

EIN GEMEINSAMES FUNKNETZ FÜR UMTS IN DER SCHWEIZ

TECHNISCHE ASPEKTE

GUTACHEN VON: PROF. PETER E. LEUTHOLD
DR. JÜRGEN KEMPER
INSTITUT FÜR KOMMUNIKATIONSTECHNIK,
ETH ZÜRICH

MÄRZ 2002

Inhaltsübersicht

1 Ausgangslage und Problemstellung	
1.1 Ausgangslage	1
1.2 Problemstellung	1
1.3 Vorgehensmethodik	1
1.4 Inhaltsübersicht	2
2 Aufbau und Funktionsweise von UMTS	
2.1 Grundlagen und Funktionsprinzip (WCDMA)	2
2.1.1 Übertragungsverfahren	2
2.1.2 Zellularstruktur und Handover	3
2.1.3 Leistungsverhältnisse	4
2.2 UMTS-Architektur	4
2.2.1 «Shared Networks»	5
2.2.2 Common Shared Network (CSN)	6
2.2.3 Multioperator RAN (MRAN)	7
3 Betrachtungen zur Systemrealisierung und -effizienz	
3.1 Allgemeine Betrachtungen	8
3.1.1 Frequenzuteilung	8
3.1.2 Leistungssituation an der Basisstation (Node B)	9
3.2 Common Shared Network (CSN)	12
3.2.1 Gleichmässige Verteilung der Verbindungen auf verschiedene Kanäle	12
3.2.2 Sendeleistung unter Berücksichtigung des Bündelgewinns	13
3.3 Multioperator RAN (MRAN)	14
3.4 Technische Realisierungsaspekte	14
3.5 Schlussfolgerungen	15
4 Strahlungsbelastung	
4.1 Grundlagen	15
4.1.1 Feldgrössen und Grenzwerte	15
4.1.2 Wellenausbreitung	17
4.2 Sendeleistungen und Grenzfeldstärken in Zellularnetzen	19
4.2.1 Uniformes Zellularnetzmodell	19
4.2.2 Picozellen	22
4.3 Network Sharing und Strahlungsbegrenzung	22
4.3.1 Netzdaten für verschiedene Sharing Modes	22
4.3.1.1 Zellen mit einem Frequenzkanal	23
4.3.1.2 Zellen mit mehreren Frequenzkanälen	25
4.3.2 Kompatibilität mit anderen Funkdiensten	26

5	Schlussfolgerungen	
5.1	Vergleich CSN und MRAN mit Einzelnetzbetrieb	.27
5.1.1	Technische Aspekte	.28
5.1.2	Strahlungsrelevante Aspekte	.28
5.1.3	Nichttechnische Aspekte	.30
5.2	Diskussion	.30
5.2.1	Ergebnisse	.30
5.2.2	Vorschlag für eine hybride Lösung	.31
6	Zusammenfassung	
6.1	Zielsetzung	.33
6.2	Ergebnisse	.33
6.3	Empfehlungen	.34
7	Literaturverzeichnis	.35

1 Ausgangslage und Problemstellung

1.1 Ausgangslage

Im Jahre 2002 soll die erste Phase des Roll-out von UMTS erfolgen. Bekanntlich haben vier Netzbetreiber eine Lizenz in der Schweiz ersteigert: Swisscom (als ehemalige Monopolistin in dominanter Position), Orange, Sunrise und Telefonica. Unter Berücksichtigung ökonomischer, rechtlicher und umweltrelevanter Rahmenbedingungen, wobei zu den Letzteren auch die Minimierung der Strahlenbelastung zu zählen ist, stellt sich die Frage, ob an Stelle von vier einzelnen Funknetzen nicht der Aufbau und Betrieb eines *gemeinsamen UMTS-Funknetzes* zweckmässig wäre.

Eine umfassende Beantwortung erfordert neben Abklärungen über die Aufrechterhaltung eines angemessenen Wettbewerbs und die Einhaltung rechtlicher Gegebenheiten eine Untersuchung der *technischen Vor- und Nachteile* einer solchen Lösung. Ohne weiteres einzusehen sind für die einzelnen Netzbetreiber massive *Kosteneinsparungen* beim gemeinsamen Netzaufbau und -betrieb, eine *Beschleunigung* des Roll-out sowie eine *Vereinfachung der Koordination* im Hinblick auf die Einhaltung der Strahlungsgrenzwerte.

Die ökonomischen Aspekte einschliesslich der Probleme des Wettbewerbs werden in einem separaten Gutachten abgehandelt [1], dasselbe gilt für die rechtliche Seite einer Funknetzzusammenlegung [2]. Dabei ist den unterschiedlichen Integrationsgraden, die technisch möglich sind, Rechnung getragen worden.

1.2 Problemstellung

Die vorliegende Studie setzt sich allein mit der Frage des technischen Aufbaus und Betriebs eines gemeinsamen UMTS-Funknetzes und den zu erwartenden Vor- und Nachteilen auseinander. Insbesondere geht es um folgende Abklärungen:

- Ist eine Effizienzsteigerung durch Nutzung gemeinsamer Radioressourcen möglich?
- Kann eine Verminderung der Strahlungsbelastung erreicht werden?
- Sind besondere technische Probleme beim gemeinsamen Netzaufbau zu berücksichtigen?

Von grosser Bedeutung ist dabei die Einhaltung der Grenzwerte für die Strahlenbelastung, die durch die Verordnung über die nichtionisierende Strahlung (NISV) [3] gegeben ist.

1.3 Vorgehensmethodik

Die vorliegende Studie geht davon aus, dass die einzelnen Netzbetreiber – entsprechend der Situation in der Schweiz – über mehr oder weniger identische Lizenzen mit je drei aneinander grenzenden Aufwärts-(Uplink, UL-) und Abwärts-(Downlink, DL-)Kanälen von 5 MHz Bandbreite im WCDMA-Standard verfügen. Hinzu kommt je ein 5 MHz-Kanal im TDD/CDMA-Standard. Letzterer weist bezüglich der hier anzustellenden Betrachtungen keine Eigenschaften auf, die eine besondere Untersuchung rechtfertigen.

Bei allen Abschätzungen, Berechnungen und Simulationen geht es um den *Vergleich* des gemeinsamen

Netzes mit dem Einzelnetz, das jeder Betreiber erstellen müsste bzw. mit der Überlagerung der vier Einzelnetze. Möglichkeiten, dass nur zwei oder drei Netzbetreiber ein gemeinsames Funknetz erstellen, werden ebenfalls betrachtet.

Die Idee gemeinsam aufgebauter und betriebener Netzwerke ist keinesfalls neu. Bekannte Firmen wie z.B. Ericsson und Nokia machen seit einiger Zeit Reklame für Netzausrüstungen, die für zwei und mehr Operatoren den Betrieb eines gemeinsamen Funknetzes mit unterschiedlichem Integrationsgrad ermöglichen. In Anbetracht der nur noch knapp bemessenen Zeiträume, die für den Roll-out zur Verfügung stehen, werden in dieser Studie lediglich solche Lösungen untersucht, deren Realisierung mittels kommerziell erhältlicher Einrichtungen gewährleistet ist.

1.4 Inhaltsübersicht

Zunächst erfolgt eine kurze Einführung in den Aufbau und die Funktionsweise von UMTS, soweit dies für das Verständnis der folgenden Ausführungen notwendig ist. Dann werden die verschiedenen Prinzipien zur gemeinsamen Nutzung der Netze (Shared Networks) beschrieben. Anschliessend erfolgen entsprechende Berechnungen und Simulationen in typischen topographischen und verkehrstechnischen Szenarien, die eine Aussage über den Gewinn bei optimalem Einsatz der Ressourcen zulassen.

Ein weiteres Kapitel ist dem Thema Strahlungsbelastung gewidmet. Hier müssen zunächst einige Grundlagen der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen und deren Auswirkung auf Biosysteme erwähnt werden. Ferner erfolgt eine kurze Zusammenfassung wichtiger Begriffe und Grenzwerte der NISV. Hernach werden unter vereinfachten Annahmen Abschätzungen über die Strahlungsverhältnisse bei gemeinsam betriebenen Funknetzen durchgeführt.

Den Schluss bilden die Zusammenstellung und die Würdigung der Ergebnisse sowie das Ziehen von Konsequenzen in Form entsprechender Empfehlungen.

2 Aufbau und Funktionsweise von UMTS

2.1 Grundlagen und Funktionsprinzip (WCDMA)

2.1.1 Übertragungsverfahren

Die Funkschnittstelle (Air Interface) von UMTS trägt die Bezeichnung UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access). Sie ermöglicht die drahtlose Kommunikation zwischen Handy oder allgemeiner «Benutzer-Endgerät» (User Equipment, UE) und der Basisstation (BTS). Für die Mehrfachausnutzung eines Kanals, der eine Bandbreite von 5 MHz aufweist und für die Aufwärtsverbindung UE - BTS (UL) im Bereich 1920 bis 1980 MHz bzw. für die Abwärtsverbindung BTS - UE (DL) im Bereich 2110 bis 2170 MHz liegt, wird *Codemultiplex* (Code Division Multiple Access, CDMA) verwendet. Bei diesem Verfahren belegen die Signale aller Netzteilnehmer denselben Kanal; sie unterscheiden sich durch einen *individuell zugewiesenen Code* (Channelization Code), mit dem sie beim Aussenden gespreizt bzw. beim Empfang rückgespreizt werden. Als *Trägermodulation* verwendet man Vierphasenmodulation (4PSK). Die Sendeleistung jeder einzelnen Teilnehmerverbindung sowohl im UL als auch im DL wird einer *sehr schnellen Regelung* unterworfen,

so dass gerade noch eine ungestörte Übertragung möglich ist. Dadurch erreicht man eine *minimale Sendeleistung* im Kanal, die nicht nur die Strahlungsbelastung in der Umgebung gering hält, sondern auch das *nicht vollständig unterdrückbare Übersprechen* zwischen den gleichzeitig aktiven Netzteilnehmern (multiple access interference, MAI) sowie zwischen benachbarten Kanälen (adjacent channel interference power ratio, ACIR) minimiert. Da die Teilnehmersignale im Netz näherungsweise orthogonal und damit nur sehr schwach korreliert sind, bildet die Summe ihrer Leistungen ungefähr die Gesamtleistung im Kanal. Letztere wächst also mit steigender Anzahl aktiver Teilnehmer an, erzeugt aber auch eine zunehmende MAI, die ihrerseits eine Hochregelung der Sendeleistung bewirkt, d.h. man gelangt in einen Zustand, wo die einzelnen Sendeleistungen an der Grenze des Regelbereichs anstehen und keine brauchbare Verbindung mehr möglich ist. So lassen sich z.B. maximal nur 108 gleichzeitige Sprachverbindungen (50% Sprechpausen) pro Kanal betreiben. Praktisch reduziert sich dadurch die Fläche der Funknetzzelle, die von einer BTS versorgt werden kann (cell breathing). UMTS funktioniert also am besten bei minimalen Sendeleistungen für die einzelnen Teilnehmerverbindungen sowie bei geringer Auslastung. Die Frage, ob UMTS eine rationellere Ausnutzung der Frequenzbänder im Vergleich zu GSM erlaubt, ist heute umstritten; CDMA hat aber noch andere funktionelle Vorteile, auf die hier nicht näher eingetreten werden soll.

UTRA erlaubt die Übertragung von Bitraten bis 2 Mbit/s, dies allerdings nur im TDD/CDMA-Standard. Für WCDMA liegen die Werte erheblich tiefer; vor allem bei Verbindungen aus Fahrzeugen sind Bitraten von 144 bis 384 kbit/s realistisch.

2.1.2 Zellularstruktur und Handover

UMTS ist wie GSM ein *zellulares Mobilfunksystem*, d.h. das zu versorgende Gebiet wird je nach Funkverkehrsaufkommen in grössere und kleinere, sich mehr oder weniger überlappende Zellen aufgeteilt. Nachstehend sind typische Zellen mit ihren Zellradien angegeben:

– Picozellen	100 m
– Microzellen	500 m
– Macrozellen	2000 m
– Rural-Zellen	8000 m

Pico- und Microzellen werden etwa 80% aller Zellen ausmachen.

Eine Zelle kann von einer rundstrahlenden Antenne im Zentrum versorgt werden. Oft bedient man aber drei grössere Zellen mit drei Sektorantennen (120°) von einem gemeinsamen Standort aus. Jede Zelle verwendet einen eigenen Code, den sog. Scrambling Code, mit dem die gespreizten Teilnehmersignale vor der Trägermodulation nochmals codiert werden. Damit ist es im Gegensatz zu GSM möglich, benachbarte Zellen auf der gleichen Frequenz bzw. im gleichen 5 MHz-Kanal zu betreiben; die Separation erfolgt auf Grund des zelleneigenen Scramblingcodes.

Bewegt sich nun ein UE durch ein Gebiet, so müssen die Zellen gewechselt werden, wobei natürlich die Verbindung keinen störenden Unterbruch oder gar Abbruch erleiden darf. Das Weiterreichen eines kommunizierenden UE von Zelle zu Zelle wird als *Handover* bezeichnet. Von «Soft Handover» spricht man dann, wenn bei überlappenden Zellen zwei oder mehrere Verbindungen parallel aufgebaut werden. Die schlechteste kann dann abgebrochen werden, ohne dass die Kommunikation auch nur den geringsten Einbruch erleidet. Daneben gibt es den sog. «Hard Handover», wo die alte Verbindung abgebrochen und

eine neue Verbindung aufgebaut werden muss. Bei Diensten wie z.B. Sprachübertragung (circuit switched services, CS services) hat dies in kürzester Zeit zu geschehen. Bei paketorientierten Diensten wie z.B. Datenübertragung (packet switched services, PS services) spielt ein kleiner Unterbruch keine Rolle. Die Steuerung des Handover erfolgt mittels Protokollen. Je nach Situation (Handover im gleichen Subnetz oder in verschiedenen Netzen) ist der Ablauf komplizierter und führt zum Einbezug höherer Ebenen des Netzmanagements.

2.1.3 Leistungsverhältnisse

Die *maximale Sendeleistung* des UE liegt bei 125 bis 250 mW und ist damit 16 bzw. 8 mal geringer als diejenige eines GSM-Handy [4]. Allerdings müssen dabei die bis zu einem Faktor 4 geringeren Zellradien bei UMTS berücksichtigt werden. Die *mittleren Sendeleistungen* sind *stark heruntergeregelt* und betragen in ländlicher Umgebung (grosse Zellen) nur etwa 7 mW bzw. in städtischer Umgebung (kleine Zellen) ca. 0.6 mW.

Die Sendeleistung der BTS hängt von der Zellengrösse, von der Anzahl gleichzeitiger Funkverbindungen zu den Teilnehmern sowie von der Verteilung der UE innerhalb der Zelle ab. Man geht davon aus, dass die *maximale Sendeleistung* bei 300 bis 400 W ERP liegen wird. ERP (equivalent radiated power) bedeutet dabei die rein rechnerisch ermittelte Leistung, wenn eine Rundumabstrahlung mit maximalem *Antennengewinn* erfolgen würde. Letzterer beträgt z.B. bei Sektorantennen 11 bis 17 dBi, die wirklich abgestrahlte Leistung ist also erheblich kleiner. Für Vergleichszwecke hat sich aber der ERP-Wert eingeführt. Wie bei den UE weist auch die *mittlere Sendeleistung* der BTS erheblich tiefere Werte auf; bei Macrozellen rechnet man mit 10 bis 20 W ERP.

Für die Steuerung des Verbindungsaufbaus und -abbaus sowie weiterer Funktionen ist ein *Kontrollkanal* ständig aktiv. Er belegt ebenfalls die volle Bandbreite von 5 MHz; dank der relativ niederen Datenrate des Steuersignals kann eine grosse Codespreizung angewendet werden, die ihrerseits eine sichere Übertragung mit geringer Sendeleistung erlaubt. So rechnet man in Macrozellen mit Werten kleiner als 2 W ERP.

2.2 UMTS-Architektur

Bild 2.1 zeigt ein vereinfachtes Schema des Aufbaus von UMTS. Es besteht aus drei wesentlichen Teilen: das Radio Access Network (RAN), das Core Network (CN) und das Service Network (SN).

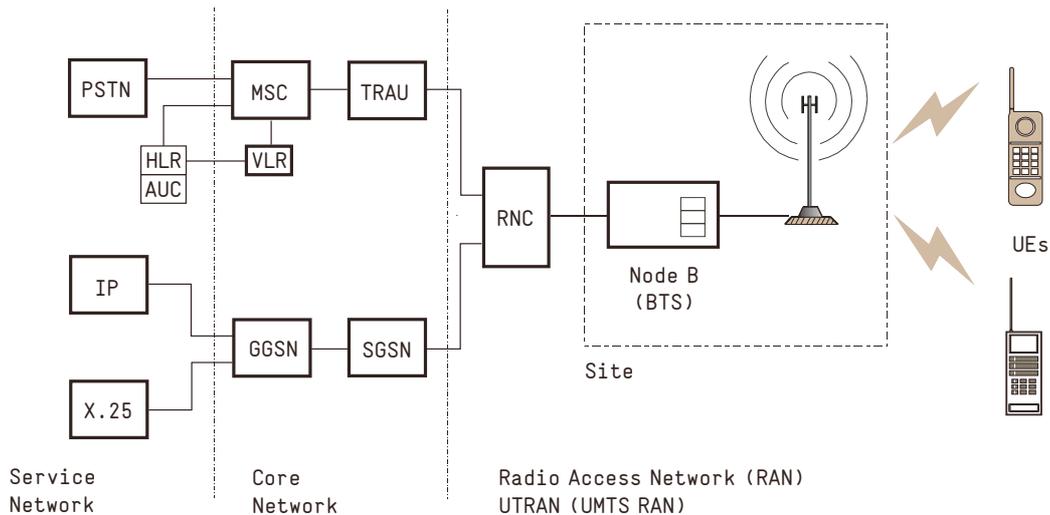


Bild 2.1: UMTS-Architektur

Das RAN umfasst die mobilen Teilnehmer UE, den Site mit der Sende- und Empfangsantenne und dem sog. «Node B» (BTS) sowie den Radio Network Controller (RNC). Der Node B enthält Geräte, welche die Codierung, Modulation und weitere Operationen zur Signalverarbeitung vornehmen. Jeder Node B ist mit einem RNC verbunden, der eine Art Vorfeldkonzentrator und Verwaltungseinheit für die ihm zugeordnete Zelle darstellt. Er sorgt für die Signalankopplung an das Core Network (CN).

Das CN muss die Signale vermitteln und an die entsprechenden externen Netze (PSTN, Internet etc.) weiterleiten. Die Vermittlung bei verbindungsorientierten Diensten (CS services) erfolgt durch das Mobile Switching Center (MSC). Dabei sorgt die Transcoder Rate Adaption Unit (TRAU) für die Anpassung der verschiedenen Signalfomate. Für die Mobilitätsverwaltung stehen das Visitor Location Register (VLR) und das Home Location Register (HLR) zur Verfügung, wobei letzteres bereits dem Service Network (SN) zugeordnet werden kann. Zum HLR gehört auch das Authentication Center (AUC), das die Nutzerberechtigung und die UE-Zulassung überprüft. Die paketorientierten Dienste (PS services) werden über den Service GPRS Support Node bzw. Gateway GPRS Support Node (SGSN, GGSN) abgewickelt.

Das SN umfasst schliesslich das Angebot der verschiedensten Dienste mit der gewünschten Dienstqualität (quality of service, QoS), das Marketing sowie das Netzmanagement auf höherer Ebene (Ressourcenverwaltung, Überwachung, Statistik etc.).

2.2.1 «Shared Networks»

Die vom Staat erteilten Lizenzen für den Aufbau und Betrieb von UMTS-Netzen basieren auf der Annahme, dass der Netzbetreiber alle drei Teilnetze gemäss Bild 2.1 in eigener Regie aufbaut und betreibt. Damit ist auch der grösstmögliche Wettbewerb gewährleistet. Gemäss den vorangehenden Ausführungen (Kap. 1) gibt es aber gute Gründe, dass zwei oder mehrere Netzbetreiber grössere oder kleinere Teile des Netzes *gemeinsam* realisieren und darüber Dienste anbieten. Dabei stellt sich die Frage, welche Aufteilungen zwischen eigenen und gemeinsam genutzten Netzteilen (shared networks) zweckmässig sind.

Eine mögliche Lösung besteht darin, dass jeder Netzbetreiber nur in einem *Teilgebiet des Landes* ein vollständiges Netz aufbaut und betreibt und dieses auch zur Nutzung durch die anderen Netzbetreiber zur Verfügung stellt. Man bezeichnet dies als «Geographical Network Sharing» oder «Geographical Split Network». Hierzu ist ein nationales Roaming-Abkommen unter den Netzbetreibern erforderlich, das keine besonderen Probleme ergibt. Technisch ist eine solche Lösung ohne weiteres machbar, wobei sich aber jeder Netzbetreiber mit den gegebenen Netzparametern in den fremden Teilgebieten begnügen muss. Dies hat aber nur ökonomische Konsequenzen, und deshalb wird hier Geographical Network Sharing nicht weiter verfolgt.

Ein weiteres Prinzip der gemeinsamen Nutzung von Teilen des Netzes ist das sog. «Site Sharing». Hier wird der *Standort der Antenne* einschliesslich des Node B (Bild 2.1) von zwei oder mehreren Operatoren verwendet, die Geräte zur Signalaufbereitung im Node B sowie die Antennenelemente am Sendemast unterliegen aber dem individuellen Betrieb. Die Vorteile von Site Sharing liegen auf der Hand (weniger Antennenstandorte!), die Akkumulation verschiedener Antennen am gleichen Ort wirkt sich aber hinsichtlich Strahlungsbelastung in der Umgebung ungünstig aus. Auch diese Lösung soll nicht separat betrachtet werden, sie ist aber Bestandteil der im Folgenden beschriebenen Sharing-Prinzipien.

Beim Blick auf Bild 2.1 erhebt sich die Frage, ob nicht das *ganze* RAN oder sogar das RAN *zusammen mit dem* CN gemeinsam betrieben werden könnte. Im ersten Fall spricht man von «Multioperator RAN (MRAN)» oder auch «Shared UTRAN», im zweiten Fall von «Common Shared Networks (CSN)», «Joint UTRAN with Gateway Core» oder «Shared RAN with Gateway Core». Beide Lösungen haben mehr oder weniger ausgeprägten Einfluss auf den *Wettbewerb* und tangieren die durch die erteilte Lizenz bedingte *Rechtssituation*. Interessant ist auch die Frage, ob ein CSN oder ein MRAN durch eine *Netzwerkoperatoren-Gemeinschaft* oder durch eine *selbständige Gesellschaft* (Mobile Virtual Network Operator, MVNO) betrieben werden soll. Im Folgenden werden aber nur die technischen Implikationen betrachtet.

Die Hersteller von Netzausrüstungen unterstützen die erwähnten «Shared Network»-Lösungen - vor allem in der Roll-out-Phase - und weisen darauf hin, dass alle angebotenen Varianten später wieder den *Ausstieg auf den klassischen Einzelnetzbetrieb* gestatten. Ferner wird stets erwähnt, dass parallel zu einem CSN oder MRAN auch die *Erweiterung durch eigene* (non-shared) Netze möglich sei. Welche Lösungen und Entwicklungen sich längerfristig einstellen werden, hängt stark davon ab, in welchen Grenzen die ursprünglichen *Bedingungen der Frequenzvergabe gelockert* werden und nicht zuletzt auch vom Zeitpunkt und von der Art und Weise der Einführung einer *vierten Generation Mobilfunksysteme*, deren Umriss heute allerdings noch nicht klar erkennbar sind.

2.2.2 Common Shared Network (CSN)

Das CSN stellt eine besonders weitgehende Form des gemeinsamen Netzbetriebs dar. Sie verspricht *technische Vorteile*, weil alle durch die Lizenzen der einzelnen Netzbetreiber zugewiesenen *Radioressourcen in einem Pool zusammengefasst* werden können und damit die Möglichkeit eines *effizienten Einsatzes* besteht. So lassen sich beispielsweise Sites verwenden, die nur in einem einzigen Kanal aktiv sind (single carrier BTS) und dementsprechend zu kostengünstigen Ausrüstungen führen. Umgekehrt ist es natürlich auch denkbar, je nach Verkehrsaufkommen eine dynamische Kanalzuteilung vorzunehmen und wie bei GSM sog. Bündelgewinne zu realisieren (siehe Kap.3).

Die *Nachteile* des CSN bestehen darin, dass sich jeder Netzbetreiber mit den *technischen Gegebenheiten* des gemeinsamen Netzes abfinden muss. Eigene Vorstellungen über planerische und betriebliche Massnahmen wie z.B. lokal zu erzielende Abdeckungsgrade, QoS einzelner Dienste, Überwachung oder die Festlegung freier Parameter im Kontrollkanal lassen sich nicht oder nur auf der Basis einer Ausmarchung mit den übrigen Operatoren realisieren. Unerfreulich ist auch der zentrale Einblick in die Auslastung des Netzes durch die Operatoren und damit in deren Geschäftsverlauf.

Es gibt einige wenige Probleme, die heute noch nicht optimal gelöst sind. Dies gilt beispielsweise für die Handover-Prozedur zwischen einem CSN und dem Netz eines unbeteiligten Netzwerkoperators oder für die Ausgestaltung der statistischen Verkehrserfassung in einem gemeinsam genutzten MSC. Grössere Hindernisse technischer Natur lassen sich aber nicht ausmachen.

Abschliessend sei noch bemerkt, dass bei Einführung eines landesweiten CSN der spätere Übergang zu einzeln betriebenen Netzen eher unwahrscheinlich wäre, da bei den Operatoren das entsprechende technische Know-how fehlt und zuerst akquiriert werden müsste.

2.2.3 Multioperator RAN (MRAN)

Diese Variante beschränkt sich auf den gemeinsamen Betrieb des RAN (Bild 2.1), jeder Netzwerkoperator behält also sein eigenes CN. Im Gegensatz zum CSN werden hier aber die *Radioressourcen nicht gepoolt*, d.h. die Netzbetreiber basieren auf den ihnen durch die Lizenz zugewiesenen Frequenzen. Damit verfügen sie auch über die *Eingriffs- und Kontrollmöglichkeiten* auf Stufe Signalverarbeitung, Steuerung, QoS, Handover, Netzkonfiguration, Statistik etc. Die Hersteller liefern entsprechende RAN-Ausrüstungen für maximal vier Operatoren.

Als *Nachteil* gegenüber dem CSN ist vor allem der *Wegfall des Pooling* der Radioressourcen zu erwähnen. Die Sites müssen demzufolge in mindestens zwei bis maximal vier Kanälen aktiv sein, was entsprechend kompliziertere Ausrüstungen bedeutet. Ebenso lassen sich eigene Vorstellungen des Netzbetreibers über einen optimalen Netz-Layout nicht oder nur in Absprache mit den übrigen Operatoren durchsetzen.

Das MRAN erfüllt auf Grund der vorangehend erwähnten Eigenschaften die ursprünglichen Bedingungen der Lizenzvergabe weitgehend. Hier ist auch ein Szenario realistisch, wonach ein solcher gemeinsamer Aufbau und Betrieb des RAN nur in der Roll-out-Phase erfolgt und später tatsächlich wieder Einzelnetze operativ sind.

3 Betrachtungen zur Systemrealisierung und -effizienz

Im Folgenden sollen Übertragungsaspekte beleuchtet werden, die zu Gunsten oder zu Ungunsten eines *Radio Network Sharing* sprechen. Dabei stehen die Betrachtung der mittleren Sendeleistung der Basisstationen und allfällige Reduktionsmöglichkeiten im Vordergrund.

3.1 Allgemeine Betrachtungen

3.1.1 Frequenzzuteilung

Bild 3.1 zeigt die in der Schweiz erfolgte Frequenzzuteilung an die einzelnen Lizenznehmer.

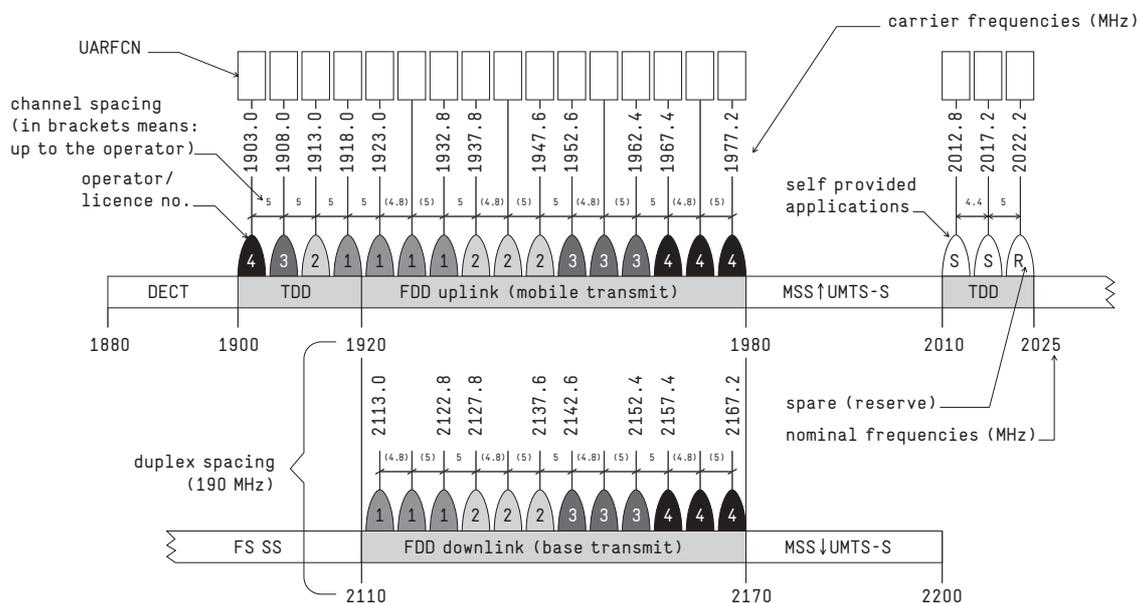


Bild 3.1: Den Schweizer Lizenznehmern zugewiesene Frequenzen: 1 = Swisscom, 2 = Sunrise, 3 = Orange, 4 = Telefonica

Jeder Lizenzbewerber erhielt 2...15MHz für den FDD-Betrieb und 1...5MHz für den TDD-Betrieb. Diese Frequenzzuteilung ist prinzipiell ausreichend, um ein 3Layer-Netz bestehend aus Makro-, Mikro- und Picozellen aufzubauen [5]. Dabei können die Frequenzkanäle in verschiedenen Konfigurationen je nach Verkehrsaufkommen und Kundenbedürfnissen eingesetzt werden. Obwohl sich also die potenziellen Betreiber an und für sich in diesem Punkt in einer relativ komfortablen Situation befinden, stellen sie dennoch die herrschenden Randbedingungen vor schwierige Probleme, wie oben schon ausgeführt wurde. Das in den Lizenzbedingungen zur Auflage gemachte Site-Sharing könnte, obwohl UMTS generell mit kleineren Strahlungsleistungen und -dichten arbeitet, in der Summe und zusammen mit allfälligen zusätzlichen GSM-Installationen dazu führen, dass eine Reduktion aller Emissionen erforderlich ist. Ferner besteht seitens der Bevölkerung eine Verunsicherung, inwieweit die NIS-Verordnung für UMTS überhaupt relevant ist. Im Folgenden wird deshalb der Versuch unternommen, Erläuterungen zur Leistungssituation bei UMTS zu

geben und die Konsequenzen einer weitgehenden Frequenz- und Verkehrscoordination aufzuzeigen, wie sie beim «Common Shared Network» propagiert wird.

3.1.2 Leistungssituation an der Basisstation (Node B)

Während die «User Terminals» oder das «User Equipment» (UE) – also der mobile Systemteil – sich durch sehr moderate Sendeleistungen auszeichnet, besteht beim Node B oder der Basisstation Abklärungsbedarf über die erforderlichen Sendeleistungen und ihre kombinierten Werte.

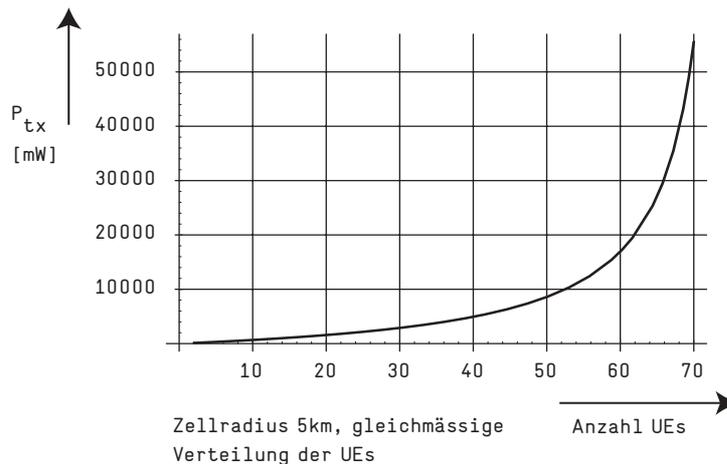


Bild 3.2: Sendeleistung des Node B in Abhängigkeit der Anzahl gleichzeitiger Verbindungen

Bild 3.2 zeigt die Sendeleistung eines Node B in Abhängigkeit der Anzahl gleichzeitiger Verbindungen. Dieser Zusammenhang wurde beispielhaft für eine Gleichverteilung der zugeordneten UEs für den Sprachdienst in einer Zelle innerhalb eines Zellverbands berechnet. Es fällt auf, dass die benötigte Sendeleistung am Anfang etwa linear ansteigt, mit zunehmender Last aber eine mehr als proportionale Zunahme erfährt. Dies hängt mit der Zunahme der Interferenz für die einzelnen UEs durch den im Übertragungskanal bedingten Verlust der Orthogonalität der Channelization-Codes zusammen, die durch Erhöhung der Sendeleistung zu kompensieren ist. Diese Abhängigkeit legt den Schluss nahe, ein Frequenzkanal dürfe nie voll ausgelastet werden, um die Sendeleistung bzw. die Strahlungsbelastung für die nähere Umgebung insgesamt klein zu halten.

Häufig wird die Vermutung geäußert, man sei bei UMTS nie ganz sicher, ob nicht Momentanleistungsspitzen auftreten, die wesentlich höher als die mittlere Gesamtleistung sind oder ob die zulässige Gesamtleistung nicht doch bei starkem Verkehr überschritten werden kann. Die folgende Überlegung soll diesen Befürchtungen quantitativ nachgehen.

Dazu werde das in der BTS erzeugte Multiplexsignal $x(t)$ betrachtet, wie es an den Antennenklemmen beobachtet werden kann:

$$x(t) = A \sum_{k=1}^M \sum_{i=-\infty}^{\infty} [\sqrt{\beta_k} b_{k,i}^I r_T(t-iT) c_k^I(t-iT) \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{\beta_k} b_{k,i}^Q r_T(t-iT) c_k^Q(t-iT) \sin(2\pi f_c t)], \quad (3.1)$$

wobei

$$c_k^{I,Q}(t) = \sum_{n=0}^{N_c-1} c_{k,n}^{I,Q} \cdot r_{T_c}(t-nT_c), \quad c_{k,n}, b_{k,i} \in \{-1, +1\}$$

die Anteile der Spreizsequenz in Phase (Index I) bzw. in Quadratur (Index Q) und A die Signalamplitude darstellt. Die weiteren Funktionen bedeuten:

$$r_T(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < T \\ 0, & \text{sonst,} \end{cases} \quad r_{T_c}(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < T_c \\ 0, & \text{sonst;} \end{cases}$$

mit

$$T/T_c = N_c.$$

Einfachheitshalber werden hier die Wirkungen des Channelization-Codes und des Scramblingcodes ohne Folge für die Allgemeingültigkeit der Aussagen zusammengefasst. Die In-Phasen-Komponenten modulieren die Cosinus-Schwingung mit der Trägerfrequenz f_c , die Quadraturkomponenten die entsprechende Sinus-Schwingung. Die Superposition beider Anteile ergibt das QPSK-Signal $x(t)$ (QPSK: Quadrature Phase-Shift Keying, synonym zu 4Phasenmodulation). Die $b_{k,i}^{I,Q}$ stellen die zu übertragenden Bits des k -ten Kanals mit den möglichen Werten $-1, +1$, die $c_{k,n}^{I,Q}$ die Werte $-1, +1$ der Chips zur Spreizung der Informationsbits dar, wobei genau N_c Chips auf eine Bitdauer T kommen. Der Index i läuft von $-\infty$ bis $+\infty$, eine übliche Annahme bei der mathematischen Darstellung von Signalen. Der Index k bezeichnet den k -ten, durch den Spreizcode $c_k^{I,Q}(t)$ charakterisierten Downlink-Kanal. Die β_k sind die Koeffizienten der Leistungsregelung, die für jeden Kanal k mit Hilfe entsprechender Regelkreise eingestellt werden. Da sich diese Koeffizienten relativ rasch ändern können, variiert auch der Leistungspegel der BTS ständig. Um einen Eindruck davon zu gewinnen, werde im Folgenden die normierte Leistung P_n des Signals $x(t)$ betrachtet:

$$P_n = \overline{x^2(t)} = A^2 \sum_{k=1}^M \beta_k. \quad (3.2)$$

Dieser Ausdruck lässt sich so normieren, dass A^2 die normierte Maximalleistung $P_{n,\max}$ ergibt. Dann muss offensichtlich die Bedingung gelten:

$$\sum_{k=1}^M \beta_k \leq 1. \quad (3.3)$$

Da im übrigen zwei Kanäle (P-CCPCH+SCH, P-CPICH) einen festen Prozentsatz von 20% der Gesamtleistung beanspruchen, lässt sich (3.3) alternativ schreiben:

$$\sum_{k=0}^M \beta_k \leq 1, \quad \beta_0 = 0.2. \quad (3.4)$$

Um einen Eindruck von den Grössenordnungen zu geben, wurde eine Anordnung von Mobilstationen in 5 konzentrischen Kreisen in jeweils 1 - 5 km Abstand von einem Node B bei Annahme eines einfachen Ausbreitungsmodells simuliert. Die Werte sind

Radius	1 km	2 km	3 km	4 km	5 km	Gewichtete Summe + 0.2
β_k	$0.36 \cdot 10^{-3}$	$2.3 \cdot 10^{-3}$	$6.95 \cdot 10^{-3}$	$15.2 \cdot 10^{-3}$	$27.7 \cdot 10^{-3}$	0.79939
Anzahl UE	4	5	9	13	19	+ 0.2 = 0.99939

Tabelle 3.I: Beispiel für Grösse der Leistungskoeffizienten

in Tabelle 3.I aufgelistet. Würde A^2 der normierten maximalen Leistung $P_{n,\max} = 20 \text{ W}$ entsprechen, wäre in diesem Falle die Leistung am Antenneneingang $P_n = P_{n,\max} \cdot 0.99939 \approx 19.99 \text{ W}$, die BTS würde also praktisch mit Vollast laufen; weitere Verbindungen könnten nicht mehr zugelassen werden.

Eine andere Situation ergibt sich, wenn man die momentane Signalamplitude $|x(t)|$ während einer Chipdauer $\nu T_c < t < (\nu+1) \cdot T_c$ analysiert. Man erhält, abgeleitet von (3.1) unter der konstruierten und nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit auftretenden Annahme, dass zufällig alle Chip- und Bitamplituden die Werte +1 annehmen würden, eine Signalamplitude

$$|x(t)|_{\nu T_c < t < (\nu+1) T_c} = \sqrt{2} A \sum_{k=1}^M \sqrt{\beta_k}. \quad (3.5)$$

Berechnet man $|x(t)|$ gemäss (3.5) mit den Werten von Tabelle 3.I, so erhält man

$$|x(t)|_{\nu T_c < t < (\nu+1) T_c} = 8.88 \cdot A \quad (3.6)$$

anstatt des Effektivwerts

$$|x(t)|_{\text{eff}} = \sqrt{x^2(t)} = A. \quad (3.7)$$

Die Momentanleistung $P_{n,\text{mom}}$ gemäss (3.6) ergibt sich zu

$$P_{n,\text{mom}} = \frac{|x(t)|^2}{2} = 39.4 \cdot A^2 \quad (3.8)$$

für die Dauer eines Chips, bei UMTS beträgt diese Dauer $T_c = 26 \text{ ns}$. Es hängt nun sehr stark von der Bandbegrenzung durch das Sendefilter und den Leistungsverstärker vor der Antenne sowie von dessen Dynamikbereich ab, auf welchen Wert die Amplitude in dieser kurzen Zeit überhaupt einschwingen kann. Da aber die Kurvenform natürlich eine grosse Rolle für eine gute Signaltrennung spielt, muss damit der

Leistungsverstärker auf jeden Fall überdimensioniert sein, d.h. die Spitzenleistung für sehr kurze Zeiten muss wesentlich höher liegen können als die mittlere maximale Ausgangsleistung. Gleichzeitig werden an seine Linearität hohe Anforderungen gestellt.

Eine andere Aussage betrifft die Fluktuationen der mittleren Sendeleistung einer Basisstation. Diese lässt sich nicht ohne weiteres auf Grund plausibler Überlegungen angeben, da einerseits aus Interferenzgründen nur eine begrenzte Anzahl Mobilstationen je Frequenzkanal bedient werden können, andererseits sich diese Mobilstationen aber stochastisch in der Zelle verteilen und damit zufolge der distanzabhängigen Streckendämpfung nur selten die maximale Sendeleistung zur Bedienung aller Mobilstationen erforderlich ist.

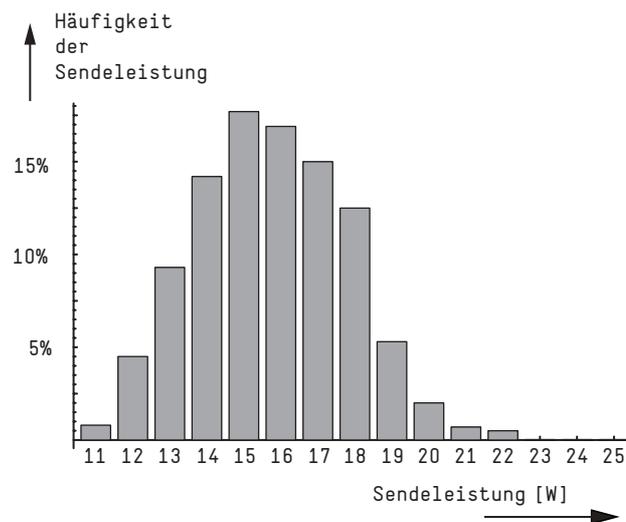


Bild 3.3: Verteilung der Sendeleistungen einer BTS bei hoher Last und zufälliger Verteilung der UEs in der Zelle

Bild 3.3 zeigt die Verteilung der Sendeleistungen bei 1000 Probewerten einer zufälligen, in der ganzen Zelle gleichwahrscheinlichen Verteilung von Mobilstationen bei hoher Last. Dabei stellt man unschwer fest, dass in etwa 1/3 aller Fälle die Sendeleistung bei 15 - 16 W, also deutlich unter dem Maximalwert von 20 W liegt. Die nachfolgenden Betrachtungen über die Verteilung der Verkehrslast beziehen sich auf die Möglichkeit, die erforderlichen gleichzeitigen Verbindungen in zweckmässiger Weise mit verschiedenen Frequenzträgern vorzunehmen. Dies ist abgesehen vom Einsatz mehrerer solcher Kanäle eines einzelnen Betreibers eigentlich nur bei einem Frequenzpooling möglich, wie dies beim Common Shared Network vorgesehen ist.

3.2 Common Shared Network (CSN)

3.2.1 Gleichmässige Verteilung der Verbindungen auf verschiedene Kanäle

Ausgehend von der Charakteristik der Sendeleistung, bei starker Auslastung überproportional zuzunehmen, ergibt eine möglichst gleichmässige Verteilung der Anzahl gleichzeitig benötigter Verbindungen auf verschiedene Kanäle eine eindrucksvolle Reduktion der Gesamtsendeleistung und damit der Strahlungsbelastung.

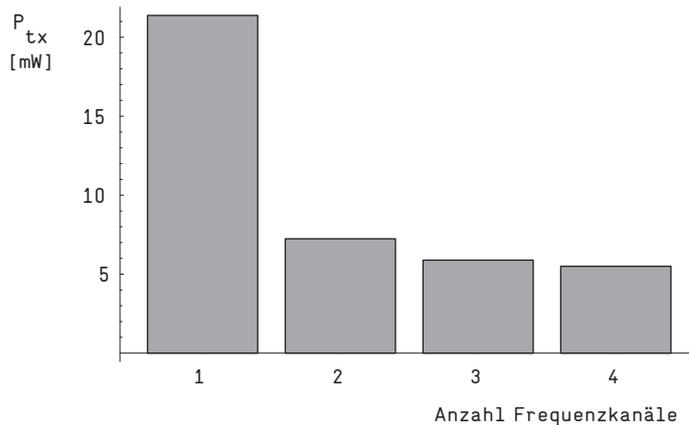


Bild 3.4: Gesamtsendeleistung bei Verteilung von 60 gleichzeitigen Verbindungen auf 1 - 4 Frequenzträger

Bild 3.4 bestätigt diesen Sachverhalt in eindrücklicher Weise. Allerdings ist diese Reduktion auch nur für einen einzelnen Betreiber bei Verwendung von zwei Frequenzkanälen möglich, da die signifikante Reduktion beim Übergang von einem auf zwei Träger erfolgt. Eine weitergehende Aufteilung auf 3 oder 4 Frequenzkanäle bringt in den meisten Fällen nur noch eine geringe Leistungsreduktion.

3.2.2 Sendeleistung unter Berücksichtigung des Bündelgewinns

Wie in Bild 3.5 gezeigt wird, lässt sich neben der Verteilung der Verbindungen auf verschiedene Träger auch noch der Bündelgewinn nutzbar machen. Es wird bei diesen Berechnungen von Sprachverkehr mit einer

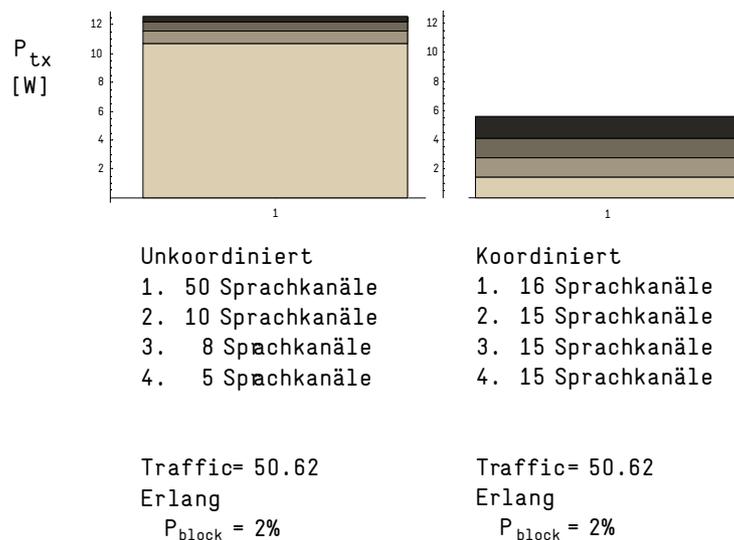


Bild 3.5: Unkoordinierter vs. koordinierter Betrieb bei 4 Betreibern mit Realisierung des Bündelgewinns

Blockierwahrscheinlichkeit von 2% ausgegangen. Bei einem unkoordinierten Betrieb (linke Bildhälfte) und einer ungleichmässigen Belastung der verschiedenen Betreiber resultiert eine abgestrahlte Gesamtleistung des

Node B von 12.6 W. Bei Koordination hinsichtlich der gesamten Verkehrslast sowie der möglichst gleichmässigen Verteilung der Sprachkanäle auf die verschiedenen Trägerfrequenzen reduziert sich die Sendeleistung auf 5.54 W. Hätte man die Anzahl von 73 Sprachkanälen beibehalten und damit auf den Bündelgewinn verzichtet, wäre man allein schon mit dieser Massnahme auf 6.85 W heruntergekommen.

Noch deutlicher wird die kombinierte Massnahme der Verkehrs- und der Kanalverteilung beim Bild 3.6. Dieser Berechnung liegt eine gleich hohe Last aller Betreiber zugrunde.

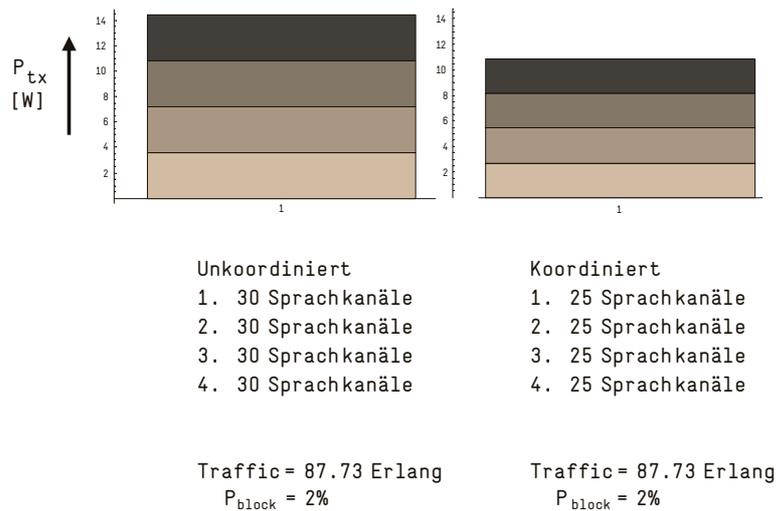


Bild 3.6: Unkoordinierter vs. koordinierter Betrieb bei 4 Betreibern bei gleichmässig hoher Last mit Realisierung des Bündelgewinns

Hier würde die Massnahme der gleichmässigen Verteilung der Sprachkanäle keinen Nutzen mehr bringen. Wohl aber kann bei einer Koordination der Bündelgewinn nutzbar gemacht werden, der sich gesamthaft in einer Reduktion der Anzahl Sprachkanäle von 120 auf 100 und damit wiederum in einer Reduktion der abgestrahlten Leistung von 14.4 W auf 10.8 W ausdrückt, eine Ersparnis um fast 25%!

3.3 Multioperator RAN (MRAN)

Wie schon früher erwähnt, resultieren die Gewinne zufolge der möglichst gleichmässigen Verteilung der Verkehrslast auf alle Trägerfrequenzen. Sofern dies auf Grund der Struktur nicht möglich ist, fallen diese Gewinne weitgehend dahin. Mit dem MRAN bestehen vorwiegend Einsparungsmöglichkeiten hinsichtlich der Sites inklusive der Antennensysteme, Zuleitungen, Filter und der RNCs; ein Lastausgleich bei den abgestrahlten Sendeleistungen ist nur in beschränktem Masse möglich.

3.4 Technische Realisierungsaspekte

Weitere wichtige technische Aspekte, die für ein Sharing von Ressourcen und für eine zwischen verschiedenen Betreibern koordinierte Netzplanung sprechen, betreffen beispielsweise die Nachbarkanal-Interferenzstörungen (ACIR, Adjacent Channel Interference Power Ratio) sowie die Nebenschwingungen

(Spurious Emission) von Sendeanlagen (BTS oder UE), die bei ungünstiger Anordnung der Zellen verschiedener Betreiber eine Einbusse an Verkehrskapazität verursachen können. Die Auswirkungen dieser Art von gegenseitiger Beeinflussung sind am geringsten, wenn wenigstens Site Sharing möglich ist.

CSN- und MRAN-Lösungen werden von verschiedenen Equipment-Herstellern propagiert und angeboten. Dabei scheint es in gewissen Fällen von Equipment her am günstigsten zu sein, wenn sich zwei Betreiber zusammenschliessen. Jedoch gibt es keine prinzipiellen Beschränkungen, auch wenn der Aufwand dann grösser wird.

3.5 Schlussfolgerungen

Ohne Zweifel bietet das Zusammenlegen aller - vor allem auch der frequenzmässigen - Ressourcen eine attraktive Möglichkeit zur Einsparung von Kosten und Reduzierung der abgestrahlten Sendeleistung der Node B (Bild 3.5 und Bild 3.6); damit würde vor allem auch der erhöhten Sensibilität der Öffentlichkeit auf den Einfluss nichtionisierender Strahlung Rechnung getragen. Ein – wenn auch erweitertes – Site-Sharing, wie es beim MRAN vorgeschlagen wird, würde diesem Anspruch weniger gerecht.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Berechnungen wurden auf Grund der Angaben in [6] und [7] vorgenommen.

4 Strahlungsbelastung

4.1 Grundlagen

4.1.1 Feldgrössen und Grenzwerte

Die elektromagnetische Strahlung, die bei UMTS im 2GHz-Bereich an die Umwelt abgegeben wird, stammt einerseits von den BTS und andererseits von den UE. Sie wird sich in ähnlicher Grössenordnung bewegen wie diejenige der GSM-Netze (siehe Abschnitt 3.1.3).

Die vom Bundesrat am 23. Dez. 1999 beschlossene und am 1. Febr. 2000 in Kraft gesetzte Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV, [3]) regelt die zulässige Grenze der Strahlung, die von den BST ausgeht. Massgeblich für deren Intensität ist die *Strahlungsleistungsdichte* S [W / m^2], d.h. also die Strahlungsleistung pro Flächeneinheit. Da S einer direkten Messung kaum zugänglich ist, macht man von der Tatsache Gebrauch, dass bei 2 GHz in wenigen Metern Abstand von der Antenne eine sog. *ebene Welle* vorliegt. Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass der *elektrische* Feldvektor mit dem Betrag E [V / m] und der *magnetische* Feldvektor mit dem Betrag H [A / m] senkrecht aufeinanderstehen. Die Strahlungsleistungsdichte S berechnet sich in diesem Fall zu

$$S = E \cdot H \quad (4.1)$$

und kann als Betrag eines Strahlungsvektors interpretiert werden, der von der Antenne aus in radialer Richtung zeigt - gegebenenfalls eingeschränkt auf einen Sektor. Im freien Raum (Luft) sind E und H über

den sog. Feldwellenwiderstand Z_0 verknüpft, der 377Ω beträgt:

$$E / H = Z_0. \quad (4.2)$$

Wenn also E bekannt ist, lässt sich H bestimmen und umgekehrt. Auch die Strahlungsleistungsdichte ist durch die eine oder andere Grösse bestimmt:

$$S = E^2 / Z_0 = H^2 \cdot Z_0. \quad (4.3)$$

Alle Grössen S , E und H sind hochfrequent und variieren sehr rasch als harmonische Funktionen der Zeit. Man beschränkt sich deshalb auf die Angabe von Mittelwerten, hier die sog. *Effektivwerte*. Die Gleichungen (4.1) bis (4.3) gelten sowohl für die Momentanwerte als auch für die Effektivwerte; im Folgenden werden die Feldgrössen S , E und H stets als Effektivwerte betrachtet. Die Messgeräte erlauben die direkte Ablesung der Effektivwerte.

Da nun die elektrische Feldstärke E einer direkten Messung leicht zugänglich ist, werden in der NISV die Grenzwerte für E angegeben.

In der Europäischen Union (EU) gelten die 1998 vom International Committee for Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) festgelegten Grenzfeldstärken von 60 V/m im Frequenzbereich um 2000 MHz und 40 V/m um 900 MHz. Für UMTS, aber auch für GSM 1800, ist also der Grenzwert 60 V/m, für GSM 900 der Grenzwert 40 V/m verbindlich.

In der NISV wurden nun vorsorglich für «Orte mit empfindlicher Nutzung (OMEN)», d.h. für Wohnungen, Schulen, Kindergärten etc., noch *zehnmal tiefere Grenzwerte* festgelegt, nämlich 6 V/m und 4 V/m. Dies bedeutet für die Strahlungsleistungsdichte S eine *Reduktion um den Faktor 100*.

Man geht davon aus, dass Einflüsse auf die Gesundheit oder allgemeiner ausgedrückt, *biologische Effekte* - sofern solche bei so niedrigen Feldstärken überhaupt existieren sollten - von der Leistungsdichte S der einfallenden Strahlung abhängig sind. Sind also mehrere strahlende Antennen, auch von verschiedenen Netzbetreibern, an einem Mast oder relativ nahe beieinander (z.B. auf einem Dach) angeordnet, so müssen die einzelnen Leistungsdichten S_i zusammengezählt werden. Man spricht in diesem Fall von einer *Anlage*, die wirksame Strahlungsleistungsdichte bestimmt sich nach (4.3) zu

$$S = \sum_i \frac{E_i^2}{Z_0} = \frac{1}{Z_0} \cdot \sum_i E_i^2 = \frac{1}{Z_0} E_{\text{eff}}^2, \quad (4.4)$$

$$E_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_i E_i^2}. \quad (4.5)$$

Die resultierende effektive Feldstärke E_{eff} muss nun ebenfalls den Grenzwerten der NISV genügen, dies ist der sog. *Anlagengrenzwert*. Als Anlage bezeichnet man auch eine Gruppe von UMTS- und GSM-Antennen, da im Frequenzintervall 900 bis 2000 MHz keine merklichen Abweichungen bezüglich der Natur allfälliger biologischer Effekte zu erwarten sind. Für die Kombination UMTS und GSM 1800 gilt demnach der Anlagengrenzwert 6 V/m, für UMTS und GSM 900 ist der Wert 5 V/m festgelegt worden. Diesen Bestimmungen *nicht* unterworfen sind Sendeanlagen mit geringeren Strahlungsleistungen als 6 W ERP.

4.1.2 Wellenausbreitung

Die Strahlungsleistungsdichte S nimmt bekanntlich mit zunehmender Entfernung von der Antenne ab. Besonders einfache Verhältnisse ergeben sich dann, wenn sich eine räumlich in alle Richtungen gleichmässig abstrahlende Antenne (isotrope Antenne) im freien Raum befindet. Ist die gesamte abgestrahlte Leistung $P [W]$ der Antenne bekannt, so resultiert die Strahlungsleistungsdichte S im Abstand d zur Antenne zu

$$S = \frac{P}{4\pi d^2}. \quad (4.6)$$

Mit (4.3) folgt, dass die Feldstärke E proportional $1/d$ abnimmt.

In der Praxis liegen natürlich erheblich kompliziertere Verhältnisse vor. So gibt es keine isotropen Strahler, sondern man muss Dipolantennen verwenden, die räumlich bevorzugte Strahlungsrichtungen aufweisen. Ferner liegt eine Umgebung vor, die Hügel, Wälder, Gebäude usw. aufweist. Diese stellen Hindernisse für die Wellenausbreitung dar; es resultieren die *bekanntesten Effekte* wie z.B. Absorption, Reflexion, Beugung, Streuung und Abschattung. Entsprechend stellt sich eine *inhomogene Feldverteilung* ein, die im Allgemeinen kaum oder nur näherungsweise berechnet werden kann.

Der einfache Fall der in der Höhe h_s über einer unendlich ausgedehnten, ideal leitenden Ebene horizontal angebrachten Dipol-Sendeantenne gemäss Bild 4.1 erlaubt aber die Berechnung der elektrischen Feldstärke im Abstand d und in einer bestimmten Höhe h_e über der erwähnten Ebene, d.h. also am Ort der Empfangsantenne eines UE. Eine längere Rechnung führt auf folgendes Resultat [8]:

$$E = E_0 \cdot \frac{D}{d} \cdot \left| \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{D}{d}\right) \right|, \quad D = \frac{4h_s h_e}{\lambda}. \quad (4.7)$$

Dabei ist E_0 eine vorgegebene Feldstärke im Abstand $d = D$, und λ stellt die Wellenlänge dar; letztere weist bei 2000 MHz den Wert $\lambda = 0.15 \text{ m}$ auf. Bild 4.1 zeigt den Feldstärkeverlauf für Parameter, die etwa denjenigen einer Macrozelle entsprechen.

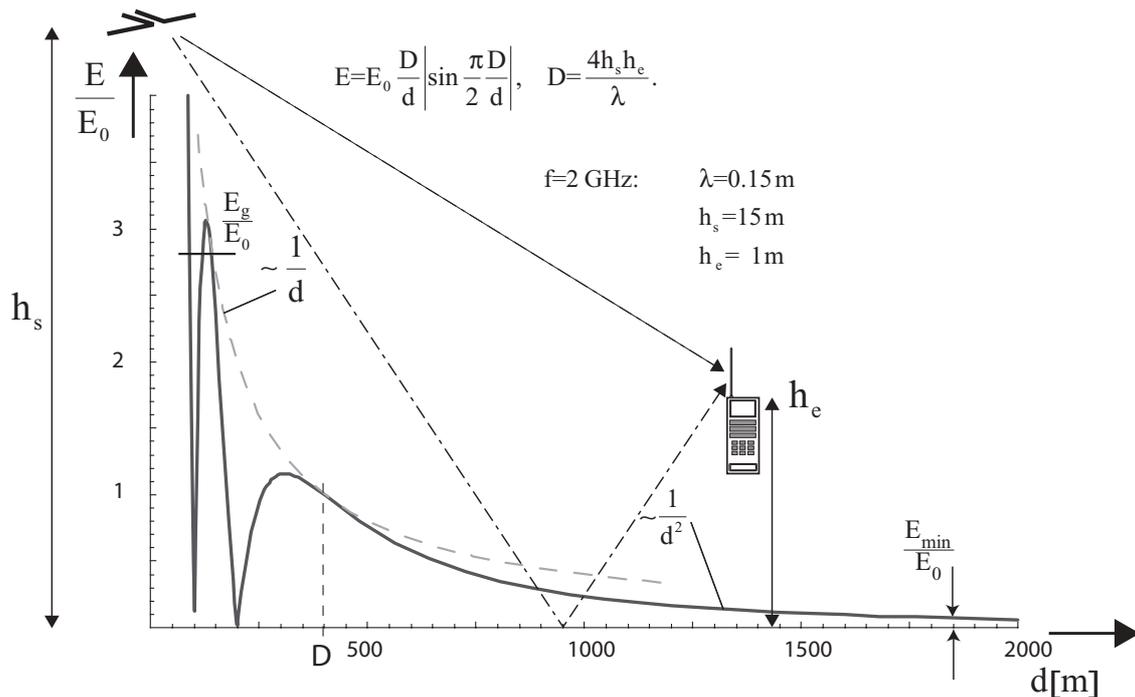


Bild 4.1: Entfernungabhängigkeit der Feldstärke über einer unendlich ausgedehnten ideal leitenden Ebene

Man erkennt, dass bis zu einem Abstand $d = D$ an der Empfangsantenne eine konstruktive und destruktive Überlagerung der direkten und am Boden reflektierten Welle erfolgt, die zu ausgeprägten *Feldmaxima* und *Feldauslöschungen* führt. Die Berandungskurve verläuft hier proportional $1/d$. Für Abstände $d > D$ kann der Betrag der Sinusfunktion in (4.7) näherungsweise durch das Argument der letzteren ersetzt werden, d.h. es resultiert eine Feldabnahme proportional $1/d^2$. Ist der Boden nicht ideal leitend, gibt es keine Feldauslöschungen, sondern nur mehr oder weniger ausgeprägte *Schwankungen* der Feldstärke E unter der Umhüllenden mit dem Verlauf $1/d$. Gleichung (4.7) gilt übrigens auch näherungsweise für eine vertikal angebrachte Sende-Dipolantenne.

Ausgehend vom vorangehend behandelten Spezialfall wurden nun verschiedene *Modelle zur Ermittlung der Feldstärke* auch in *bebauten Gebieten* und im *Innern von Gebäuden* entwickelt. Die damit berechneten Werte sind natürlich als Mittelwerte zu verstehen, die von den aktuellen Werten einer bestimmten topographischen Situation stark abweichen können. Berücksichtigt werden bei diesen Modellen zusätzlich die Frequenzabhängigkeit der Dämpfungsfaktoren, die sog. Überbauungsdichte, Gebäudehöhen, der Einfallswinkel auf Dachkanten, die Anzahl Zwischenwände und Böden usw. Bezüglich Einzelheiten sei auf entsprechende Literatur verwiesen [9]. Praktisch wirkt sich dies durch die Einführung weiterer Faktoren in der Gleichung (4.7) aus, die durch die Frequenz und die genannten topographischen und geometrischen Parameter bestimmt sind und die Feldstärke reduzieren bzw. rascher abklingen lassen. Erhalten bleibt aber die *Grundabhängigkeit vom Abstand d* in der Form

$$E \propto 1/d^m \quad (4.8)$$

wobei der Exponent m im Outdoor-Bereich zwischen 1 bis etwa 2 liegt und im Indoor-Bereich von 3 bis gegen 5 anwachsen kann.

4.2 Sendeleistungen und Grenzfeldstärken in Zellulernetzen

Auf Grund der Ausführungen im vorangehenden Abschnitt liegt es nahe, zwecks *Abschätzung der für die Versorgung grösserer Zellen* (Rural-, Macro- und Microzellen) in ländlichen und städtischen Umgebungen notwendigen Sendeleistungen einen mittleren Feldabfall proportional $1/d$ im Nahbereich $d < D$ und proportional $1/d^2$ in grösserem Abstand $d > D$ anzunehmen. Die *Picozellen* im Indoorbereich werden in einem separaten Abschnitt diskutiert.

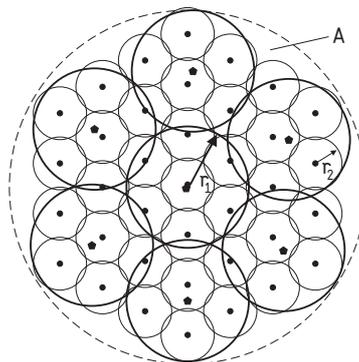
Die Randbedingungen für den Betreiber eines RAN lauten wie folgt:

1. Lückenlose Abdeckung des zu versorgenden Gebietes
2. Gewährleistung einer ausreichenden Verbindungssicherheit auch bei hohem Verkehrsaufkommen
3. Einhaltung der Strahlungsgrenzen gemäss NISV
4. Netzaufbau mit einer möglichst geringen Anzahl Zellen

Bedingung 1 bedeutet, dass die Feldstärke bis zum Zellenrand nicht unter einem bestimmten Wert, der durch die *Systemempfindlichkeit* gegeben ist, fallen darf. Da die Zahl der gleichzeitigen Verbindungen pro Kanal begrenzt ist (Abschnitt 2.1.1.), müssen in Gebieten mit hohem Verkehrsaufkommen zwecks Einhaltung der Bedingung 2 die Zellradien *kleiner* gewählt werden. Die Erfüllung der Bedingung 3 bezieht sich nicht auf die dank rascher Regelung *tief gehaltene mittlere Sendeleistung*, sondern auf die *maximale Ausgangsleistung der Leistungsverstärker* bei maximalem Antennengewinn. Bedingung 4 ergibt sich auf Grund der Forderung nach *möglichst geringen Kosten für den Netzaufbau*.

4.2.1 Uniformes Zellulernetzmodell

Die folgenden Abschätzungen für ein Referenznetz, das mit dem Index 1 gekennzeichnet wird (Bild 4.2), basieren auf der Annahme, dass mit möglichst wenigen, hier der Einfachheit halber *gleich gross*



Versorgungsgebiet A
Netz 1: Zellenzahl N_1
 Radius r_1
Netz 2: Zellenzahl $N_2 > N_1$
 Radius $r_2 < r_1$

Bild 4.2: Uniformes Zellulernetzmodell

angenommenen Zellen eine bestimmte Fläche A abzudecken sei. Bei gegebener Sendeleistung P_1 der BTS (Rundstrahler) ergibt sich der Zellradius r_1 aus der minimalen Feldstärke E_{\min} (Bild 4.1), bei der ein UE gerade noch sicher funktioniert. Aus (4.7) folgt für $d > D$ und $P_1 = \kappa^2 \cdot E_0^2$ die Beziehung

$$E = \frac{k\sqrt{P_1}}{d^2}, \quad k = \pi D^2 / 2\kappa, \quad (4.9)$$

wobei κ eine dimensionsbehaftete Konstante darstellt. Damit findet man den Zellradius zu

$$r_1^2 = \frac{k\sqrt{P_1}}{E_{\min}}. \quad (4.10)$$

Die Anzahl der erforderlichen Zellen folgt nun mit der Zellfläche $a_{z1} = \pi r_1^2$ ohne weiteres zu

$$N_1 = \frac{A}{a_{z1}} = \frac{A}{\pi r_1^2} = \frac{AE_{\min}}{\pi k\sqrt{P_1}}. \quad (4.11)$$

Zur approximativen Berechnung des Radius r_{g1} , bei dem die von der NISV vorgegebene Grenzfeldstärke E_g (Bild 4.1) erreicht wird, geht man von der vereinfachten Gleichung (4.7) aus:

$$E_g = E_0 \cdot \frac{D}{r_{g1}} = \frac{\sqrt{P_1}}{\kappa} \cdot \frac{D}{r_{g1}} = \frac{k_g \cdot \sqrt{P_1}}{r_{g1}}, \quad k_g = \frac{D}{\kappa}.$$

Daraus folgt:

$$r_{g1} = \frac{k_g \sqrt{P_1}}{E_g}. \quad (4.12)$$

Die *kritische Fläche* $a_{g1} = \pi r_{g1}^2$ für $E > E_g$ lässt sich mit der Zellfläche a_{z1} ins Verhältnis setzen. Aus (4.10) und (4.12) erhält man die Beziehung

$$\frac{a_{g1}}{a_{z1}} = \frac{r_{g1}^2}{r_1^2} = \frac{k_g^2}{k} \cdot \frac{E_{\min}}{E_g^2} \sqrt{P_1}. \quad (4.13)$$

Der Anteil a_{g1} an der Zellfläche a_{z1} ist also abgesehen von einer Konstanten durch den Faktor E_{\min} / E_g^2 gegeben und wächst mit der Wurzel aus der Sendeleistung P_1 . Gleichung (4.13) gilt gleichermassen für das Verhältnis der Gesamtfläche $A_{g1} = N_1 \cdot a_{g1}$ zur Versorgungsfläche $A = N_1 \cdot a_{z1}$.

Nun werde ein *zweites Netz* (Index 2) (Bild 4.2) mit *kleineren Zellen* betrachtet, das dieselbe Fläche A versorgt und natürlich $N_2 > N_1$ Zellen benötigt. Entsprechend verringert sich die Sendeleistung P_2 der BTS. Für den Zellradius r_2 findet man unter der vereinfachenden Annahme, dass sich die Konstanten k und k_g nicht ändern, das Resultat

$$r_2^2 = \frac{k\sqrt{P_2}}{E_{\min}}, \quad (4.14)$$

und die (4.11) und (4.12) entsprechenden Beziehungen für die Zellenzahl

$$N_2 = \frac{A E_{\min}}{\pi k \sqrt{P_2}} \quad (4.15)$$

und für den Radius

$$r_{g2} = \frac{k_g \sqrt{P_2}}{E_g}. \quad (4.16)$$

Aus (4.11) und (4.15) ergibt sich die reduzierte Sendeleistung im zweiten Netz zu

$$P_2 = P_1 \cdot \frac{N_1^2}{N_2^2}, \quad N_2 > N_1. \quad (4.17)$$

Ferner folgt der Radius der kleineren Zellen aus (4.10), (4.14) und (4.17) zu

$$r_2 = r_1 \sqrt{\frac{N_1}{N_2}}. \quad (4.18)$$

Zum Schluss sei noch das Verhältnis der Flächen in den beiden Netzen bestimmt, in denen der *Feldstärkegrenzwert* E_g überschritten wird. Mit $a_{g1} = \pi r_{g1}^2$ und $a_{g2} = \pi r_{g2}^2$ resultiert aus (4.12), (4.16) und (4.17) das Verhältnis

$$\frac{a_{g2}}{a_{g1}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{N_1^2}{N_2^2}. \quad (4.19)$$

Für das *gesamte Versorgungsgebiet* A ergibt sich das Verhältnis der ausgestrahlten Leistungen zu

$$\frac{P_{A2}}{P_{A1}} = \frac{N_2 P_2}{N_1 P_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4.20)$$

bzw. das Verhältnis der Zonen mit $E > E_g$ zu

$$\frac{A_{g2}}{A_{g1}} = \frac{N_2 a_{g2}}{N_1 a_{g1}} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (4.21)$$

Aus (4.17) folgt also die wichtige Aussage, dass die Sendeleistung P_2 im Netz 2 mit den kleineren Zellen entsprechend dem *quadratischen* Zellenzahlen-Verhältnis $(N_1/N_2)^2$ verringert wird. Dieselbe Aussage gilt für die Zonen $E > E_g$ gemäss (4.19).

Die Beziehungen (4.20) und (4.21) sind aufschlussreich unter der Annahme, dass die Bevölkerung im Versorgungsgebiet A örtlich gleichverteilt wäre. Man erkennt, dass die *mittlere Strahlungsbelastung* und auch die kritischen Zonen zwar nicht mehr quadratisch, aber proportional dem Zellenzahlverhältnis zurückgehen.

4.2.2 Picozellen

Picozellen werden dort eingesetzt, wo das Verkehrsaufkommen sehr gross ist, also in Stadtzentren, Bahnhofshallen, Flughäfen, Geschäftsgebäuden, Kaufhäusern usw. Für Reichweiten nur bis etwa 100 m werden die Sendeleistungen der BTS so klein, dass die Bedingung $P < 6 \text{ W ERP}$ längstens erfüllt ist und damit gemäss NISV keine Auflagen bestehen. (Abschn.4.1.1). Es muss also lediglich dafür gesorgt werden, dass durch eine *Anhäufung von BTS-Antennen* nicht Anlagegrenzwerte entstehen, welche 6 W ERP überschreiten. Dabei hilft der Umstand, dass vor allem Wände und Böden, aber auch andere Gebäudeelemente und Raumausstattungen eine starke Dämpfung bewirken. Für die mittlere Abschwächung der Feldstärke in Abhängigkeit des Abstandes d gemäss (4.8) ist mit Exponenten im Bereich 3 bis 4 zu rechnen.

4.3 Network Sharing und Strahlungsbegrenzung

Wie bereits in den vorangehenden Kapiteln erwähnt, findet im UL und DL eine sehr *schnelle Sendeleistungsregelung* der individuellen Teilnehmerverbindungen statt mit dem Ziel, die Gesamtleistung in einem Frequenzkanal und damit die *störende MAI*, welche den Zellradius begrenzt (cell breathing), *möglichst tief* zu halten. Normalerweise stellt also die Sendeleistung nur einen geringen Anteil der *maximal vorgesehenen Leistung* bei hohem Verkehrsaufkommen dar, wo keine zusätzlichen Verbindungen mehr angenommen werden können (Bild 3.2). Die über längere Zeit *gemittelte Leistung* im Frequenzkanal ist deshalb bei UMTS ausgesprochen *gering*. Diese an sich gute Eigenschaft im Hinblick auf die Strahlungsbelastung kommt aber der Netzdimensionierung nicht zugute, weil die NISV *Grenzen für die Maximalleistung* setzt. Im uniformen Zellularnetzmodell gemäss Abschnitt 4.2.1 bedeutet also P_1 die Sendeleistung, bei der die erwähnte *Sättigung* auftritt. Die minimale Feldstärke E_{\min} ergibt sich dann aus dem *minimalen Störabstand* bezüglich MAI, und der Zellradius kann nach (4.10) berechnet werden.

4.3.1 Netzdaten für verschiedene Sharing Modes

Im Folgenden gelte die Annahme, dass n Netzbetreiber ihre UMTS-RANs bzw. ihr gemeinsames UMTS-RAN «auf der grünen Wiese» installieren, d.h. bereits vorhandene Funkdienste sollen nicht berücksichtigt werden. Der Einfachheit halber seien ferner Besonderheiten hinsichtlich Topographie und Verkehrsaufkommen vernachlässigt.

4.3.1.1 Zellen mit einem Frequenzkanal

Zunächst werde nur ein *einzig* Frequenzkanal pro Zelle vorausgesetzt, wobei jeder der n Betreiber auf einer anderen Frequenz basiere. Für das Referenznetz 1 ergeben sich die Daten für das Einzelnetz, das mit dem Gesamtnetz im Versorgungsgebiet A identisch ist, gemäss den Beziehungen im Abschnitt 4.2.1; sie sind

Versorgungsfläche A; $\left. \begin{array}{l} \text{Sendeleistung } P_1 \\ \text{Zellradius } r_1 \end{array} \right\} \text{Grenze bezüglich } E_{\min} \text{ und } E_g \text{ (Referenznetz } n=1)$

Sharing Mode	No sharing (versch. Antennenstao.)					CSN	MRAN. Site Sharing (gleiche Antennenstao.)					
	1	2	3	4	Ö		1	2	3	4	Ö	n
Anz. Operatoren												
Daten Einzelnetze												
Zelleistung P_n	P_1	P_1	P_1	P_1		P_1	$P_1/2$	$P_1/3$	$P_1/4$		P_1/n	
Zellradius r_n	r_1	r_1	r_1	r_1		r_1	$r_1/\sqrt[4]{2}$	$r_1/\sqrt[4]{3}$	$r_1/\sqrt{2}$		$r_1/\sqrt[4]{n}$	
Zellenzahl N_n	N_1	N_1	N_1	N_1		N_1	$\sqrt{2}N_1$	$\sqrt{3}N_1$	$2N_1$		$\sqrt{n}N_1$	
Krit. Fläche A_{g_n}	A_{g1}	A_{g1}	A_{g1}	A_{g1}		A_{g1}	$\frac{A_{g1}}{\sqrt{2}}$	$\frac{A_{g1}}{\sqrt{3}}$	$\frac{A_{g1}}{2}$		$\frac{A_{g1}}{\sqrt{n}}$	
Gesamtnetz in A												
Leistung P_{An}	N_1P_1	$2N_1P_1$	$3N_1P_1$	$4N_1P_1$		N_1P_1	$\sqrt{2}N_1P_1$	$\sqrt{3}N_1P_1$	$2N_1P_1$		$\sqrt{n}N_1P_1$	
Zellenzahl N_{An}	N_1	$2N_1$	$3N_1$	$4N_1$		N_1	$2\sqrt{2}N_1$	$3\sqrt{3}N_1$	$8N_1$		$n\sqrt{n}N_1$	
Zahl Ant.stao N_{Yn}	N_1	$2N_1$	$3N_1$	$4N_1$		N_1	$\sqrt{2}N_1$	$\sqrt{3}N_1$	$2N_1$		$\sqrt{n}N_1$	
Krit. Fläche $A_{g_{ntot}}$	A_{g1}	$2A_{g1}$	$3A_{g1}$	$4A_{g1}$		A_{g1}	$\sqrt{2}A_{g1}$	$\sqrt{3}A_{g1}$	$2A_{g1}$		$\sqrt{n}A_{g1}$	

CSN Common Shared Network
MRAN Multioperator RAN

$$\sum_n P_n = P_1$$

Tabelle 4.1: UMTS-Mobilfunkversorgung mit Einzel-RAN oder Shared RAN

in der Tabelle 4.1 in den Kolonnen $n = 1$ festgehalten. Es sei hier nochmals erwähnt, dass P_1 diejenige BTS-Grenzleistung darstellt, bei der die *Auflagen der NISV* im gesamten Versorgungsgebiet A gerade erfüllt sind. Wenn *kein Sharing* erfolgt, so können sich weitere Netzbetreiber mit ihren BTS möglichst gleichmässig im Gebiet A verteilen; da hier grössere Zellen betrachtet werden und die kritischen Flächen in der Nähe der BTS klein sind, darf für kleine Zahlen n mit einer Einhaltung der NISV gerechnet werden. Damit wachsen die Gesamtleistung, Zellenzahl und kritische Fläche proportional zu n (Bild 4.3).

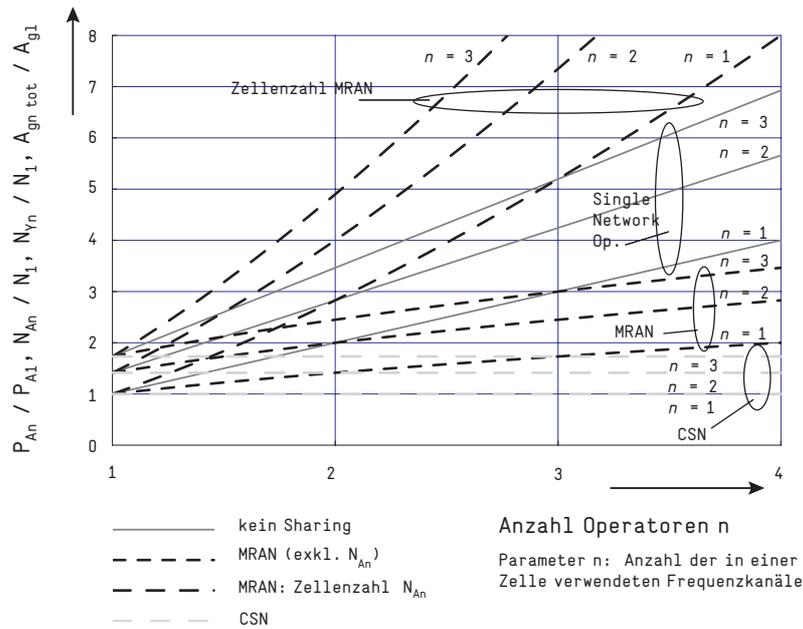


Bild 4.3: Relative Sendeleistung, Zellenzahl, Antennenstandorte und kritische Fläche im Versorgungsgebiet

Für den Fall von *Sharing* entspricht CSN dem Wert $n = 1$ (1 Operator). Dabei ist allerdings die Basierung aller Netzbetreiber nur auf einem einzigen Frequenzkanal unrealistisch. Die Situation mit mehreren Kanälen wird später diskutiert.

Der Fall MRAN ist u.a. dadurch gekennzeichnet, dass alle Operatoren auf dem eigenen Frequenzkanal basieren, aber einen *gemeinsamen Antennenstandort* benutzen. Da nun n Frequenzen ausgesendet werden, muss wegen der Einhaltung der NISV eine *Reduktion der Sendeleistung* pro Kanal erfolgen. Gemäss (4.4) erhält man die Beziehung

$$\sum_n P_n = P_1 \quad \text{bzw.} \quad P_n = P_1 / n. \quad (4.22)$$

Es ergeben sich folgende Beziehungen:

Einzelnetz:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Zelleistung} & P_n = P_1 / n \\
 \text{Zellradius} & r_n = r_1 / \sqrt[4]{n} \\
 \text{Zellenzahl} & N_n = N_1 \cdot \sqrt{n} \\
 \text{Krit. Fläche} & A_{gn} = A_{g1} / \sqrt{n}
 \end{array} \quad (4.23)$$

Gesamtnetz in A:

$$\begin{aligned}
 \text{Leistung} & P_{An} = N_1 P_1 \sqrt{n} \\
 \text{Zellenzahl} & N_{An} = N_1 n \sqrt{n} \\
 \text{Zahl Ant.stao.} & N_{Yn} = N_1 \cdot \sqrt{n} \\
 \text{Krit. Fläche} & A_{gntot} = A_{g1} \cdot \sqrt{n}
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

Man beachte, dass hier die Zahl N_{An} der Zellen und die Zahl N_{Yn} der Antennenstandorte nicht identisch sind, da dort jeweils n Zellen übereinanderliegen.

Die entsprechenden Werte für $n = 1$ bis 4 sind in Tabelle 4.I festgehalten; der Verlauf der Grössen gemäss (4.24) ist in Bild 4.3 dargestellt.

Unabhängig von der Anzahl n Netzbetreiber kommt CSN mit der geringsten Zellenzahl bzw. Zahl der Antennenstandorte N_1 und Gesamtleistung $N_1 P_1$ in A aus. Dies gilt auch für die kritische Fläche A_{g1} .

Im Falle des MRAN nehmen die *Gesamtleistung*, die Zahl der *Antennenstandorte* sowie die *kritische Fläche* zu, aber nur proportional der Wurzel aus n , was natürlich günstiger ist als der lineare Anstieg bei separatem Netzbetrieb. Als nachteilig erweist sich hingegen das *überproportionale* Wachstum der Zellenzahl mit $n \cdot \sqrt{n}$, das eine massive Vergrösserung der *Systemkomplexität* zur Folge hat.

4.3.1.2 Zellen mit mehreren Frequenzkanälen

Nun werden die Betrachtungen für den Fall erweitert, dass jeder Operator auf derselben Antenne *mehrere Frequenzkanäle* betreibt. Es gelte die vereinfachende Annahme, dass alle dieselbe Anzahl ν Frequenzkanäle betreiben. Wie man sich leicht überlegen kann, ergeben sich die Beziehungen für das Einzelnetz aus (4.23), indem man den Parameter n durch ν ersetzt. Für *separat betriebene* Netze resultiert folgender Zusammenhang:

Gesamtnetz in A:

$$\begin{aligned}
 \text{Leistung} & P_{An} = N_1 P_1 n \sqrt{\nu} \\
 \text{Zellenzahl} & N_{An} = N_1 n \sqrt{\nu} \\
 \text{Zahl Ant.stao.} & N_{Yn} = N_1 \cdot n \sqrt{\nu} \\
 \text{Krit. Fläche} & A_{gn \text{ tot}} = A_{g1} \cdot n \cdot \sqrt{\nu}
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

Man erkennt, dass ohne Sharing neben der Proportionalität zur Zahl der Netzbetreiber ein Faktor $\sqrt{\nu}$ dazukommt.

Wegen der Einhaltung der NISV gilt bei n Operatoren, die ν Frequenzkanäle am gleichen Standort betreiben, die Bedingung

$$\sum_n \sum_\nu P_{n\nu} = 1 \quad \text{bzw.} \quad P_{n\nu} = P_1 / n \nu. \tag{4.26}$$

Damit folgt für ein MRAN der Formelsatz (4.24), wobei offensichtlich n durch ν zu ersetzen ist. Man findet für das

Gesamtnetz in A :

$$\begin{array}{ll}
 \text{Leistung} & P_{An} = N_1 P_1 \sqrt{n\nu} \\
 \text{Zellenzahl} & N_{An} = N_1 n \sqrt{n\nu} \\
 \text{Zahl Ant.stao.} & N_{Yn} = N_1 \cdot \sqrt{n\nu} \\
 \text{Krit. Fläche} & A_{gn \text{ tot}} = A_{g1} \cdot \sqrt{n\nu}
 \end{array} \tag{4.27}$$

Im Vergleich zum MRAN gemäss (4.24) bringt der Einsatz von ν verschiedenen Frequenzkanälen pro Zelle eine Vergrößerung der Werte $P_{An\nu}$, $N_{An\nu}$, $N_{Yn\nu}$ und $A_{gn\nu \text{ tot}}$ um den Faktor $\sqrt{\nu}$.

Die Beziehungen für CSN folgen aus (4.27) für $n = 1$. Tabelle 4.1 und Bild 4.3 repräsentieren die Fälle CSN und MRAN, wenn $\sqrt{\nu}$ durch $\sqrt{n\nu}$ ersetzt wird.

Abschliessend sei noch festgehalten, dass die hier vorgestellten Überlegungen nicht nur für MRAN, sondern auch für Site Sharing Gültigkeit haben, denn die entscheidende Einflussgrösse ist der gemeinsame Antennenstandort.

4.3.2 Kompatibilität mit anderen Funkdiensten

Die NISV verlangt die Einhaltung der Grenzwerte für die Summe der einfallenden Strahlungsleistungsdichte. Für UMTS steht dabei der Einbezug von GSM-Immissionen im Vordergrund, da ja auch gemeinsame Anlagen mit UMTS- und GSM-Sendeantennen geplant sind. Es ist klar, dass die Überlagerung eines UMTS-Netzes mit einem GSM-Netz die maximale Zelleistung des ersteren reduziert. In der Praxis treten die nicht tolerierbaren Überschreitungen der NISV-Grenzwerte lokal auf. Allgemeine Aussagen können daher nur unter sehr vereinfachenden Annahmen gemacht werden.

Im Folgenden gelte der Ansatz, dass im Versorgungsgebiet A , wo das UMTS-Referenznetz (Netz 1) mit der Zelleistung P_1 installiert werden soll, bereits ein GSM-Netz mit derselben Zellengrösse und der Zelleistung P_0 vorhanden sei, wobei die Antennenstandorte mit denjenigen des UMTS-Netzes näherungsweise zusammenfallen. Letztere Annahme ist nicht unrealistisch, weil sowieso ein grosser Teil der UMTS-Antennen auf GSM-Antennenmasten untergebracht werden und die Standorte von GSM-Antennen geographisch günstige Orte sind. Unter diesen Voraussetzungen ist für die Zelleistung des UMTS-Referenznetzes nur noch eine reduzierte Sendeleistung erlaubt:

$$\begin{aligned}
 P'_1 &= P_1 - P_0 = q \cdot P_1, \\
 q &= 1 - P_0 / P_1, \quad q < 1.
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

Der Ersatz von P_1 durch $q \cdot P_1$ in (4.23) bis (4.27) ist gleichbedeutend mit dem Ersatz von \sqrt{n} durch $\sqrt{n/q}$ in (4.23) und (4.24) bzw. von $\sqrt{\nu}$ durch $\sqrt{\nu/q}$ in (4.25), (4.26) und (4.27).

Für 3 Operatoren mit je zwei Frequenzkanälen pro Zelle bei Annahme einer durch fremde Funkdienste erzwungenen Leistungsbegrenzung, die einem Reduktionsfaktor von $q = 1/6$ entspricht, findet sich ein Vergleich der Netzdaten in Tabelle 4.II.

Merkmale / Parameter	Ohne Sharing	MRAN	CSN
Anzahl Operatoren n	3	3	3 → 1
Anzahl Freq./Op. v	2	2	2
Reduktionsfaktor q	1/6	1/6	1/6
Sendeleistung P_{An}	$N_1 P_1 \Sigma 10.4$	$N_1 P_1 \Sigma 6$	$N_1 P_1 \Sigma 3.46$
Zellezahl N_{An}	$N_1 \Sigma 10.4$	$N_1 \Sigma 18$	$N_1 \Sigma 3.46$
Antennenstao. N_{Yn}	$N_1 \Sigma 10.4$	$N_1 \Sigma 6$	$N_1 \Sigma 3.46$
Krit. Fläche A_{g1}	$A_{g1} \Sigma 10.4$	$A_{g1} \Sigma 6$	$A_{g1} \Sigma 3.46$

Tabelle 4.II: Vergleich der Netzdaten im Versorgungsgebiet A für unterschiedliche Sharing Modes für drei Operatoren

Man erkennt, dass ein CSN in jeder Hinsicht am besten abschneidet. Zudem werden 4 Frequenzkanäle eingespart. Würde man alle 6 Frequenzkanäle pro Zelle einsetzen, würde der Faktor von 3.46 auf 6 ansteigen und damit dem Faktor 6 des MRAN entsprechen, wenn man von der dreifach höheren Zellenzahl absieht. Das CSN hätte aber mit 6 Frequenzkanälen eine erheblich höhere Kapazität. Nachteilig wirkt sich beim MRAN die grosse Zellenzahl aus (Systemaufwand). Am schlechtesten schneidet der separate Netzbetrieb ab.

5 Schlussfolgerungen

5.1 Vergleich CSN und MRAN mit Einzelnetzbetrieb

Auf Grund der vorangehenden Ausführungen sollen nun Schlussfolgerungen bezüglich der Zweckmässigkeit des Betriebs von Shared Networks gezogen werden. Die Basis hierzu bildet ein Vergleich verschiedener Aspekte der Übertragungstechnik, der Strahlungsbelastung sowie nichttechnischer Gegebenheiten zwischen CSN und MRAN einerseits und dem Einzelnetzbetrieb andererseits. Dabei werden die Bereiche Ökonomie und Recht in separaten Studien abgehandelt [1], [2].

Bei UMTS handelt es sich um ein äusserst komplexes Breitband-Übertragungssystem, das zufolge der raschen Leistungsregelung bei den individuellen Verbindungen nur einer statistischen Erfassung zugänglich ist. Vergleiche müssen demzufolge unter stark vereinfachenden Annahmen durchgeführt werden und haben damit wohl Aussagekraft in Bezug auf die allgemeine Tendenz, nicht aber für aktuelle Einzelsituationen. Die im Folgenden vorgenommene Wertung hat deshalb nur einen beschränkt quantitativen Charakter und bedarf in vielen Fällen einer zusätzlichen Erläuterung. Es werden fünf Stufen eingeführt, die sich auf den Einzelnetzbetrieb beziehen:

++	grosse Verbesserung
+	Verbesserung
0	entspricht Einzelnetzbetrieb
-	Verschlechterung
--	erhebliche Verschlechterung

5.1.1 Technische Aspekte

In Tabelle 5.I sind die wesentlichen anzusprechenden Punkte aufgelistet.

Technischer Aspekt	CSN	MRAN
Frequenzpooling		
– Leistungseffizienz im Frequenzkanal	++	+
– Bündelgewinn	+	0
Kapazitätsvergrößerung dank kleinerer Zellen	0	+
Minimierung ACIR	+	+
Aufwand		
– HW:		
– geringere Zellenzahl	++	ñ
– Single carrier BTS	0	ñ
– SW: Komplexität	ñ	ñ
Wahlfreiheit Netzparameter	ñ ñ	ñ

Tabelle 5.I: Technische Aspekte des Sharing im Vergleich zum Einzelnetzbetrieb

Vielversprechend ist dabei das Verbesserungspotenzial, das bei CSN durch *Frequenzpooling* resultiert. Allerdings lässt sich bei nicht allzu grossem Verkehrsaufkommen nur schon *mit zwei Frequenzkanälen* eine erhebliche Steigerung der Leistungseffizienz und ein Bündelgewinn erzielen (Bild 3.4, Bild 3.5), d.h. der Einzelnetzbetrieb mit zwei oder drei Frequenzkanälen kann davon auch schon profitieren.

Unter den getroffenen Annahmen (NISV) bedeutet Sharing bei MRAN (Site Sharing) eine *Verkleinerung der Zellen* (Abschnitt 4.3.1). Damit ist sozusagen als Nebeneffekt einerseits eine *Kapazitätserhöhung* verbunden, andererseits vergrössert sich die Systemkomplexität durch die Zunahme der Zellenzahl.

Ebenso steigt die *Komplexität* des Managements bzw. der entsprechenden Software - auch bei CSN - in beträchtlichem Masse an. Der beim Einzelnetzbetrieb mögliche Einsatz kostengünstiger «Single Carrier BTS» kommt beim MRAN nicht in Frage.

5.1.2 Strahlungsrelevante Aspekte

Die Betrachtungen gehen davon aus, dass die NISV einzuhalten ist. Wie schon in Abschnitt 4.3 einleitend erwähnt wird, setzt letztere *Grenzen für Maximalleistungen* fest und «honoriert» demzufolge eine Absenkung der mittleren Leistung nicht, obwohl auch damit zweifellos eine Verbesserung des Schutzes vor Bioeffekten verbunden wäre.

Die wesentlichen Aspekte sind in Tabelle 5.II festgehalten.

Technischer Aspekt	CSN	MRAN
Kritische Fläche $E > E_g$ relativ zum Versorgungsgebiet	++	+
Anzahl Antennenstandorte	++	+
Gesamtleistung im Versorgungsgebiet		
– Mittlere Leistung (nicht NISV-relevant)	++	+
– Maximalisierung	++	+
Strahlungsbelastung in Gebieten mit hohem Verkehrsaufkommen	0	0

Tabelle 5.II: Strahlung bei Sharing im Vergleich zum Einzelnetzbetrieb (Voraussetzung: Einhaltung NISV)

Mit kleiner werdenden Zellen verringert sich die *kritische Fläche*, in der die Feldstärke den vorgegebenen Grenzwert übersteigen könnte, wohl aber wächst die Zellenzahl. Insgesamt schneiden jedoch vor allem CSN und auch MRAN im Vergleich zum Einzelnetzbetrieb viel besser ab, wo die kritische Fläche proportional der Anzahl Operatoren zunimmt (Bild 4.3).

Die Anzahl der Antennenstandorte nimmt beim MRAN natürlich nur dann zu, falls schon die *Referenzsendeleistung* P_1 den NISV-Grenzwert erreicht, was hier vorausgesetzt wird und bei den extrem tiefen Grenzwerten der NISV realistisch ist. Würde die Sendeleistung P_1 weit unter dem Grenzwert liegen, ergäbe sich keine Vergrößerung der Zahl der Antennenstandorte, wohl aber würde die Sendeleistung proportional zur Anzahl Netzbetreiber ansteigen, was ebenfalls unerwünscht wäre.

Bei CSN und MRAN *verringert sich die mittlere Gesamtleistung* im Versorgungsgebiet A gegenüber dem Einzelnetzbetrieb massiv (Kap. 3). Diese Tatsache ist aber im Hinblick auf die NISV nicht relevant. Hingegen geht aus Tabelle 4.II klar hervor, dass auch die maximale Gesamtleistung bei MRAN und vor allem bei CSN wesentlich geringer ist.

Man darf sich aber auf Grund der vorangehenden Aussagen nicht der Illusion hingeben, dass mit CSN oder MRAN nun eine entscheidende Verbesserung der Strahlungsbelastung für die Bevölkerung verbunden sei. Massgeblich sind ja die *Zonen mit grossem Verkehrsaufkommen*, wo auch die Population am dichtesten ist. In diesem Bereich wird die Limite durch die NISV gesetzt, und man wird sich ihr kurz- oder längerfristig annähern, und zwar unabhängig davon, ob Sharing-Prinzipien eingesetzt werden oder nicht.

5.1.3 Nichttechnische Aspekte

In Tabelle 5.III sind einige weitere Punkte bewertet worden.

Nichttechnische Aspekte	CSN	MRAN
Nachträglicher Übergang auf Einzelnetzbetrieb	ñ	+
Koordination mit GSM-Netzbetreibern	+	+
Erfüllung Forderung der Antennenzusammenlegung	+	+

Tabelle 5.III: Nichttechnische Aspekte im Vergleich zum Einzelnetzbetrieb (exklusive Ökonomie und Recht)

Die Hersteller von Ausrüstungen weisen darauf hin, dass sowohl CSN als auch MRAN den späteren *Ausstieg in den Einzelnetzbetrieb*, der dann wieder den vollen Wettbewerb ermöglicht, gestattet. Bei CSN ist dies aber wenig wahrscheinlich, weil den Operatoren das Know-how der Dimensionierung und des Betriebs eines RAN fehlt. Dies gilt hingegen nicht für das MRAN, wo jeder Netzbetreiber mit seinen zugewiesenen Frequenzkanälen arbeitet und nur gewisse Funktionen, vor allem beim RNC, koordiniert werden müssen.

Es ist klar, dass die eher psychologisch zu erklärende Forderung nach *Antennenzusammenlegung* bei CSN und MRAN erfüllt ist, obwohl hinsichtlich der wirklichen *Strahlungsbelastung kaum* eine wesentliche *Verbesserung* erfolgt, weil man vor allem in Gebieten mit hohem Verkehrsaufkommen an die Grenze der NISV geht. Kleinere Zellen benötigen eine geringere Sendeleistung, aber es sind mehr Antennenstandorte notwendig.

5.2 Diskussion

5.2.1 Ergebnisse

Die Untersuchungen in Kapitel 3 zeigen, dass *Frequenzpooling* zu attraktiven *Leistungs- und Bündelgewinnen* Anlass gibt. Diese rationelle Ressourcenausnutzung ist vor allem bei CSN möglich, für MRAN lässt sich *nur die Leistungseffizienz* durch koordinierte RNC-Funktionen und Site Sharing etwas verbessern. In beiden Fällen kann aber das *störende Übersprechen* (ACIR) zwischen benachbarten Zellen minimiert werden.

Unter Berücksichtigung der *massiven Sendeleistungsbegrenzung* durch die NISV, auch im Hinblick auf die *Überlagerung fremder Funkdienste* wie z.B. GSM sowie durch die nicht minder einschränkenden *Messempfehlungen*, die zur Zeit vom BUWAL ausgearbeitet werden, lassen sich die oben erwähnten Vorteile nicht ohne *erhebliche Nachteile* realisieren. Wie aus Kapitel 5 hervorgeht, bedingt die erwähnte Leistungsbegrenzung den Übergang auf *kleinere Zellen* bzw. auf eine *grössere Zellenzahl*, der mit einem erhöhten Systemaufwand verbunden ist und entsprechend *mehr Antennenstandorte* erfordert. Das verwen-

dete Modell basiert auf stark vereinfachenden Annahmen, liefert aber in der Tendenz richtige Aussagen. Die Verkleinerung der Zellen ergibt im Nebeneffekt eine Erhöhung der Netzkapazität, die aber auch beim Einzelnetzbetrieb gezielt angewendet werden kann.

In Gebieten mit *hohem Verkehrsaufkommen* geht der Trend Richtung *sehr kleiner Zellen* (Picozellen), die *möglichst überall verteilt* sind und BTS-Sendeleistungen weit unterhalb der in der NISV festgelegten Grenze von 6 W ERP aufweisen, wie dies bereits in Abschnitt 4.2.2 dargelegt wurde. Es ist davon auszugehen, dass hier die Netzbetreiber auch eine *singuläre Versorgung* für sog. «Hot Spots» anbieten, d.h. ein bestimmtes Kaufhaus oder ein Bürozentrum wird nur von einem «Hof-Operator» bedient, was natürlich nicht heisst, dass via übergeordnete Zellen nicht auch auf andere Netzbetreiber zugegriffen werden kann. Das Problem der *Flächendeckung* tritt jedoch bei Picozellulernetzen in den *Hintergrund*. Zuzufolge der geringen Sendeleistung (20 - 100 mW) kann auch eine «chaotische» Entwicklung unter mehreren Operatoren toleriert werden. Zu berücksichtigen ist ferner die moderne Entwicklung zu leistungsfähigen, drahtlosen lokalen *Zugriffsnetzen* wie z.B. WLAN (wireless local area network) oder WLL (wireless local loop), oder ganz allgemein zu Mobilfunksystemen der *4. Generation*. Letztere werden in das Umfeld der Picozellulernetze hineinwachsen und müssen *optimal integriert* werden können. Die Anwendung von *Network Sharing* wäre unter diesen Gesichtspunkten *nicht angemessen* und vermutlich gar nicht praktikabel.

Bezüglich *Strahlung* bringen CSN und MRAN unabhängig von der Zahl der Operatoren eine *konstante* bzw. *unterproportional anwachsende* kritische Fläche, auf der eine Überschreitung der Feldstärke bezüglich des NISV-Grenzwertes erwartet werden muss, während beim Einzelnetzbetrieb mit grösseren Zellen eine *proportionale Ausdehnung* erfolgt (Bild 4.3). Sie stellt jedoch kein massgebliches Kriterium dar, da sie ja ausserhalb des durch die Bevölkerung zugänglichen Bereichs liegt. Immerhin resultieren Anhaltspunkte über die Grösse des Bereiches, wo die Feldstärke eben doch relativ gross ist. Erfreulicherweise *senkt* Network Sharing die *mittlere Gesamtsendeleistung* im betrachteten Versorgungsgebiet (Kap. 3 und Bild 4.3). Da sich aber die NISV nur auf Maximalleistungen bezieht, kommt diesem Umstand keine Bedeutung zu. Damit stellt sich die Frage, ob die NISV für UMTS *zweckmässige Grenzen* setzt. Eine sorgfältige Abklärung dieser Frage drängt sich auf.

5.2.2 Vorschlag für eine hybride Lösung

Grundsätzlich wird ein *UMTS-Netz auf zwei Ebenen* realisiert werden. In einer *oberen Ebene* erfolgt die lückenlose Versorgung eines Gebietes mit einem Netz von *grösseren Zellen* (Rural-, Macro- und evtl. Microzellen). In Teilgebieten mit hohem Verkehrsaufkommen erfolgt in einer *unteren Ebene* die Verdichtung durch zusätzliche Picozellencluster, wie dies im vorangehenden Abschnitt beschrieben wurde.

Für das *grosszellige Netz* würde sich nun *Network Sharing* (CSN oder MRAN) anbieten, insbesondere dann, wenn man die BTS an Orte platzieren kann, wo Sendeleistungen von fremden Funkdiensten keine Reduktion der NISV-Grenzwerte bewirken. Die Gebiete mit hohem Verkehrsaufkommen, wo zudem schon eine starke Belastung durch fremde Funkdienste zu erwarten ist, würde man dann aber mit *Einzelnetzen* bzw. *Picozellencluster* abdecken, wobei die Picozelle zweckmässigerweise nicht auf Grund eines einzuhaltenden maximalen Durchmessers, sondern durch die Festlegung einer *oberen Grenze der Sendeleistung* zu definieren wäre. Damit ergäbe sich eine flexible Handhabung im urbanen Umfeld. Als *Grenzleistung* sei hier ein

Wert von 100 mW ERP vorgeschlagen. Die heute kommerziell angebotenen Ausrüstungen für CSN und MRAN erlauben den parallelen Betrieb von Einzelnetzen. Mit dieser Lösung könnte man also z.B. die *Vorteile des Leistungs- und Bündelgewinns mit den Vorteilen sehr dichter Kleinzellennetze* in Gebieten mit hohem Verkehrsaufkommen *kombinieren*. Da die Antennen von grösseren Zellen meist gut sichtbar auf Masten und Dächern grösserer Gebäude montiert werden, käme man dort der Forderung nach, mittels Sharing Antennenstandorte *gemeinsam* zu nutzen. Bei Picozellen sind hingegen die Antennen *klein* und lassen sich *unauffällig* überall anbringen.

6 Zusammenfassung

6.1 Zielsetzung

Der Zusammenschluss mehrerer Netzbetreiber, um ein gemeinsames UMTS-Funknetz zu erstellen und zu betreiben, bietet ein grosses Potenzial von *Kosteneinsparungen* und *Zeitgewinn* beim Roll-out. Die Attraktivität einer solchen Lösung würde sich noch weiter verbessern, wenn man zeigen könnte, dass auch beim Betrieb *technische Vorteile* resultieren. In Frage kommen die Erzielung *effizienterer Übertragungsverhältnisse*, die mit einer Sendeleistungsreduktion einhergehen, eine *Verringerung der Anzahl Funkzellen* und der entsprechenden *Antennenstandorte* sowie gegebenenfalls eine *Reduktion der Umweltbelastung* durch elektromagnetische Strahlung.

Die vorliegende Studie verfolgt das Ziel, die erwähnten Themenkreise zu untersuchen sowie die Vor- und Nachteile eines *Netzzusammenschlusses*, der mit *unterschiedlicher Integrationstiefe* durchgeführt werden kann, *vergleichend* zu bewerten und *Empfehlungen* aus technischer Sicht auszuarbeiten.

6.2 Ergebnisse

Das sog. «Common Shared Network (CSN)» bildet die höchste Stufe der Funknetzintegration. Neben dem eigentlichen Funknetz (radio access network, RAN) mit Antennen, Basisstationen (BTS) und den Ansteuerungsmodulen (radio network controller, RNC) wird auch das sog. «Core Network (CN)», das vor allem Vermittlungs- und Signalformatanpassungsfunktionen enthält, gemeinsam betrieben.

Da CSN eine *gemeinsame Nutzung der Frequenzen* (Frequenzpooling) erlaubt, resultieren *übertragungstechnische Vorteile*. Simulationen zeigen, dass die *Effizienz* bezüglich erforderlicher Sendeleistung in den Frequenzkanälen erheblich *gesteigert* werden kann und dass zusätzlich die bei Mehrkanalsystemen zu erwartenden *Bündelgewinne* realisierbar sind. Auch bezüglich *Übersprechen* zwischen benachbarten Frequenzkanälen (adjacent channel interference power ratio, ACIR) gibt es Vorteile.

Die *Zellenzahl* und damit auch die Zahl der *Antennenstandorte* ist bei CSN *am geringsten* und vergrössert sich im Gegensatz zum separaten Netzbetrieb nur in Abhängigkeit der *pro Zelle* betriebenen *Frequenzkanäle*. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass die *sehr tiefen Grenzwerte* der NISV (Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung) im gesamten Versorgungsgebiet - auch unter Berücksichtigung *fremder Funkdienste* wie z.B. GSM - vielerorts schon erreicht sind. Bezüglich *Strahlungsbelastung* wirkt sich die bei CSN reduzierte *mittlere Sendeleistung* positiv aus. Massgeblich für die Einhaltung der NISV-Grenzwerte sind aber die *maximal möglichen Sendeleistungen*, die bei CSN ebenfalls ein *Minimum* erreichen. Grundsätzlich ergeben sich jedoch Probleme mit der Strahlungsbelastung vor allem in *Zonen mit grossem Verkehrsaufkommen*, wo auch die Population am dichtesten ist. Hier wird unabhängig vom Sharing-Prinzip die durch die NISV gesetzte *Limite* erreicht werden.

Das sog. «Multioperator RAN (MRAN)» bedeutet eine geringere Stufe der Netzwerkintegration. Hier wird nur das RAN gemeinsam betrieben, und die Operatoren basieren auf den ihnen durch die Lizenz *zugewiesenen Frequenzen*. Ein *Frequenzpooling* kommt damit *nicht* in Frage. Entsprechend entfallen die Bündelgewinne. Ebenso ist eine Steigerung der Leistungseffizienz in den Frequenzkanälen nur in geringem

Masse möglich und zu einem grossen Teil schon durch das «Site Sharing» bedingt, d.h. durch den gemeinsamen Aufbau und Betrieb der Antennenstandorte mit den BTS. Negativ fällt auch die *grosse Zellenzahl* und der damit verbundene *Aufwand* ins Gewicht, die mit der Anzahl Operatoren überproportional anwächst.

Bezüglich *Strahlungsbelastung* gelten für das MRAN (und Site Sharing) nahezu dieselben Aussagen wie bei CSN.

Die Realisierung von CSN und MRAN ist nicht an die Grösse der Zellen gebunden. Man könnte deshalb grundsätzlich auch *Picozellen-Cluster gemeinsam* betreiben. Im Hinblick auf die geringen Sendeleistungen, den Einsatz in «Hot Spots», die Erfüllung besonderer Kundenbedürfnisse und vor allem auf die Integration neuartiger *Hochleistungs-Zugriffsnetze* erweist sich Network Sharing als *wenig geeignete Betriebsform*.

Beim gemeinsamen Aufbau und Betrieb von UMTS-Funknetzen lassen sich *keine technischen Probleme* erkennen, deren Lösung zu besonderen Schwierigkeiten Anlass geben. Bezüglich Management gewisser Betriebsabläufe bei CSN und MRAN geht es noch um einige *Optimierungen*, aber die entsprechenden Anpreisungen der Hersteller von Netzausrüstungen zeigen, dass man die Technik im Griff hat.

6.3 Empfehlungen

Für die heute vorliegende Situation mit der geltenden NISV bietet sich eine *Hybridlösung* an, bestehend aus einem *landesweiten CSN* (evtl. auch MRAN) *mit grösseren Zellen* (Rural-, Macro- und Microzellen) und *separaten Picozellennetzen* in Gebieten mit hohem Verkehrsaufkommen. Für solche getrennten Netze wäre die *Sendeleistung einer Zelle* auf maximal 100 mW ERP zu begrenzen. Dies würde bezüglich Übertragungseffizienz und Strahlungsbelastung einschliesslich der Forderung nach weniger Antennenmasten sowie im Hinblick auf eine *flexible Abdeckung* von sog. «Hot spots» ein *Optimum* bieten, was auch den Erwartungen der Hersteller von Netzausrüstungen zu entsprechen scheint. Nähere Angaben zu dieser Hybridlösung finden sich in Abschnitt 5.2.2.

Es wäre aber wohl zu überlegen, ob die NISV nicht auf die speziellen Eigenschaften von UMTS *angepasst* werden sollte. Man müsste die über längere Zeit in den Frequenzkanälen *gemittelte Sendeleistung* auf die etwa heute geltenden Werte begrenzen und bezüglich *kurzfristiger Leistungsspitzen* *grosszügigere Grenzwerte* festlegen. Eine missbräuchliche Ausnützung der letzteren liesse sich mit geeigneten Massnahmen unterbinden.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Kruse, J., Ein gemeinsames Funknetz für UMTS in der Schweiz. Gutachten z.Hd. Avenir Suisse, 12. Nov. 2001

- [2] Rhinow, R., Rechtsgutachten zur Frage: Ist es auf Basis der erteilten UMTS-Konzessionen möglich, dass der Netzaufbau von mehreren bzw. allen UMTS-Konzessionsnehmerinnen erbracht wird?. Gutachten z.Hd. Avenir Suisse, Januar 2002

- [3] Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV). Erlass des Bundesrates, Bern, 23. Dezember 1999

- [4] «Faktenblatt» UMTS. Version 1.6, BAKOM, Biel, 14. Dezember 2000

- [5] «Minimum spectrum demand per public terrestrial UMTS operator in the initial phase». Report # 5, UMTS-Forum, 8. September 1998.

- [6] Garg, V.K., Wireless Network Evolution: 2G to 3G. Prentice Hall PTR, 2002.

- [7] Castro, J.P., The UMTS Network and Radio Access Technology. John Wiley, 2001.

- [8] Geng, N., Wiesbeck, W., Planungsmethoden für die Mobilkommunikation. Springer-Verlag, Berlin 1998

- [9] COST 231 Final Report: Digital Mobile Radio Toward Future Generations Systems. EU Commission, Brussels 1999, ISBN 92-828-5416-7