sprache ist, ist bei der Modellierung der Fokus auf die Einrichtungen, die Aufgaben beim Transport und der Vermittlung von Sprache übernehmen. Dabei werden auch die für die Steuerung des Datenverkehrs benutzten Einrichtungen dimensioniert sowie die verbindungsnetzseitig benötigten Einrichtungen, sofern dadurch die Führung des Sprachverkehrs im Core-Netz beeinflusst wird. Da das Modell alle gängigen Technologien implementiert, sind Einrichtungen für das traditionelle Core-Netz (2G/3G Core) für GSM und UMTS und Einrichtungen für das Evolved Packet Core (EPC) für LTE zu berücksichtigen. Einrichtungen für Datendienste, die nicht der Verkehrssteuerung dienen, wie z.B. Application Server, werden nicht modelliert. Weiter unten in Abschnitt 3.5.6 weist Tabelle 3-4 alle Einrichtungen des Core-Netzes aus, für die das Modell im Core-Netz eine Dimensionierung vornimmt und die somit die Gesamtkosten des Netzes mitbestimmen.

Sprachverkehr kann sowohl als leitungsvermittelter wie paketvermittelter Verkehr entstehen. Als leitungsvermittelter Verkehr entsteht er ausschließlich in Zellen in denen GSM- bzw. UMTS-Einrichtungen installiert sind. An UMTS-Standorten mit HSPA kann Sprachverkehr auch als paketvermittelter VoIP-Verkehr entstehen, der an IP-Zusammenschaltungspunkten mit IP-basierten Netzen, abgeführt bzw. eingespeist werden kann. Bedeutender ist, dass mit der Einführung von LTE auch Voice over LTE (VoLTE) durch das modellierte Netz realisiert werden kann, dem im Modell dadurch Rechnung getragen wird, dass dafür die entsprechenden Elemente einer IMS-Plattform installiert werden. Für den Fall, dass ein Betreiber über LTE ausschließlich

Datenverkehr abwickelt, wird davon ausgegangen, dass der leitungsvermittelte Sprachverkehr von LTE-fähigen Endgeräten mittels CSFB bei der Entstehung an GSM- bzw. UMTS-Einrichtungen übergeben wird, von denen zumindest die GSM-Einrichtungen flächendeckend implementiert werden. (siehe Abbildung 3-22 weiter unten).

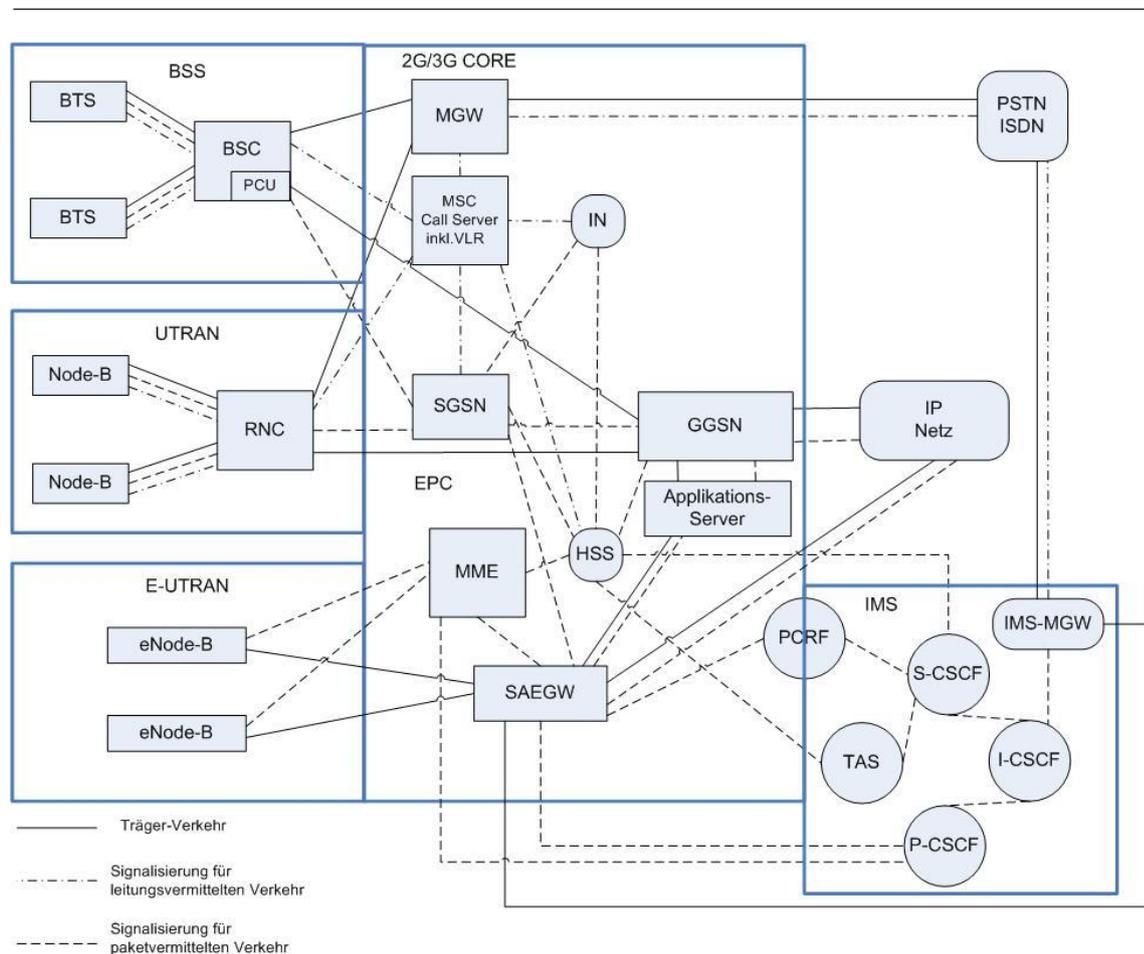
Bei der Dimensionierung des Core-Netzes wird, abhängig davon, ob es sich um GSM- und UMTS-Dienste handelt, die leitungsvermittelt sind, oder um paketvermittelte EDGE/UMTS/LTE-Dienste, unterschiedlich vorgegangen. Das Modell betrachtet den GSM/UMTS-leitungsvermittelten Verkehr in Form von festen Einheiten (in GSM als Slots bezeichnet und in UMTS als Leitungsemulation mit Sprachqualität). Für den Transport des leitungsvermittelten Verkehrs zwischen den verschiedenen Standorten des Core-Netzes wird die Leitungs-Emulation eingesetzt, da alle diese Verkehre über paketvermittelte Einrichtungen derzeit über Label Edge Router (LER) gemeinsam mit dem reinen paketvermittelten Datenverkehr geführt werden. Daraus folgt, dass die Dimensionierung des nur leitungsvermittelten Verkehrs, vor allem Sprachverkehre, auf der Basis eines Verlustmodells erfolgt, was durch die klassische Erlang-Verlustformel geschieht. Im Falle der Verkehre zwischen zwei Core-Netz-Standorten, die über einen oder mehrere dazwischenliegende Core-Netz-Standorte geführt werden, werden Label Switch Router (LSR) neben den LER eingesetzt. Im Fall einer Vollvermaschung ist der Einsatz von LSR nicht notwendig, weil jeder LER mit den anderen direkt verbunden ist.

Die Kapazitätsanforderungen der paketvermittelten EDGE- und UMTS-Verkehre werden aus den entsprechenden Werten für Paketrade und Paketlänge abgeleitet. Dabei wird vom Modell berücksichtigt, dass die Laufzeitverzögerungen der Pakete auf einer über die verschiedenen Netzebenen geführten Ende-zu-Ende-Verbindung von den Kapazitätsauslastungen der jeweiligen Transportsysteme abhängen. Um diese Laufzeiten zu begrenzen werden die Kapazitätsauslastungen für jede Netzebene durch sogenannte Mark-Up-Faktoren gesteuert, die vom Modell-Nutzer vorzugeben sind. Die sich daraus ergebenden realen Werte der Laufzeitverzögerung werden für jede Dienstekategorie vom Modell mittels Warteschlangen-Modelle berechnet.

Für LTE-Verkehr gilt, dass sowohl die Verkehre aus Datendiensten wie aus Sprachdiensten im EPC über gemeinsame Elemente in der gleichen Weise wie in UMTS abgewickelt werden. Dabei sind wieder die Paketrade und die Paketlängen sowie die Ende-zu-Ende-Laufzeiten von Bedeutung. Für Pakete, die aus dem VoLTE resultieren, werden entsprechend geringere Laufzeiten vorgesehen. Die Paketströme aus den LTE-Verkehren werden in den EPC-Standorten über eigene Elemente der logischen Ebene bearbeitet (S-GW und P-GW), aber im Transportnetz, welches die Core-Standorte verbindet, über dieselben Elemente wie im UMTS-Netz (LER und ggf. LSR und entsprechende Mietleitungen) abgewickelt. Dabei wird bei der Dimensionierung der entsprechende Beitrag zu den Laufzeiten so berücksichtigt, dass die sich aus den QoS-Anforderungen der entsprechenden Dienstekategorie ergebenden Ende-zu-Ende-Laufzeiten für alle Dienste und damit auch für VoLTE eingehalten werden.

Zusammenfassend ergeben sich damit drei verschiedene Teile für das Design und die Dimensionierung des Core Netzes: Einrichtungen für die leitungsvermittelten Verkehre aus den entsprechenden GSM- und UMTS-Anteilen, paketermittelte Datenverkehre aus EDGE und UMTS/HSPA-Zellen und paktevermittelte Sprach- und Datenverkehre aus LTE-Zellen. Die nachfolgenden drei Unterabschnittete behandeln diese Teile. Die dreiteilige Aufteilung des Netzes ist bereits in den Abbildung 2-2 und Abbildung 3-20 gezeigt worden, wird hier jedoch zum besseren Verständnis der folgenden Ausführungen in Abbildung 3-22 noch mal dargestellt.

Abbildung 3-22: Logische Verbindungen zwischen den Funktionsblöcken an den Controller-Standorten und denen an den Standorten des Core-Netzes, basierend auf Elementen von Release 4 bis 8 des 3GPP



3.5.1 Design der Core-Netz-Systeme für leitungsvermittelte GSM- und UMTS-Dienste :

Die bereits im Rahmen des Backhaul-Netzes bestimmten Core-Netz-Standorte mit ihren Softswitch-Systemen (Media Gateways) sind die ersten Punkte, an denen Verkehrsaggregation für GSM-leitungsvermittelte Dienste stattfindet. Dies ist für die leitungsvermittelten Dienste insofern von Bedeutung, da die erforderliche Anzahl der Verbindungen durch die Erlang-Verlustformel bestimmt wird. Da sich die erforderlichen Verbindungen pro Verkehrseinheit mit steigender Verkehrsaggregation reduzieren, ergibt sich bei hoher Aggregation des Verkehrs für Erlang-Verkehr näherungsweise eine Leitung pro Erlang. Dementsprechend wird das Core-Netz dimensioniert.

Die beiden wichtigsten Core-Netz-Einrichtungen für leitungsvermittelte Sprachdienste sind die Media Gateways und die MSC Call Server. Das Modell geht davon aus, dass Media Gateways i.d.R. in allen Core-Netz-Standorten, die MSC Call Server dagegen nur in einer begrenzten Anzahl Standorten installiert werden.²⁰ Die Dimensionierung der Media Gateways wird, wie schon gezeigt, durch leitungsvermittelten BH-Verkehr aus GSM und UMTS vorgenommen. Dagegen werden die MSC Call Server aus den Werten für die BH Call Rate dimensioniert, da sie ausschließlich Signalisierungsfunktionen wahrnehmen. Die Verkehrswerte für Sprachverkehr beinhalten alle drei Verkehrstypen (On-Net, Off-Net-in und Off-Net-out).

Für die Führung der leitungsvermittelten Verkehre On-Net und Off-Net-in bestimmt das Modell eine Verkehrsmatrix, aus der die entsprechenden Verkehrsvolumina zwischen den verschiedenen Knoten des Core-Netzes hervorgehen. Der Verkehr Off-Net-out wird in dieser Matrix nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass an den geografisch nächst gelegenen Core-Netz-Knoten, zu denen er von den Basisstationen hingeführt wird, Zusammenschaltung mit anderen Netzen besteht und er dort abgeführt wird.²¹

Die Anzahl der Core-Netz-Knoten, an denen Zusammenschaltung mit anderen Netzen ermöglicht wird, wird durch einen Eingabeparameter gesteuert. Als Standorte werden dabei diejenigen mit den höchsten Verkehrswerten gewählt. Für den Off-Net-Verkehr sind entsprechende Interface-Karten in den Media Gateways installiert. Dabei unterscheidet das Modell diese Karten danach, ob sie für den Teil des Sprachverkehrs, der über leitungsvermittelte Technologie erfolgt, eingesetzt werden oder für den Teil,

20 Der MSC Call Server ist in der Lage, eine große Anzahl von Verbindungen zu managen, so dass normalerweise ein einziger Server ausreicht. Aus Gründen der Netzverfügbarkeit werden jedoch immer mindestens zwei dieser Einrichtungen installiert.

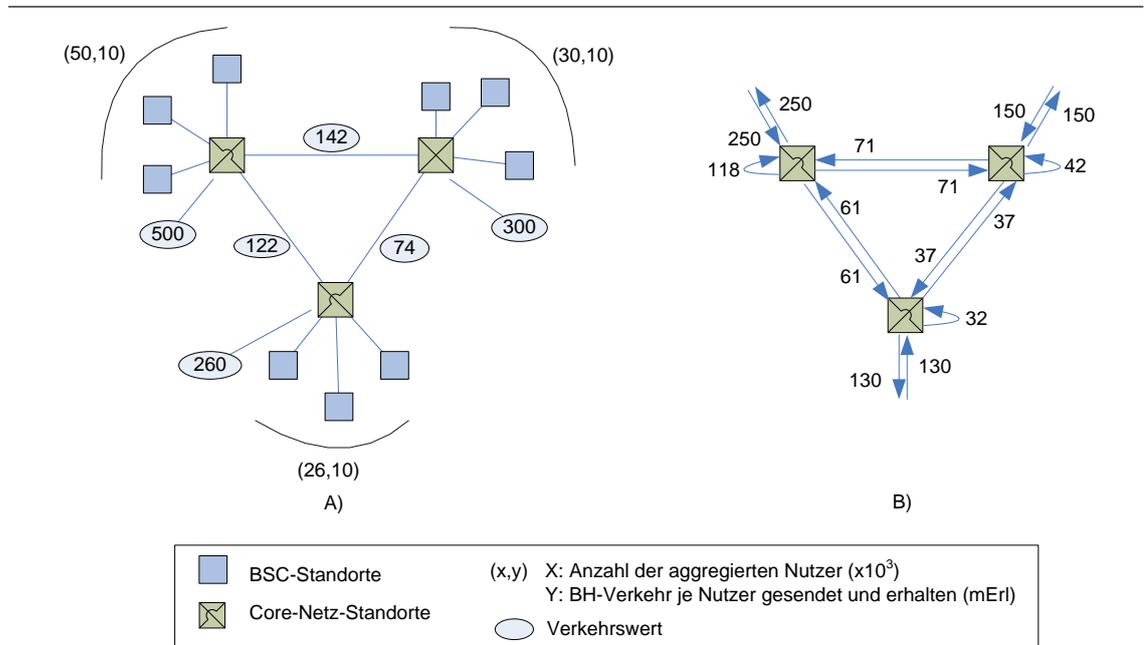
21 Dies ist eine die Modellkomplexität erheblich reduzierende Annahme. In der Realität wird der für das Festnetz bestimmte Verkehr auch zielnahe abgeführt, da dessen Ziel bekannt ist und der Transport im eigenen Netz und zielnahe Übergabe günstiger sein können als die Zahlung von Gebühren für die Terminierung im Festnetz bei zielferner Übergabe. Wie erwähnt reduziert die Komplexität des Modells erheblich; das Ergebnis wird dadurch nur in insignifikanter Weise tangiert.

der über paketvermittelte Technologie abgewickelt wird. Dies erfolgt, indem die Ports einer jeden Interface-Karte danach differenziert werden, ob sie auf TDM oder Ethernet-Technologie basieren. Der Anteil der beiden Typen kann über einen Parameter gesteuert werden. Im Fall von auf Ethernet basierender Sprach-Zusammenschaltung wird im Modell die Funktionalität des Session Border Controller als Teil sowohl des CS-MGW wie des IMS-MGW angesehen.

Die Berechnung der Verkehrswerte auf den einzelnen Verbindungen zwischen den Core-Netz-Knoten erfolgt auf der Basis von relativen Verkehrsgewichten, die sich aus der Verkehrsmatrix ergeben. Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 3-23 ein Beispiel für den Fall von On-Net-Verkehr, in dem durch drei Standorte ein Verkehr von 500, 300 und 260 Erlang geroutet wird. Im Fall des Standortes mit 500 Erlang, in der Annahme, dass ankommender und abgehender Verkehr gleich sind, werden jeweils 250 Erlang ankommender und 250 Erlang abgehender Verkehr den drei Standorten entsprechend ihren relativen Verkehrsgewichten zugeordnet: jeweils 71 Erlang kommend und gehend zum 300er Standort, 61 Erlang kommend und gehend zum 260er Standort und 118 Erlang kommend und gehend zum 500er, also zum eigenen Standort, wobei für die beiden letzteren Zuordnungen kein Verkehr über Verbindungen entsteht.²² Für die beiden anderen Standorte wird in gleicher Weise verfahren.

22 Die Werte von 71, 61 und 118 ergeben sich aus der Multiplikation der relativen Gewichte der Verkehre in den drei Standorten, d.h. (300/1060), (260/1060) und (500/1060) mit dem entweder ankommenden oder gehenden Verkehr in dem betrachteten Standort, d.h. 250.

Abbildung 3-23: Verkehrsverteilung von On-Net-Verkehr von 3 Standorten mit 500, 300 und 260 Erlang:
A) Zuordnung der Verkehre zu den Standorten
B) Verkehrsmuster nach erfolgtem Routing



Die Darstellung von Off-Net-in, also ankommendem Terminierungs-Verkehr, auf den Transportwegen des Core-Netzes wäre analog zu der in Abbildung 3-23, außer dass die ankommenden Verkehrsströme nicht von den BSC-Standorten kämen, sondern aus anderen Netzen.

Das Core-Netz behandelt den leitungsvermittelten Diensteverkehr über UMTS ähnlich wie den über GSM. Dazu nutzen beide Technologien die virtuellen Verbindungen im Core-Netz auf der Basis von MPLS-Tunnel, indem sie vergleichbare Bandbreiten für Sprache von UMTS- bzw. GSM-Geräten verwenden.

Wie erwähnt wird der das Netz verlassende Off-Net-Verkehr zum nächst gelegenen Zusammenschaltungspunkt mit anderen Netzen geführt. Die Anzahl dieser Zusammenschaltungspunkte ist ein Eingabeparameter, während deren Standorte auf der Basis von relativen Verkehrsgewichten, ähnlich wie für On-Net-Verkehr, bestimmt werden. Die Volumina des ankommenden und zu terminierenden Off-Net-Verkehrs werden den Core-Netz-Knoten mit Zusammenschaltungs-Einrichtungen ebenfalls auf der Basis von relativen Verkehrsgewichten zugeordnet und von dort wiederum entsprechend den relativen Verkehrsgewichten an ihre Empfänger-Core-Netz-Knoten verteilt.

3.5.2 Core-Netz-Systeme für EDGE/UMTS Datenverkehr

Auch für die paketvermittelten Datenverkehre sind die Core-Netz-Standorte der erste Eingangspunkt, an dem Verkehrsaggregation und Lenkung stattfindet. Allerdings wird hier für die Dimensionierung kein Verlustmodell zugrundegelegt, sondern aus der Summe der Paketströme je Dienstklasse die erforderlichen Kapazitäten unter Berücksichtigung der QoS Parameter-Werte der jeweiligen Dienstklasse mittels eines Warteschlangen-Modells bestimmt.

Der aus 2G/3G stammende Datenverkehr besteht sowohl aus Daten, die im GSM/EDGE-Netz in BTS-Zellen generiert werden, wie aus Daten, die von UMTS/HSPA-Zellen stammen. Datenverkehr erfordert vor allem Verbindungen von EDGE/UMTS/HSPA-Nutzern zu Datenanwendungen, die in sogenannten Application Server liegen, und die entweder an ausgewählten Core-Netz-Standorten des eigenen Netzes oder aber an Standorten in anderen Netzen angesiedelt sind.

Der Verkehr in Richtung eines im eigenen Netz befindlichen Application Server wird über den lokalen GGSN zu dem geografisch nächsten Core-Netz-Standort geroutet, an dem ein entsprechender Server installiert ist. Das Modell sieht die Einrichtung von GGSN an allen Core-Standorten mit Zusammenschaltung zu externen IP-Netzen bzw. mit Application Server vor, während die Anzahl der Standorte mit SGSN-Einrichtungen durch einen Eingabeparameter bestimmt wird. Die Anzahl der Standorte, an denen Application Server installiert werden, wird ebenfalls durch einen Eingabeparameter bestimmt; dazu werden die Core Standorte mit den höchsten Volumina herangezogen. Aus dem eben Gesagten folgt, dass im Modell die Anzahl der Standorte für Application Server nicht grösser sein darf als die Anzahl der IP-Zusammenschaltungspunkte. Der Datenverkehr in Richtung eines Application Server in einem anderen Netz wird zu dem nächst gelegenen Core-Netz-Standort mit Zusammenschaltungs-Einrichtungen geroutet. Seine Verteilung erfolgt in einer Weise vergleichbar zu der, die oben für Off-Net-out Sprachverkehr geschildert worden ist.

Die oben geschilderten Festlegungen des Modells in Bezug auf Application Server betreffen ausschließlich die Volumina, die auf den Verbindungen zwischen den entsprechenden Netz-Knoten geführt werden, um die Verbindungen richtig dimensionieren zu können; sie betreffen nicht die Bestimmung der Kapazitäten der Application Server selber, da diese wie bereits erwähnt keine Steuerungsfunktionen für den Verkehr ausüben und insbesondere für die Ermittlung der Terminierungs-Kosten nicht relevant sind.

3.5.3 Design der Core-Netz-Systeme für LTE-Verkehre im EPC

Im EPC werden im Wesentlichen zwei Netzelemente eingerichtet und entsprechend dimensioniert, das SAE-GW, das die Funktionen von S-GW und P-GW integriert, und die MME. Dabei stellt das S-GW die Verbindung mit den LTE-Einrichtungen aus den

eNodeB her und das P-GW die Zusammenschaltung mit anderen Netzen; das MME ist für den Kontroll-Signalisierungsverkehr zuständig. Darüberhinaus werden die Funktionen des HLR durch die des Home Subscriber Server (HSS) ersetzt, der als gemeinsames Funktionselement sowohl von LTE wie auch GSM und UMTS fungiert.

Die Treiber für die Dimensionierung des SAE-GW sind die Paketströme aus allen Diensten (Daten und Sprache) die sich aus den BH Verkehrswerten der jeweiligen Dienste ergeben. Für das MME ist die Anzahl der über die zugeordneten eNodeB angeschlossenen LTE Teilnehmer maßgeblich. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass ein eingeschaltetes LTE Endgerät immer On-Netz ist und damit immer eine virtuelle Verbindung existiert, unabhängig davon, ob es Dienste aufruft oder nicht. Dazu wird im Model der BH-Verkehrsparameter zur MME-Dimensionierung näherungsweise durch die Anzahl der an einem Core-Netz Standort angeschlossenen LTE-Teilnehmer ersetzt, da wir davon ausgehen, dass ein LTE-Endgerät i.d.R. in der BH eingeschaltet ist.

Sowohl das SAE-GW wie auch das MME werden in einer vom Nutzer vorzugebenden Anzahl von Core Standorten installiert. Wir gehen jedoch davon aus, dass, wenn ein kleineres Netz mit einer geringen Anzahl von Core-Standorten zu modellieren ist, beide Funktionalitäten in allen Standorten installiert werden.

3.5.4 Design der IMS-Plattform für VoLTE

Zu Beginn dieses Abschnitts verweisen wir auf die Ausführungen in Abschnitt 3.1.6.2, wonach die Nachfrage nach "echtem" VoLTE von vornherein auf den Anteil beschränkt wird, der von Rufenden bis zum Empfänger genuin über das LTE-Radiozugangsnetz läuft, und bei dem über CSFB realisierten Anteil ebenfalls von vorneherein bestimmt wird, dass er Teil des Volumens des Sprachdienstes ist, der entweder über UMTS oder GSM abgewickelt wird. Die im Folgenden beschriebene Modellierung betrifft deshalb den Verkehr, der im eigenen Netz vom A-Teilnehmer bis zum B-Teilnehmer im LTE-Netz verbleibt.

Im Prinzip werden die Pakete aus dem VoLTE-Verkehr so geführt, wie dies für klassische Sprache in Abschnitt 3.5.1 beschrieben worden ist. Allerdings beansprucht die Signalisierung zum Aufbau von VoLTE-Verbindungen im Core Netz zusätzliche Einrichtungen im EPC, die Gegenstand dieses Abschnitts sind.

Wie schon in der Einleitung ausgeführt, werden unter LTE im EPC die Verkehre aller Dienste von denselben Netzelementen behandelt. Damit ist ein Media Gateway für On-Netz-Verkehre nicht erforderlich und auch kein MSC Call Server, da ja keine leitungsvermittelten Dienste aufkommen. Allerdings ist sicherzustellen, dass der Sprachverkehr nicht durch Pakete aus Daten- und Best-Effort-Diensten in ihren QoS Parametern (Paketverlust und Laufzeitverzögerung) behindert werden, indem in den entsprechenden Transporteinrichtungen (LER, LSR und Mietleitungen) ausreichende Kapazitäten vorzugsweise bereitgestellt werden. Dazu wurde von 3GPP das Konzept einer IMS-

Plattform entwickelt. Die IMS-Plattform schickt an das S-GW entsprechende Signalisierungs-Nachrichten, und es ist dann Aufgabe der Transporteinrichtungen, diese auszuwerten und die Kapazitäten sicherzustellen. Bei der Dimensionierung der Kapazitäten der Transport-Einrichtungen werden darum vom Modell die entsprechenden QoS-Parameter für die Verkehre aus den verschiedenen Dienstklassen berücksichtigt und die Kapazitäten für entsprechende Tunnels je Dienstklasse berechnet.

Wie Abbildung 3-22 zeigt, besteht die IMS-Plattform im Wesentlichen aus den drei Call State Control Functions (S-CSCF, I-CSCF und P-CSCF), dem Telefon Application Server (TAS) und der Policy and Charging Rules Function (PCRF). Der Treiber für die Dimensionierung der IMS-Plattform ist im Wesentlichen durch die BHCA im LTE Sprachdienst bestimmt. Die IMS-Plattform als zentrales Kontrollelement wird nur in einer reduzierten Anzahl von Core-Standorten installiert, wobei diese Anzahl durch einen vom Modellnutzer vorzugebenden Parameter bestimmt wird.

Für Off-Net-VoLTE-Verkehre zwischen dem LTE-Netz und dem PSTN/ISDN ist ein IMS Media Gateway erforderlich, das die paketbasierten Sprachsignale umwandelt und die IMS-Signalisierung in die Signalisierung des ISDN (ISUP). Diese Einrichtung wird vom Modell an allen Zusammenschaltungspunkten des EPC mit einem PSTN/ISDN eingerichtet. Die Dimensionierung erfolgt auf Basis der BHCA und dem aggregierten VoLTE-Off-Net-Verkehr während der Busy Hour.

3.5.5 Topologie des Core-Netzes und Dimensionierung des physischen Netzes

Im Core-Netz kann zwischen zwei Topologien gewählt werden, vollvermascht oder Ring. Im Falle einer vollvermaschten Topologie werden sowohl On-Net-Verkehr wie Off-Net-Verkehr über höchstens zwei Core-Netz-Knoten geführt, die direkt verbunden sind. Im Falle einer Ringtopologie sind beide Verkehre ggf. auch über einen oder mehrere Zwischenknoten zu führen.

Der Off-Net-Verkehr von und zu den Zusammenschaltungspunkten sowie der On-Net-Verkehr zwischen den Knoten des Core-Netzes wird durch Label Edge Router (LER) aggregiert und im Falle von Ringtopologien über Label Switch Router (LSR) geführt. Entsprechend der Wahl einer vollvermaschten oder einer Ring-Topologie werden die Schnittstellen zum physischen Layer und die dafür benötigten Karten gewählt.

Für den physischen Layer geht das Modell davon aus, dass die Verbindungen durch Ethernet-basierte Mietleitungen umgesetzt werden. Bei einer vollvermaschten Topologie ergeben sich $N \cdot (N-1) / 2$ Verbindungen, wobei N die Anzahl der Knoten ist. Es wird dabei berücksichtigt, dass die Kapazitäten der physischen Verbindungen in beide Richtungen symmetrisch sind. Bei einer Ring-Topologie wird die Anzahl der Ringe durch die maximale Anzahl von Controller-Standorten bestimmt. Wenn mehr als ein Ring eingerichtet wird, ergibt sich als minimale Anzahl der Verbindungen: $N + (\text{Anzahl}$

der Ringe - 1). Bei nur einem Ring, was für kleinere Länder realistisch ist, ist die Anzahl der Verbindungen gleich N , d.h. gleich der Anzahl der Knoten.

Bei der Dimensionierung der Core-Netz-Verbindungen werden die Kapazitäten mit dem vom Anwender eingestellten globalen Mark-up-Faktor, wie er auch im Aggregations- und im Backhaul-Netz zur Anwendung kommt, erhöht. Die individuellen Mark-up-Faktoren für die verschiedenen Dienste-Kategorien werden wie für diese beiden Netzteile berechnet.

Bezüglich der Zuordnung der Anzahl der Systeme zu den physischen Verbindungen stützt sich das Modell auf dieselbe Vorgehensweise wie beim Aggregations- und beim Backhaul-Netz. Bei einer Ring-Topologie werden LSR Router eingesetzt, die mittels Mietleitungen zu einem Ring verbunden werden. Dabei kann wieder zwischen einer Absicherung der Ring-Kapazitäten von 50 % oder 100 % gewählt werden. Daraus folgt, dass die erforderliche Bandbreite auf den Verbindungen gleich der Summe der größten Bandbreitenanforderungen auf jeder dieser asymmetrischen logischen Verbindungen ist. Bei einer Vollvermaschung entspricht die erforderliche Bandbreite auf jeder Verbindung dem Verkehr zwischen den beiden verbundenen Knoten. In diesem Fall wird von zusätzlichen Maßnahmen zwecks Absicherung abgesehen, da für den Fall einer Störung auf einer der Verbindungen davon ausgegangen wird, dass der betroffene Verkehr über die verbleibenden Verbindungen mit einem Zwischenknoten bewältigt werden kann.

3.5.6 Dimensionierung der weiteren Core-Netz-Einrichtungen

Bei den weiteren Core-Netz-Einrichtungen handelt es sich um

- Verschiedene Arten von Server, wie z.B. für SMS, MMS, Application Server,
- Register für den Kontrollplan (EIR, VLR, HSS) sowie
- Netzmanagement-System-Funktionen des IN, inklusive STP Funktionalitäten.

Tabelle 3-4 zeigt alle für das Core-Netz benötigten funktionalen Einrichtungen und (in der zweiten Spalte) die Treiber für ihre Dimensionierung. Die dritte Spalte weist für die für Sprache benötigten Einrichtungen aus, mit welchem Nutzungsgrad sie typischerweise eingesetzt werden. Für eine konservative Dimensionierung wird als Kehrwert des geringsten dieser üblichen Nutzungsgrade der globale Mark-up-Faktor bestimmt, durch den dann die Reserven festgelegt werden, die jeweils für besondere Anforderungen bereit gehalten werden müssen.

Tabelle 3-4: Zusammenfassende Betrachtung der funktionalen Einrichtungen im Core-Netz

Einrichtung	Treiber für die Dimensionierung	Nutzungsgrad	Wo installiert
Media Gateway	Anzahl der Ethernet Ports, BH Verkehr	70 %	An allen Standorten des Core-Netzes
MSC Call Server inklusive VLR	BHCA	67 %	Zu bestimmen
HSS mit Authentication Centre	Anzahl der Teilnehmer, BHCA	80 %	Zu bestimmen
EIR	Anzahl der Teilnehmer	80 %	Zu bestimmen
SMSC/MMSC	Anzahl der SMS/MMS / s	80 %	Zu bestimmen
SGSN	(a) BHCA (b) Anzahl der zugehörigen Teilnehmer	N/A	Zu bestimmen
GGSN	(a) Durchsatz, in Mbps (b) PDP-Kontext	N/A	An allen Standorten des Core-Netzes mit IP-Zusammenschaltung
MGW-Schnittstellenkarte zum PSTN/ISDN/PLMN für paketvermittelten Sprachverkehr	Anzahl der Ethernet Ports	80 %	An allen Standorten des Core-Netzes mit PSTN/ISDN-Zusammenschaltung
MGW-Schnittstellenkarte zum PSTN/ISDN/PLMN für leitungsvermittelten Sprachverkehr	Anzahl der E1 Ports	80%	An allen Standorten des Core-Netzes mit PSTN/ISDN-Zusammenschaltung
Verbindungsnetzseitige Einrichtungen (Aggregatoren, Label Switch Router, Label Edge Router)	Erforderliche Bandbreite	80%	In allen Standorten des Core Netzes
IN	(a) BHCA (b) Anzahl der Teilnehmer	80 %	Zu bestimmen
SAE Gateway	(a) Durchsatz (b) PDP-Kontext	N/A	
Mobility Management Entity (MME)	Anzahl der zugeordneten LTE-Nutzer	67 %	
IP Multimedia Subsystem (IMS)	BHCA aus VoLTE		
IMS Media Gateway	VoLTE BH Verkehr und VoLTE BHCA	70 %	
IMS-MGW-Schnittstellenkarte zum PSTN/ISDN/PLMN basierend auf Ethernet Ports für VoLTE-Verkehr	Anzahl der Ethernet Ports	80 %	An allen Standorten des Core-Netzes mit PSTN/ISDN-Zusammenschaltung
IMS-MGW-Schnittstellenkarte zum PSTN/ISDN/PLMN basierend auf TDM Ports für VoLTE-Verkehr	Anzahl der E1 Ports	80%	An allen Standorten des Core-Netzes mit PSTN/ISDN-Zusammenschaltung
OAM	In OPEX berücksichtigt	N/A	N/A
Billing	In den indirekten Kosten berücksichtigt	N/A	N/A
Netz-Management-System (AAA, DNS functions, etc.)	BHCA für alle Dienste	80 %	Zu bestimmen

Die Anzahl der Server für EIR, HSS und SMS/MMS und die Anzahl der Application Server werden vom Modellanwender anhand von Parameterwerten festgelegt. Das

Modell geht davon aus, dass die EIR und HSS an einer Untermenge der Standorte des Core-Netzes angesiedelt sind, hauptsächlich denen mit der größten Verkehrsmenge. Aus Gründen der Verfügbarkeit bei teilweisem Ausfall des Netzes werden mindestens zwei HSS Register eingesetzt, wobei jedes die gesamte Nachfrage nach Kontrollverkehr bedienen kann. In der Praxis ist das VLR ein Teil des MSC Call Server und steht damit an allen Standorten des Core-Netzes zur Verfügung, an denen ein MSC Call Server installiert ist. Der Treiber für die Dimensionierung sind die Busy Hour Call Attempts. Das IN übt auf Veranlassung des entsprechenden Dienstes während der Dauer der Verbindung eine Kontrolle über die an sie gestellten Anforderungen aus. Die Anzahl der Core-Standorte mit entsprechenden Einrichtungen wird durch einen vom Modellnutzer zu festzulegenden Parameter bestimmt.

3.6 Zusammenfassende Beschreibung der Konzepte zur Sicherstellung von Redundanz und QoS

Sicherstellung von Redundanz und QoS sind miteinander verwandte Konzepte, die jedoch logisch voneinander getrennt zu betrachten sind. Redundanz zielt darauf, den gesamten Ausfall von Diensten im Falle des Zusammenbruchs eines Teils des Netzes zu vermeiden, Gewährleistung von QoS dagegen darauf, die Qualität angesichts unvermeidlicher Schwankungen in der Beanspruchung des Netzes möglichst gleichmäßig aufrecht zu erhalten, aber dies unter der Abwägung der dadurch entstehenden Kosten zu erreichen. In der Praxis überlappen sich die aus diesen beiden Bedarfen resultierenden Vorkehrungen insofern, als in beiden Fällen zusätzliche Kapazität bereitgestellt werden muss, die zum Teil gleichzeitig beiden Zwecken dienen kann.

3.6.1 Implementierung von Redundanz und QoS-Gewährleistung im Modell

Das Modell bietet dem Nutzer die folgenden Optionen zur Redundanz und Vermeidung von Überlastung an, die je nach Gegebenheiten eingestellt werden können:

- (1) Verbindung von Controller-Standorten zu zwei Standorten im Core-Netz (Doppelstern). Diese Möglichkeit steht auch bei einem reinen LTE-Netz zur Verfügung, wenn, wie schon erwähnt, in diesem Fall die Controller-Standorte der Legacy-Netze als Standorte zur Verkehrsaggregation eingesetzt werden.
- (2) Bei einer Ring-Topologie Einrichtungen mit einer Sicherheit von entweder 50 % oder 100 %, oder über Doppelstern mit einem Grad an Sicherheit zwischen 50 % und 100 %.
- (3) Verringerung der Auslastungsgrade durch Überdimensionierung der globalen Kapazitäten der Übertragungswege.

Die Option der Überdimensionierung dient einerseits der QoS-Gewährleistung aber sichert auch Redundanz, wenn bei Ausfall von Teilen des Netzes Verkehr verstärkt über alternative Anbindungen entsprechend Optionen (1) und (2) geroutet wird und dabei auch andere Teile des Netzes stärker beansprucht werden. Die Option gibt es für die Verbindungen zwischen den Knoten der verschiedenen Hierarchie-Ebenen und wird für jede Netzebene durch die globalen Mark-up-Faktoren bestimmt, die sich jeweils aus dem Kehrwert des maximalen Nutzungsgrades ergeben. Unsere Beobachtung ist es, dass Betreiber Auslastungsgrade zwischen 65 % und 85 % wählen, woraus folgt, dass sich die Mark-up-Faktoren zwischen 1,54 und 1,18 bewegen sollten. Tabelle 3-5 zeigt die Werte der Mark-up-Faktoren für die verschiedenen Netzebenen, die im Modell als Default-Werte implementiert worden sind (wobei diese Werte jederzeit vom Nutzer modifiziert werden können). Mit der Erlangung von Redundanz in den Übertragungssystemen wird ebenfalls ein entsprechender Grad von Redundanz in den Aggregations-Einrichtungen und den Routing-Servern erreicht.

Tabelle 3-5: Werte der globalen Mark-up-Faktoren für Redundanz auf den verschiedenen Netzebenen

Verbindungstyp	Globaler Mark-up-Faktor
Zelle – Zellen-Hub	1,3
Zellen-Hub – Kontroller	1,51
Kontroller – Core-Netz-Knoten	1,51
Core-Netz-Knoten untereinander	1,48

Bezüglich der Ansätze, Redundanz für bestimmte Einrichtungen zu gewährleisten, sieht das Modell die Optionen vor, die in Tabelle 3-6 aufgeführt sind.

Tabelle 3-6: Ansätze zur Erlangung von Redundanz für die Einrichtungen auf den verschiedenen Netzebenen

Netzebene	Ansatz zur Erlangung von Redundanz
Kontroller	Mindestens jeweils zwei BSC und RNC Standorte
Backhaul-Netz	Zuweisung der Kontroller Standorte zu zwei Core-Netz Standorten für diejenigen Kontroller, die nicht mit Core-Netz Knoten kolloziert sind (Doppelstern) und wahlweise Verkehrsführung von 50% bzw. 100% zu jedem Standort Für den Fall der Implementierung einer eigenen Infrastruktur, Ringtopologie über RF- Verbindungen oder Mietleitungen und Verkehrsführung 50 % bzw. 100 % in jeder Ringrichtung
Core-Netz	Mindestens jeweils zwei HSS und MSC Call Server, Ringtopologie mit 100% Absicherung

Für Zellen des Radiozugangsnetzes sieht das Modell keine spezifischen Vorkehrungen für Redundanz vor. Dies folgt aus Kostenüberlegungen. Diese Ebene des Netzes ver-

ursacht den größten Anteil der Kosten. Durch das Einziehen von Redundanz würden diese Kosten noch mal erheblich erhöht, ohne dass diese Erhöhung durch eine nennenswerte Verbesserung der Verfügbarkeit auf dieser niedrigen Ebene gerechtfertigt wäre. In diesem Zusammenhang ist es erwähnenswert, dass im Teilnehmer-Anschlussnetz des PSTN/ISDN Redundanz nie in Betracht gezogen worden ist.

3.6.2 Qualitätsdifferenzierung und äquivalente Bandbreite

Die unterschiedlichen Qualitätsanforderungen der verschiedenen Dienste drücken sich auf der logischen und physikalischen Ebene durch unterschiedliche Bandbreitenanforderungen und daraus resultierende unterschiedliche Kosten aus. Um den unterschiedlichen Qualitätsanforderungen Rechnung zu tragen, werden verschiedene Methoden im Netzbetrieb verwendet und bei der Dimensionierung des Netzes im Modell durch entsprechende Näherungen einbezogen.²³

Das Modell verwendet Wartesysteme mit Poisson-verteilten Paketströmen und modelliert daher die dienstebezogene QoS durch einen einzigen Parameter, nämlich die mittlere Verzögerungszeit eines Pakets zwischen einem Terminal und dem zugehörigen Kernnetzknotten. Durch modellinterne Parameter wird diese Wartezeit auf die verschiedenen Netzebenen verteilt und für den aggregierten Verkehr jeder Dienstklasse eine entsprechende Dimensionierung der erforderlichen Bandbreite vorgenommen. Die Summe dieser Bandbreiten über alle Dienstklassen ergibt die erforderliche QoS Bandbreite, auch Äquivalente Bandbreite genannt. Diese Bandbreite ist höher als die, die sich aus den Mittelwerten der Dienste ergeben, d.h., der Koeffizient zwischen der mittleren und der QoS-Bandbreite ist kleiner als eins. Erfahrungen mit der Netzdimensionierung zeigen allerdings, dass die QoS-Bandbreite i.d.R. geringer ist als die mittlere Bandbreite multipliziert mit dem globalen Mark-up-Faktor, d.h. der globale Mark-up-Faktor ist bei der Dimensionierung dominierend.

Für den Modellierungsansatz ergibt sich damit folgender Sachverhalt: 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 und entsprechend zwei Aspekten zu erhöhen (wobei lediglich das Maximum Anwendung findet):

- Aus Gründen der Absicherung des Netzbetriebs gegen kurzfristige unvorhersehbare Verkehrsspitzen sind in paketvermittelten Netzen die globalen Auslastungsgrade der Netzelemente begrenzt und liegen zwischen 65 und 85 %.

²³ Siehe García et al. (2010).

- Bedingt durch die Verkehrscharakteristik des Paketstroms, den der betreffende Dienst erzeugt, und der korrespondierenden Paketlänge, ergeben sich wie oben dargestellt aus den QoS-Anforderungen i.d.R. Bandbreitenwerte, die oberhalb der mittleren Bandbreite liegen. D.h. die Berücksichtigung von QoS-Anforderungen, die die mittlere Verzögerung in einem Netzelement minimieren, machen Bandbreitenwerte erforderlich, die oberhalb des Mittelwertes liegen. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass für Netzelemente mit hoher Verkehrsaggregation sich große Bandbreitenwerte ergeben, die von mehr als 100 Mbps bis hin in den Gigabitbereich liegen können. Da hier die Bearbeitungsdauer eines Pakets im Mikro- bzw. Nanosekundenbereich liegt, ist auch die Verzögerung in den Wartespeichern weit unterhalb der maximalen Verzögerung, die sich aus den QoS Anforderungen ergeben. Damit können theoretisch aus QoS-Sicht die entsprechenden Systeme hoch ausgelastet werden, wobei die Qualitätsanforderungen der einzelnen Dienste gleichwohl erfüllt bleiben. Das bedeutet, dass in diesem Fall die Kapazitätserhöhung aus den globalen Auslastungsgraden maßgebend ist und nicht die aus den QoS-Anforderungen.

Durch die individuelle Vorgabe der Auslastungsgrade je Netzebene wird dieser Zusammenhang differenziert berücksichtigt.

4 Ermittlung der Kosten

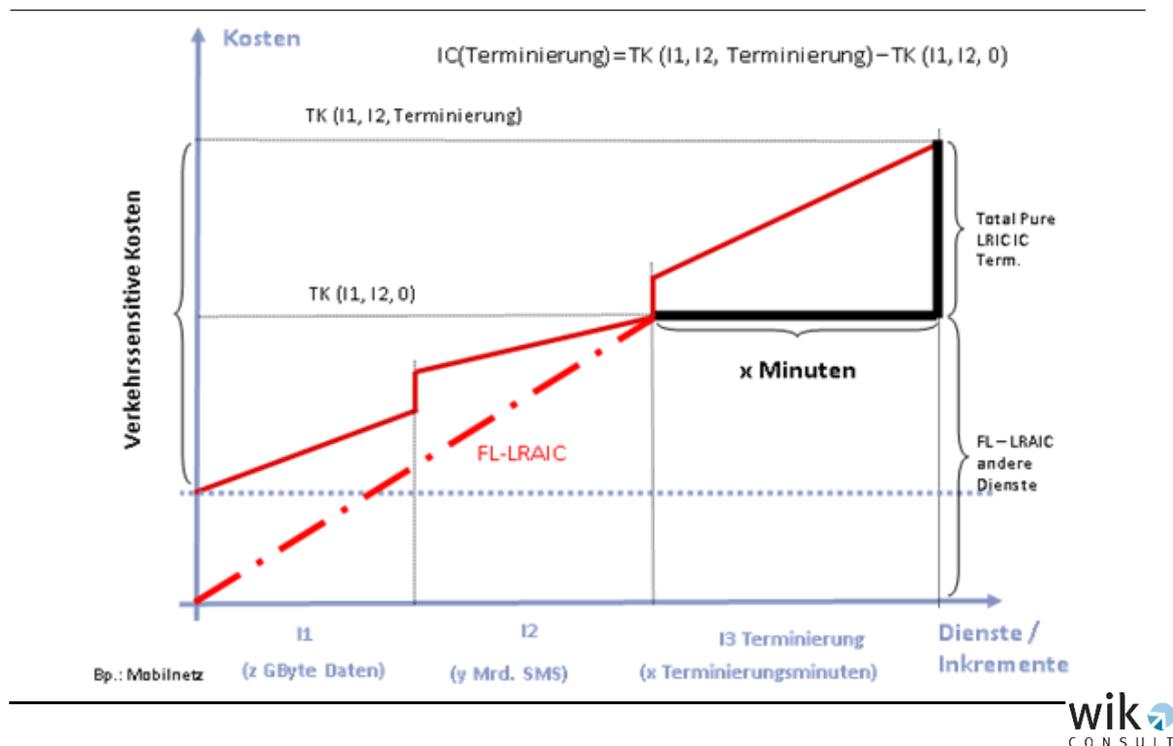
4.1 Der verwendete Kostenrechnungsmaßstab

Die Empfehlung der EU-Kommission vom 7. Mai 2009²⁴ sieht vor, dass die Ermittlung der Kosten der Terminierung auf Basis eines sogenannten "reinen Inkrementalkosten-" bzw. "Pure LRIC-Ansatzes" zu erfolgen hat. Die Inkrementalkosten der Terminierung sind demnach jene Kosten, die für einen Betreiber nicht anfallen würden, würde er die Leistung Terminierung für Dritte nicht anbieten. Die Kosten der Terminierung für Dritte auf der Basis von Pure LRIC entsprechen der Differenz aus den langfristigen Gesamtkosten eines Betreibers, wenn alle Dienste erbracht werden, und den langfristigen Gesamtkosten aller Dienste ohne diese Leistung. Beim Pure LRIC-Ansatz wird davon ausgegangen, dass die Kapazität für Terminierung als letztes Inkrement dem Netz hinzugefügt wird und dass das zur Berechnung der Kosten dieses Dienstes benutzte Bottom-up-Kostenmodell entsprechend gestaltet werden muss. Der Unterschied zum früher verwendeten Ansatz der Long Run Average Incremental Cost (LRAIC) besteht darin, dass die Kosten eines Netzelementes nicht proportional über alle Dienste, die es in Anspruch nehmen, verteilt werden, sondern nur die Kosten zur Anrechnung kommen, die anfielen, wenn relativ zum hypothetischen Fall der Bereitstellung aller Dienste ohne Terminierung jetzt auch dieser Dienst hinzukommt. Aufgrund der in Telekommunikationsnetzen üblichen Unteilbarkeiten werden dadurch häufig keine zusätzlichen Ressourcen erforderlich und somit die Kosten geringer ausfallen.

Das Konzept ist in Abbildung 4-1 veranschaulicht, wobei beispielhaft drei Dienste eines Mobilfunkbetreibers betrachtet werden (z = GByte Daten, y = Mrd. SMS und x = Minuten Terminierung). Die inkrementellen Kosten für den Dienst Terminierung ergeben sich aus der Differenz der totalen Kosten aller drei Services minus der totalen Kosten aller Services ohne die x Terminierungsminuten.

²⁴ Siehe EU-Kommission (2009).

Abbildung 4-1: Pure LRIC der Terminierung und KEL aller anderen Dienste



4.2 Voraussetzungen für die Kostenermittlung im Modell

Der Startpunkt für die Kostenberechnung ist die Liste der Systeme und Anlagen und deren jeweilige Anzahl, die von dem Netzplanungsmodul bestimmt worden sind. Netzkosten bestehen aus den annualisierten Capex und den Opex. Im Fall der Verwendung von LRAIC würde hierauf auch ein Aufschlag für Gemeinkosten erfolgen, was aber bei Verwendung von Pure LRIC für die Terminierung im Mobilfunknetz nicht erforderlich ist. Für den Fall, dass Teile der Kapazität gemietet werden, was vorrangig für Übertragungswege in Frage kommt, kommt anstelle von Capex und Opex ein entsprechender Mietbetrag zur Anwendung. In den folgenden Abschnitten werden wir unsere Ansätze zur Bestimmung dieser Kosten beschreiben, wie auch die Ermittlung des entsprechenden Kostenanteils für die Terminierung.

Neben der Liste der Systeme und Anlagen und deren Kosten übernimmt das Kostenmodul vom Netzplanungsmodul auch das Volumen für Terminierung, damit – von den Gesamtkosten auf Basis Pure LRIC für Terminierung ausgehend – auch die Pure LRIC pro Minute dieses Dienstes berechnet werden können.

Zusätzliche Inputs, die für die Kostenermittlung benötigt werden, und ihre Quellen sind wie folgt:

- Mietleitungspreise – Quelle: RTR;
- Preise der Anlagen und Systeme – Quelle: Unternehmen und Datenbank des WIK;
- Lebensdauern der Systeme und Anlagen – Quelle: RTR und Datenbank des WIK;
- Wert des WACC zur Ermittlung der annualisierten Capex – Quelle: RTR;
- Informationen zu Opex – Quelle: Unternehmen und Datenbank des WIK.

4.3 Annualisierte Capex

Der erste Schritt zur Ermittlung der annualisierten Capex in einem BU-Modell besteht darin, den Investitionswert der Anlagen des vom Netzplanungsmodul bestimmten Netzes zu ermitteln. Dadurch dass diese Bewertung mit den gegenwärtigen Preisen der Anlagen vorgenommen wird, 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 müssen.

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 abdecken müssen. Wie allgemein in BU-Modellen üblich, wird dafür der unten beschriebene Annuitätsansatz eingesetzt.

Für jeden Anlage-Typ gehen wir 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

$$A = c \cdot I,$$

wobei

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

oder nach algebraischer Umformung,

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

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

Während der wirtschaftlichen Lebensdauer einer Anlage ändern sich in der Regel mindestens zwei Parameter, die einen starken Einfluss auf die Kostenbestimmung haben: die mit der Auslastung variierenden jährlichen Ausbringungsmengen der Anlage und der Preis der Anlage. Insofern diese Änderungen prognostiziert werden können, sind sie bei der Preissetzung in Betracht zu ziehen, da ein zukünftiger potentieller Wettbewerber, dessen Preissetzung zu antizipieren ist, von diesen dann geänderten Bedingungen ausgehen wird. In der Annuitätsformel können diese Entwicklungen berücksichtigt werden, indem die Formel für q wie folgt spezifiziert wird:

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

wobei

g = prognostizierte durchschnittliche Veränderungsrate des Ausbringungsvolumens der Anlage während der wirtschaftlichen Lebensdauer der Anlage, und

Δp = durchschnittliche erwartete Veränderungsrate im Preis der Anlage (als Modern Equivalent Asset) während der wirtschaftlichen Lebensdauer der Anlage.

Werden entsprechende Werte für q in die Gleichung

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

eingefügt, ergeben sich Amortisationsbeträge A für die sukzessiven Jahre, die sich ceteris paribus von Jahr zu Jahr entsprechend dem Faktor $(1+g)$ verändern. Auf diese Art und Weise wird gewährleistet, dass jeder zukünftigen Einheit an Leistungsmenge derselbe Betrag an Abschreibung zugeschrieben wird als einer gegenwärtig erbrachten Einheit. Einem analogen Argument folgend, stellt der Faktor Δp sicher, dass zu jedem Zeitpunkt der Abschreibungsbetrag proportional zum dann geltenden Wert der Anlage

erfolgt. Hieraus folgt, dass die Amortisationsbeträge A zukünftiger Perioden größer oder kleiner als der gegenwärtige sein können, abhängig davon, ob g und Δp positive oder negative Werte einnehmen, bzw. ob der Wert von $(1+g)*(1+\Delta p)$ größer oder kleiner als 1 ist. Der erwartete Wert von Δp wird bei Investitionsgütern mit großem technischen Fortschritt eher negativ und bei denen ohne solchen Fortschritt im Einklang mit der allgemeinen Inflation eher positiv sein. Bei am Anfang geringer aber später im Investitionszyklus starker Auslastung der Anlage wird der Wert von g positiv, bei umgekehrtem Verlauf der Auslastung eher negativ sein.

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

4.4 Opex

Dieser Typ von Kosten wird in BU-Kostenmodellen in der Regel nicht in Abhängigkeit von den sie verursachenden Aktivitäten modelliert, weil die dazu benötigten Informationen nicht vorliegen. Es ist deshalb üblich, Opex in der Form von Prozentaufschlägen auf die Investitionswerte der Anlagen zu bestimmen. Für die Bestimmung dieser Prozentaufschläge wird auf vorliegende Erfahrungswerte aus anderen Projekten des WIK zurückgegriffen.

Opex wird somit in den zu erstellenden BU-Modellen entsprechend folgender Gleichung ermittelt:

$$O_i = ocf_i I_i$$

wobei

$$O_i = \text{Opex für den Anlagentyp } i,$$

$$I_i = \text{Gesamte Investition in den Anlagentyp } i,$$

$$ocf_i = \text{Faktor, der Opex als Anteil am Investitionswert des Anlagentyps } i \text{ bestimmt, und}$$

$$i = \text{Index über alle Anlagentypen.}$$

4.5 Besondere Aspekte der Kostenbestimmung

Zu den besonderen Aspekten gehören die Kosten von extern beschafften Kapazitäten (hier insbesondere Mietleitungen), die Berücksichtigung von gemeinsamer Nutzung von Infrastruktur durch das modellierte Netz und von anderen Trägern sowie die Kosten von extra Spektrum, das evtl. für die Terminierung eingesetzt werden muss:

- Bei extern beschafften Kapazitäten werden die dafür zu entrichtenden Mietbeträge, die auf den konkreten österreichischen Mietleitungstarifen basieren, anstelle der sonst anzusetzenden Capex und Opex eingesetzt.
- Falls Anlagen der Infrastruktur (z.B. Masten) mit einem anderen Träger gemeinsam genutzt werden, werden dem modellierten Netz die Kosten der Anlagen nur anteilig zugerechnet. Die dabei anzusetzenden Anteile werden entsprechend den gegebenen Nutzungsverhältnissen abgeleitet, wobei auch auf Erfahrungswerte zurückgegriffen wird.
- Da Terminierung von Sprachverbindungen einen relativ geringen Teil der Leistung eines Mobilfunknetzes ausmacht, wird für die zusätzliche Erbringung dieser Leistung in den meisten Fällen kein zusätzliches Spektrum benötigt. Für diesen Fall entstehen dann keine durch Terminierung zusätzlich verursachten Frequenzkosten. Für den Fall jedoch, dass zusätzliches Spektrum für die Bereitstellung von Terminierung benötigt würde, d.h. zusätzlich gegenüber dem Fall, in dem es keine Terminierung gibt, wäre dieses zusätzliche Spektrum dem bestehenden exogen hinzuzufügen und mit einem Preis zu versehen. Die dadurch entstehenden Kosten würden in dem Rechenlauf, bei dem Terminierung inbegriffen ist, dadurch erfasst, dass sie den Netzgesamtkosten hinzugerechnet werden.

4.6 Bestimmung der Gesamtkosten und Kosten für einen Dienst

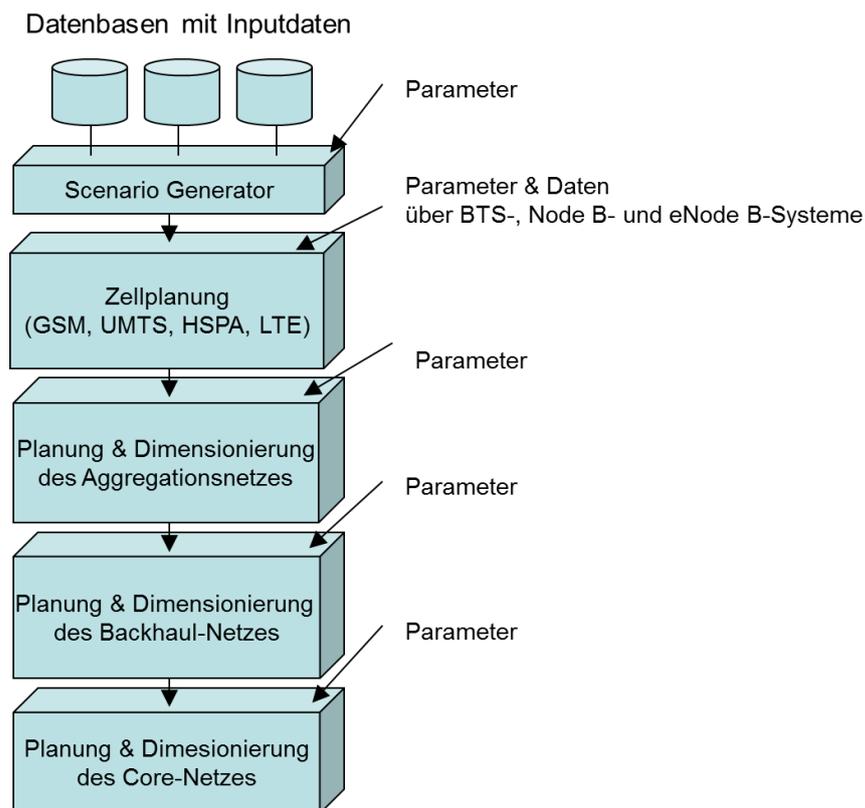
Im Pure LRIC-Ansatz, der für die Kosten der Terminierung im Mobilfunknetz anzusetzen ist, wird bei der Bestimmung der Kosten von Terminierung von den Gesamtkosten ausgegangen, die durch Aufsummierung von annualisierten Capex und von Opex über alle Anlagen entstehen. Diese sind jeweils zweimal zu bestimmen, einmal mit und einmal ohne Bereitstellung von Terminierung. Die Differenz zwischen diesen beiden Gesamtkosten sind dann die Kosten dieses Dienstes; die Kosten pro Minute ergeben sich, wenn diese Differenz durch das Volumen an Terminierung dividiert wird.

5 Merkmale des Software-Tools

Das Modell wird durch eine Software implementiert, in der die Algorithmen zum Netz-Design in der Programmiersprache C++ geschrieben und mit MS Visual Net kompiliert worden sind, wobei es für jeden der funktionalen Blöcke ein Modul gibt. Die auf C++ basierenden Funktions-Module, in Form der kompilierten DLL (Digital Link Libraries), stehen in einer direkten Kommunikation mit einem in MS Excel implementierten Master-Programm, welches die zusätzlichen Funktionalitäten einer nutzerfreundlichen Oberfläche einschließlich Datenanalyse und Managementfunktionen zur Verfügung stellt. Das Master-Programm enthält auch das Kostenmodul, das gänzlich in MS Excel geschrieben ist.

Das MS Excel-Masterprogramm steuert die in C++ geschriebenen Funktions-Module, die den fünf wichtigen Netzplanungsaufgaben des Modells entsprechen. Abbildung 5-1 zeigt diese fünf Module und das lineare Verhältnis zwischen ihnen.

Abbildung 5-1: Struktur der Funktions-Module für die Netzplanung



Jedes Modul verlangt sein eigenes Szenario in Bezug auf Netzdesign und Topologie und die Bereitstellung der mit diesen Szenarien einhergehenden Parameter. Die jeweils relevanten Parameterwerte sind zum Teil Inputs von vorhergehenden Modulen, zu einem weiteren Teil müssen sie vom Nutzer als exogene Größen eingegeben werden. Das MS Excel-Masterprogramm steuert die Interaktionen zwischen den DLL, indem es die Ergebnisse des Vorgänger-Moduls als Eingabegrößen für das Folgemodul aufbereitet und neue exogene Parameterwerte, die dem spezifischen Szenario für das Folgemodul entsprechen, eingibt. Nach Beendigung der Netzplanungs-Berechnungen werden alle relevanten Kostentreiber-Informationen an das Kostenmodul weitergeleitet. Alle Berechnungen zur Bestimmung der Kosten sind linear und bedürfen keiner Iterationen, so dass das Kostenmodul ohne Probleme gänzlich in MS Excel programmiert worden ist.

Literatur

- A. Elnashar, Design, Deployment and Performance of 4G-LTE Networks, a Practical Approach, Wiley, 2014
- EU-Kommission, Recommendation on the Regulatory Treatment of Fixed and Mobile Termination Rates in the EU, 7 May 2009.
- A. E. García, L. Rodríguez de Lope, K. D. Hackbarth, Application of cost models to traffic dimensioning with QoS restrictions, *Annals of Telecommunications*, 65 (3/4), 2010.
- H. Holma, A. Toskala, WCDMA for UMTS – HSPA Evolution and LTE, 5th edition, John Wiley and Sons Ltd., 2010.
- B. W. M. Kuipers, L. Correia, Modeling the Relative MIMO Gain, in: IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008
- S. Lin, B. W. Kernigham, "An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem", *Operations Research*, 1973.
- K. Lindberger, "Blocking for multi-slot heterogeneous traffic streams offered to a trunk group with reservation", in: M. Bonatti and M. Decina (eds.), *Traffic Engineering for ISDN, Design and Planning, Proceedings of the 5th ITC Seminar*, 1988, 151–160.
- A. Portilla-Figueras, S. Salcedo-Sanz, K. D. Hackbarth, F. Lopez-Ferreras, G. Esteve-Asensio, Novel heuristics for cell radius determination in WCDMA systems and their application to strategic planning studies, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009.
- J.E. Sanchez-Garcia, et. al., "Strategic Mobile Network Planning Tool for 2G/3G Regulatory Studies", in: J. del Ser, *Mobile Lightweight Wireless Systems*, Springer, 2011.
- UMTS Forum, "3G Offered Traffic Characteristics", UMTS Forum Report Nr. 33, November 2003.
- UMTS Forum, "Mobile traffic forecasts 2010-2020", UMTS Forum Report Nr. 44, January 2011.
- WIK-Consult, "Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz 2010", Referenzdokument, veröffentlicht auf der Internetseite der Bundesnetzagentur, 2010.
- WIK-Consult, "Mobile Termination Cost Model for Australia", Report, veröffentlicht auf der Internetseite der Australian Competition & Consumer Commission, 2007.

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
Abteilungsleiter Post, Logistik und Verkehr	Alex Kalevi Dieke
Direktor	J. Scott Marcus
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