



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

ENERGIEVERBRAUCH DER MOBILEN KOMMUNIKATION

Schlussbericht

AUSGEARBEITET DURCH

A. CORLIANO, FACHHOCHSCHULE NORDWESTSCHWEIZ

GRÜNDENSTRASSE 40, 4132 MUTTENZ, WWW.FHNW.CH

PROF. DR. M. HUFSCHMID, FACHHOCHSCHULE NORDWESTSCHWEIZ

GRÜNDENSTRASSE 40, 4132 MUTTENZ, WWW.FHNW.CH

An dieser Stelle möchten wir all jenen danken, die zum Gelingen dieses Projekts beigetragen haben. Namentlich möchten wir die Firma Sunrise erwähnen, deren Mitarbeiter mit ihrem Know-how und ihrer tatkräftigen Unterstützung dieses Projekt überhaupt erst ermöglicht haben. Gleichermassen profitierte das Projekt von der Mitarbeit von Dr. Bernard Aebischer vom Centre for Energy Policy&Economics (CEPE) und von Dr. Gregor Dürrenberger von der Forschungsstiftung Mobilkommunikation (FSM).

Impressum

Datum: 28. Februar 2008

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Elektrizität

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Bereichsleiter, thilo.krause@bfe.admin.ch

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 152491 / 102013

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch / www.electricity-research.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Forschungsarbeit befasst sich mit dem Thema Energieverbrauch der mobilen Kommunikation. Neben den - für den Menschen eher störenden - Antennen bzw. Antennenmasten besteht ein Mobilfunknetz aus Netzelementen die mit elektrischer Energie versorgt werden. Aufgrund des stetigen Ausbau dieses Netzes, steigt auch hier der Energiebedarf von Jahr zu Jahr.

Ein wesentlicher Teil dieser Arbeit befasst sich mit der Analyse des Energiebedarfs der Infrastruktur eines Mobilfunknetzes. Weiter werden mögliche zukünftige Szenarien des Mobilfunks hinterleuchtet und ihre energetischen Auswirkungen beurteilt. Abschliessend werden in diesem Bericht Optimierungsmöglichkeiten im Mobilfunknetz und Handlungsalternativen für Mobilfunkbetreiber beschrieben.

Ein Resultat dieser Arbeit ist eine Untersuchung der Korrelation zwischen dem Leistungsbedarf und der Netzauslastung von GSM und UMTS Basisstationen. Ausserdem wurden durch konkrete Messungen, Daten zum Energieverbrauch der Mobilfunknetzelemente erhoben. Weiter ist der Energieverbrauch der eingesetzten Klimaanlage festgehalten. Zu den erwähnten Punkten werden in diesem Bericht Optimierungsvorschläge und Handlungsalternativen für Mobilfunkbetreiber formuliert. Abschliessend werden vor allem die möglichen zukünftigen Szenarien UMTS900, Einsatz von Femtozellen und Open-Wireless theoretisch, bezüglich der energetischen Auswirkungen, untersucht und beurteilt.

Dieses Dokument soll einerseits als Grundlage für weitere Arbeiten auf diesem Gebiet dienen, und andererseits soll es Mobilfunkbetreibern helfen durch eine effizientere Nutzung der Energie Kosten zu sparen.

ABSTRACT

This research project is concerned with the energy consumption of the infrastructure necessary to provide mobile communication services. In addition to antennas and aerial masts, the infrastructure for mobile communication consists of a number of different network elements which are consuming electric power. The demand for mobile services is constantly increasing which in turn requires an expansion of the networks and leads to a growing energy demand.

The measurement and analysis of the energy consumption of the infrastructure was an essential part of this research project. Furthermore, future scenarios and their impact on the energy consumption were discussed. Finally, action alternatives and recommendations for improvements of the energy consumption were formulated.

A result of this research is the analysis of the correlation between power requirement and data traffic of GSM and UMTS base stations. Furthermore, measurements were conducted to determine the power consumption of different network elements. As a further example the energy consumption of an air conditioning system was measured and the results are stated in this report. Concerning the above points, action alternatives and recommendations for improvements were formulated. Concluding, future scenarios, such as UMTS900, femtocells, and Open-Wireless were investigated and their corresponding energy consumption was estimated.

On the one hand this document may serve as a basis for future research projects and on the other hand it is intended to be an aid for providers of mobile services to save energy and hence reduce costs.

This report is written in German.

INHALTSVERZEICHNIS

1. AUSGANGSLAGE	10
2. ZIEL DER ARBEIT	13
2.1. Analyse des Energieverbrauchs.....	13
2.2. Möglichkeiten der Optimierung.....	13
2.3. Formulierung von Handlungsalternativen.....	14
3. ANALYSE DER MOBILFUNKNETZARCHITEKTUR	15
3.1. Die funktionale GSM-Netzarchitektur	15
3.2. Das Geran/BSS in der Praxis	18
3.3. Die UMTS-Netzarchitektur Release 99	19
3.4. Das UTRAN in der Praxis.....	20
3.5. Die UMTS-Netzarchitektur Release 4	20
4. MESSVORSCHRIFT	23
4.1. Ziel der Messungen	23
4.2. Messprinzip.....	24
5. ERGEBNISSE	28
5.1. Erste Messperiode BTS und RBS	28
5.2. Zweite Messperiode BTS und RBS.....	39
5.3. Bestimmung des Leistungsbedarfes weiterer Netzelemente	44
5.4. Leistungsbedarf einer Indoor-Klimaanlage.....	48
6. ENERGIEVERBRAUCH INFRASTRUKTUR.....	54
7. MÖGLICHE ZUKÜNFTIGE SZENARIEN UND DEREN ENERGETISCHE AUSWIRKUNGEN.....	56
7.1. UMTS900.....	56
7.2. 3G Funkzellen für Indoor Basisstationen (Femto-Zellen).....	57
7.3. Open Wireless, Public WLAN, Free Wi-Fi.....	58
7.4. NGN – Next Generation Network/IMS – IP Multimedia Subsystem.....	62
8. SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	65
8.1. Messungen der Basisstationen	65

8.2. Messungen an weiteren Netzelementen	66
8.3. Klimatisierung	67
8.4. Zukunftsszenarien	67
9. OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEITEN UND HANDLUNGSAALTERNATIVEN	69
9.1. Minimieren des Ruheleistungsbedarfs	69
9.2. Wahl der Zellengrösse	69
9.3. Klimatisierung	70
9.4. Site-Sharing	71
9.5. Wahl der Technologie	72
9.6. Vermehrte Verwendung von Mikrozellen	72
9.7. Gemeinsames UMTS-Netz	73
9.8. Anpassung der NISV	74
10. AUSBLICK UND OFFENE FRAGEN	76
ANHANG A: GRUNDBEGRIFFE DER DRAHTLOSEN KOMMUNIKATION	77
ANHANG B: ABDECKUNGSGRAD VON AD-HOC NETZEN	82

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Elektrischer Energieverbrauch nach Kundenkategorien.....	10
Abbildung 2: Aufteilung der Mobilfunkverbindungen.....	11
Abbildung 3: Übersicht GSM-Netz	15
Abbildung 4: GSM/GPRS-Netz	16
Abbildung 5: Realer Aufbau eines BSS/Geran	19
Abbildung 6: Grundarchitektur RNS/UTRAN	19
Abbildung 7: Realer Aufbau RNS/UTRAN	20
Abbildung 8: Gegenüberstellung der Kernnetze R99 und R4.....	21
Abbildung 9: Messaufbau	26
Abbildung 10: Leistungsbedarf Outdooranlage GSM900 und GSM1800	29
Abbildung 11: Netzauslastung Outdooranlage GSM900 und GSM1800.....	30
Abbildung 12: Leistungsbedarf Outdooranlage GSM900 und GSM1800	30
Abbildung 13: Korrelation mit Regressionsgerade.....	31
Abbildung 14: Leistungsbedarf Indooranlage 1 GSM900, GSM1800 und UMTS.....	33
Abbildung 15: Netzauslastung Indooranlage 1 GSM900 und GSM1800.....	34
Abbildung 16: Netzauslastung Indooranlage 1 UMTS	35
Abbildung 17: Leistungsbedarf Indooranlage 2 GSM900, GSM1800 und UMTS.....	36
Abbildung 18: Leistungsbedarf Indooranlage 2 UMTS	37
Abbildung 19: Netzauslastung UMTS Indooranlage 2 UMTS.....	37
Abbildung 20: Netzauslastung GSM Indooranlage 2 UMTS.....	38
Abbildung 21: Leistungsbedarf Outdooranlage Messzyklus 2	40
Abbildung 22: Durchschnittlicher Tagesleistungsbedarf GSM900 Outdooranlage.....	41
Abbildung 23: Durchschnittlicher Tagesleistungsbedarf GSM1800 Outdooranlage.....	41
Abbildung 24: Durchschnittlicher Tagesleistungsbedarf GSM900+1800 Indooranlage 2	42
Abbildung 25: Durchschnittlicher Tagesleistungsbedarf UMTS Outdooranlage 2.....	43
Abbildung 26: Leistungsbedarf pro Netzelement	47
Abbildung 27: Verlauf des Gesamtleistungsbedarfes der Station.....	49

Abbildung 28: Verlauf des Leistungsbedarfes der Klimaanlage	50
Abbildung 29: Temperaturverlauf Oktober 07 Aesch (Quelle: www.dreer.ch)	50
Abbildung 30: Energiebedarf der Klimaanlage in 6 Tagen	52
Abbildung 31: Energieverbrauch Infrastruktur.....	55
Abbildung 31: Status des Open Wireless Netzes in St. Gallen, Stand Ende August 2007	60
Abbildung 32: Herkömmlich vertikale Dienstintegration und Verwendung von gemeinsam genutzten Funktionen im IMS.....	64
Abbildung 33: Zusammenhang zwischen Auslastung η und spezifischem Leistungsbedarf in W/Erlang.	66
Abbildung 34: Status des Open Wireless Netzes in St. Gallen, Stand Ende Februar 2008	68
Abbildung 35: Normtemperatur Basel-Binningen (Quelle: www.meteoschweiz.admin.ch)	70
Abbildung 36: Mehrwegeausbreitung.....	78
Abbildung 37: Prinzip der DSSS-Technik	80
Abbildung 38: Mögliche Abdeckung einer Gesamtfläche mit WLAN-Routern	82
Abbildung 39: Simulationen des Abdeckungsgrads für $n/N = 0.000426$	83

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Landesverbrauch der elektrischen Energie in der Schweiz (Quelle: BFE)	10
Tabelle 2: Momentaner Stand und Trend der Entwicklung der Abbonnentenzahlen	12
Tabelle 3: Messmittel	26
Tabelle 4: Mittlere effektive Strahlungsleistung ERP und Antennengewinn Outdooranlage	29
Tabelle 5: Mittlere effektive Strahlungsleistung ERP pro Sektor Indooranlage 1	35
Tabelle 6: Mittlere effektive Strahlungsleistung ERP pro Sektor Indooranlage 2	38
Tabelle 7: Merkmale der untersuchten Anlagen	43
Tabelle 8: Übersichtstabelle der untersuchten Netzelemente	44
Tabelle 9: Leistungsbedarf und Konfiguration BSC	45
Tabelle 10: Konfiguration DN2	45
Tabelle 11: Leistungsbedarf DN2	45
Tabelle 12: Leistungsbedarf TRAU	46
Tabelle 13: Leistungsbedarf RXI	46
Tabelle 14: Leistungsbedarf RNC	46
Tabelle 15: Leistungsbedarf Elemente CN	47
Tabelle 16: Daten der Klimaanlage	48
Tabelle 17: Zeitangaben der Klimamessungen	51
Tabelle 18: Energieverbrauch der Klimaanlage in kWh	52
Tabelle 19: Mögliches Einsparpotential einer Klimaanlage pro Jahr	53
Tabelle 20: Anzahl und Leistungsbedarf Netzelemente	54
Tabelle 21: Leistungsbedarf und Energieverbrauch Infrastruktur	54
Tabelle 22: Leistungsbedarf und Energieverbrauch Netzelemente und Indoorklimaanlagen	55
Tabelle 23: Die Anzahl benötigter Standorte (UMTS Forum Report #38)	57
Tabelle 24: Anzahl Router und geschätzter Leistungsbedarf für einen gegebenen Abdeckungsgrad am Beispiel der Stadt Zürich.	61
Tabelle 25: Die 20 bevölkerungsreichsten Städte der Schweiz	62
Tabelle 26: Anzahl Router und geschätzter Energiebedarf für einen gegebenen Abdeckungsgrad hochgerechnet auf die 20 bevölkerungsreichsten Städte der Schweiz.	62

Tabelle 27: Vergleich Leistung und Energie Basisstationen vs. restl. Netzelemente	66
Tabelle 28: Kühlleistung und Leistung der BS	67
Tabelle 29: Vergleich von Pico- und Mikrozellen mit einer Outdoor-BTS	73
Tabelle 30: Immissions- und Anlagegrenzwerte für die Schweiz.....	74

1. AUSGANGSLAGE

Der Verbrauch der elektrischen Energie in der Schweiz nahm in den vergangenen Jahren tendenziell um etwa 1.6 % pro Jahr zu. Für das Jahr 2007 resultierte zwar eine Abnahme. Diese ist jedoch auf einen unterdurchschnittlichen Energiebedarf im ersten Quartal 2007 aufgrund der ungewöhnlich milden Witterung zurückzuführen. Im dritten und vierten Quartal 2007 war der Endverbrauch um 0.8 %, resp. 4.4 % höher als im Vorjahr.

Kalenderjahr	Endverbrauch ¹ der elektrischen Energie [GWh]
2003	55'122
2004	56'171
2005	57'330
2006	57'782
2007	57'432

Tabelle 1: Endverbrauch der elektrischen Energie in der Schweiz (Quelle: BFE)

Wie der Abbildung 1 zu entnehmen ist, sind Industrie, Haushalte und Dienstleistungsgewerbe die grössten Verbraucher von elektrischer Energie. In den Schweizer Haushalten werden demnach pro Jahr etwa 17'700 GWh an elektrischer Energie verbraucht. Bei einer Zahl von 3'181'568² Haushalten resultiert ein durchschnittlicher Energiebedarf von ca. 5.6 MWh pro Jahr und Haushalt, was einer mittleren Leistung von etwa 635 W entspricht.

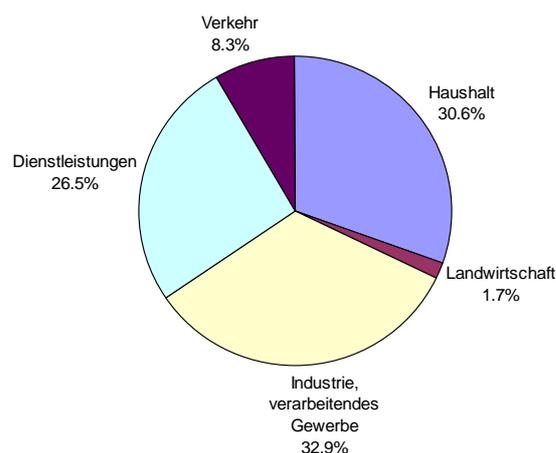


Abbildung 1: Elektrischer Energieverbrauch nach Kundenkategorien³

¹ Endverbrauch: Gesamter Verbrauch der Haushalte, Gewerbe, Landwirtschaft, Dienstleistungen, Industrie und des Verkehrs ohne Verluste.

² Quelle: BFS, Neuchâtel 2003 - Eidgenössische Volkszählungen.

³ Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2006, Bundesamt für Energie.

Der steigende Bedarf an elektrischer Energie macht sich auch im Bereich der mobilen Kommunikation bemerkbar. Einerseits steigt die Anzahl der Mobilfunkteilnehmer, und andererseits wird die Infrastruktur der Mobilfunknetze ständig ausgebaut. Die Technologien, die zurzeit zur Anwendung kommen, sind vor allem GSM und UMTS. Leider existieren kaum Daten zum Energieverbrauch der Infrastruktur dieser Netze. Ausserdem sind die Folgen in Bezug auf den Energieverbrauch für die Migration von GSM zu UMTS noch unklar. Weiter besteht natürlich auch seitens der Mobilfunkbetreiber, nicht zuletzt aus Kostengründen, der Wunsch den Energieverbrauch zu senken. Durch die aktuellen politischen Diskussionen Stromlücke, Klimaerwärmung u.s.w. drängt sich natürlich eine rationellere Nutzung der Energie auch in dieser Branche auf.

Am 31.12.2005 belief sich die Anzahl Mobilfunkkunden (mit und ohne Kundenvertrag) in der Schweiz auf 6'834'233, was gegenüber dem Vorjahr eine Steigerung im 8.9% bedeutete⁴. Gemäss Fernmeldestatistik wurden im Jahr 2005 im Mobilfunknetz 3'796 Millionen Sprachverbindungen mit einer Gesamtdauer von 5'931 Millionen Minuten vermittelt. Diese Verbindungen teilten sich wie folgt auf:

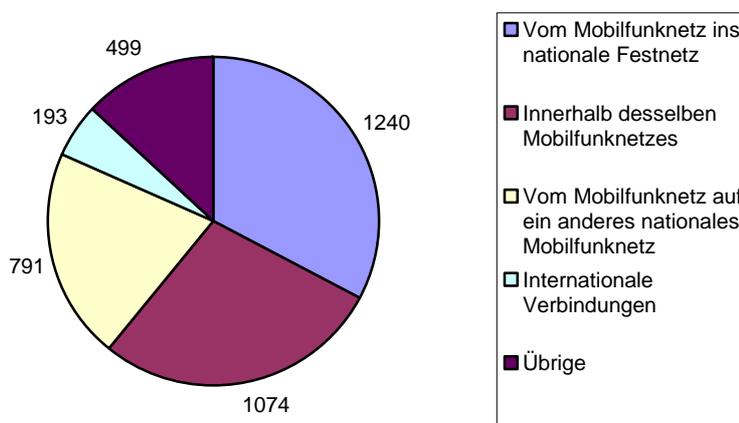


Abbildung 2: Aufteilung der Mobilfunkverbindungen [in Mio. Sprachverbindungen]

Im gleichen Zeitraum wurden 3.6 Milliarden SMS und 45 Millionen MMS übertragen. Mittels GPRS und UMTS wurden 12'699 Millionen kBytes übertragen.

Im Jahr 2006 stieg die Anzahl Mobilfunkabonnenten um 8.5% auf 7.418 Millionen Benutzer. Damit wurde ein Versorgungsgrad von 98.8% der Bevölkerung erreicht. Etwa 41% der Kunden benutzten ein Prepaid-Abo.

Die nachfolgende Tabelle aus einem Bericht des Bakoms⁵ fasst diese Zahlen zusammen und enthält auch eine grobe Vorhersage über die zukünftige Entwicklung.

⁴ Amtliche Fernmeldestatistik 2005 des Bakoms, 5. 02. 2007.

⁵ Fernmeldestatistik, Entwicklung bis zum 31.12.2006 für bestimmte Indikatoren, Sammlung aus diversen Quellen, Bakom, Mai 2007.

	Einheit	Jahr		Delta	Trend		Kommentar
		2005	2006		3 Jahre	5 Jahre	
Mobiltelefonabonnenten	1'000	6'834	7'418	8.5%	↗	→	Starkes Wachstum. Mässiger Preiswettbewerb.
Postpaid	1'000	4'026	4'337	7.7%	↗	→	
Prepaid	1'000	2'808	3'081	9.7%	↗	→	Markt ungleich verteilt (Swisscom mit grossem Anteil)

Tabelle 2: Momentaner Stand und Trend der Entwicklung der Abonnentenzahlen

2. ZIEL DER ARBEIT

Übergeordnete Zielsetzung des Projekts ist es, betriebliche, technologische und organisatorische Möglichkeiten für die möglichst energieeffiziente Realisierung von Mobilfunkdiensten zu identifizieren und entsprechende Handlungsalternativen zu formulieren. Zu diesem Zweck wird das Projekt in drei Phasen aufgeteilt.

2.1. ANALYSE DES ENERGIEVERBRAUCHS

In einer ersten Phase soll der Energieverbrauch von mehreren (2 bis 3) Standorten gemessen und im Detail analysiert werden. Insbesondere interessiert, wie sich der Energiefluss auf die verschiedenen Komponenten

- Infrastruktur (im Vergleich zu Terminals)
- Klimatisierung
- USV (battery backup)
- Netzelemente (Transceiver, Controller, Switching, ...)

aufteilt. Eine erste Schwierigkeit dürfte darin bestehen, die einzelnen Komponenten sachlich-richtig zu definieren und eindeutig gegeneinander abzugrenzen. Der Energiebedarf der Klimatisierung und der USV soll zwar bestimmt, jedoch nicht im Detail untersucht werden.

Im Weiteren interessiert die Abhängigkeit der Energieflüsse von

- Auslastung/Verkehr
- Tages-, ev. Jahreszeit⁶
- Klimatische Bedingungen
- Technologie
- Netzarchitektur
- Anzahl Standorte in einem Versorgungsgebiet
- Anzahl Betreiber⁷

Für die Messungen schlägt sunrise mehrere Indoor- und Outdoor-Standorte vor, in denen möglichst alle gängigen Technologien (GSM, EDGE, UMTS, ...) betrieben werden. Die Messungen werden durch einen Mitarbeiter der FHNW durchgeführt, mit Unterstützung durch sunrise (technisches Know-how, Zugang zu den Standorten).

Einzelne Messungen, insbesondere an Netzelementen, können auch im Labor durchgeführt werden.

2.2. MÖGLICHKEITEN DER OPTIMIERUNG

Aufgrund der Erkenntnisse aus Phase 1 und von theoretischen Abschätzungen sollen in dieser zweiten Phase Optimierungsmöglichkeiten identifiziert und bewertet werden. Die Massnahmen können voraussichtlich grob in die folgenden drei Bereiche eingeteilt werden:

⁶ Da die Projektdauer auf ein Jahr begrenzt ist, dürfte es schwierig sein, über jahreszeitliche Schwankungen zuverlässige Aussagen zu machen.

⁷ Da die Messungen nur mit einem Betreiber durchgeführt werden, können darüber nur theoretische Überlegungen angestellt werden.

- **Technologie:**
Bei welchen Komponenten liegt das grösste Einsparpotential? Welche technische Möglichkeiten existieren für die Optimierung des Energieverbrauchs? Welche Mobilfunktechnologie ist bezüglich spezifischem Energieverbrauch (Energieverbrauch pro Gbit) vorteilhaft?
- **Betrieb:**
Bei gegebener (marktbestimmter) Technologie, welche sind energieeffiziente Arten, das Netz zu betreiben?
- **Netzplanung:**
Welche Grundsätze hinsichtlich Netzplanung können aus der Forderung nach möglichst energieeffizientem Betrieb abgeleitet werden? Inwiefern hat die Anzahl Betreiber in einem Versorgungsgebiet einen Einfluss auf die Energieeffizienz?

Die gefundenen Möglichkeiten sollen hinsichtlich ihrer energetischen Wirksamkeit, den Auswirkungen auf die Dienstqualität/-verfügbarkeit und den finanziellen Konsequenzen bewertet werden.

2.3. FORMULIERUNG VON HANDLUNGALTERNATIVEN

Als Abschluss des Projekts sollen die Erkenntnisse in einem Bericht zusammengefasst und Handlungsalternativen für eine möglichst energieeffiziente Versorgung mit Mobilfunkdiensten formuliert werden. Diese Empfehlungen dürften sich in zwei Themen gliedern:

- Vorschläge zuhanden der Netzbetreiber zum energieeffizienten Betrieb von Standorten.
- Übersicht über noch nicht gelöste Probleme und festgestellte Erkenntnislücken sowie daraus abgeleitete Vorschläge für das weitere Vorgehen.

3. ANALYSE DER MOBILFUNKNETZARCHITEKTUR

Bevor die verschiedenen Netzelemente bezüglich ihres Energieverbrauchs ausgemessen werden können, muss das Netz der jeweiligen Technologie analysiert werden. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der GSM⁸- bzw. der UMTS⁹-Netzarchitektur wie sie zurzeit beim Mobilfunkbetreiber Sunrise anzutreffen ist. Für die Bestimmung des Energieverbrauchs einer kompletten Station ist es wichtig zu wissen, welches Rack welches Netzwerkelement beinhaltet und zu welcher Technologie es zuzuordnen ist. Im Folgenden sollen die Netzwerkarchitekturen der beiden Technologien möglichst praxisnahe erläutert werden.

3.1. DIE FUNKTIONALE GSM-NETZARCHITEKTUR

Die funktionale GSM-Netzarchitektur soll hier schrittweise erklärt werden. Angefangen wird mit einer Übersicht zum GSM-Netz und anschliessend soll das GSM/GPRS¹⁰-Netz inklusive Schnittstellen detaillierter erläutert werden.

GSM Übersicht

Das GSM-Netz lässt sich in drei Subsysteme unterteilen. Das BSS¹¹, beinhaltet alle Funktionen für die Verbindung zu einem mobilen Funkteilnehmer. Das NSS¹², auch Core Network genannt, beinhaltet alle Komponenten zur Verbindung des drahtlosen Netzes mit dem herkömmlichen leitungs- und paketvermittelnden Netz. Es ist zuständig für den Verbindungsaufbau und die Verbindungskontrolle. Ausserdem ist es zuständig für die Teilnehmerverwaltung und das Roaming zwischen den Netzbetreibern. Der dritte Teil eines GSM-Netzes ist das OSS¹³ welches Funktionen für den sicheren Betrieb und die Wartung übernimmt. Zusätzlich ist es für die Authentifizierung und Geräteidentifizierung verantwortlich. Die folgende Abbildung zeigt eine grobe Übersicht des GSM-Netzes mit den drei Subsystemen.

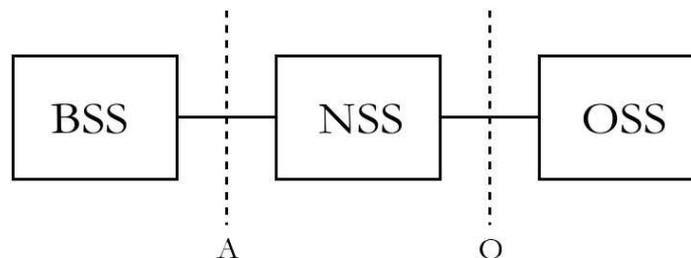


Abbildung 3: Übersicht GSM-Netz

⁸GSM: Global System for Mobile Communication ist der Mobilfunkstandard der 2. Generation

⁹UMTS: Universal Mobile Telecommunication System ist der Mobilfunkstandard der 3. Generation

¹⁰GPRS: General Packet Radio Service ist der paketvermittelnde Mobilfunkstandard der 2.5 Generation

¹¹ BSS – Base Station Subsystem, bestehend aus BTS und BSC.

¹² NSS – Network Subsystem

¹³ OSS – Operation and Support Subsystem

Die Verbindung zwischen BSS und NSS wird als A-Schnittstelle bezeichnet, während die Verbindung zwischen NSS und OSS als O-Schnittstelle bezeichnet wird.

Die GSM/GPRS-Netzarchitektur und ihre Komponenten

Die oben erwähnten Subsysteme werden nun mit Hilfe einer Abbildung etwas detaillierter betrachtet. Die Abbildung zeigt die Netzarchitektur wie sie auch in ETSI1991b definiert wurde. Die Komponenten die zum OSS gehören sind in der Abbildung in Form von Zylindern dargestellt, da es sich im Prinzip um Datenbanken handelt.

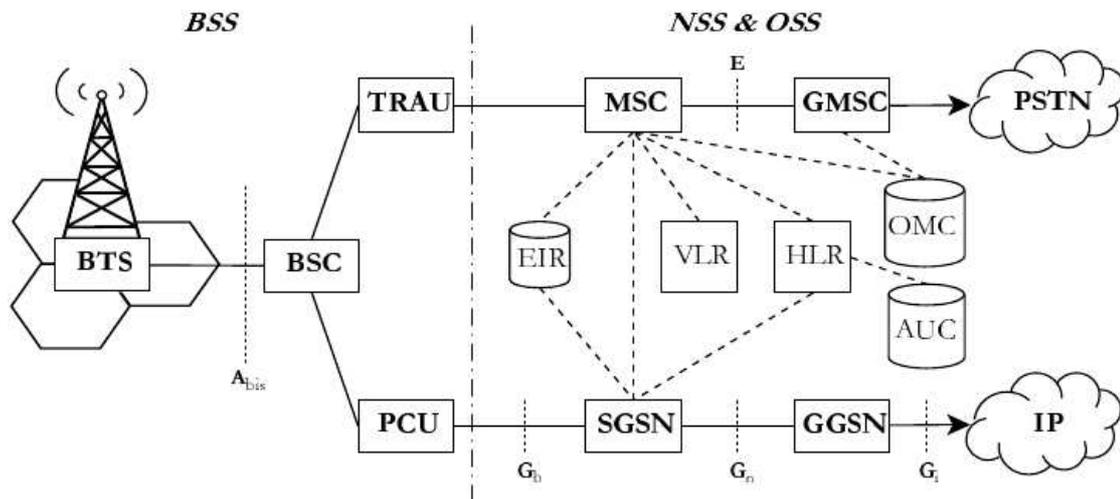


Abbildung 4: GSM/GPRS-Netz

Die strichpunktirierte Linie zeigt die A-Schnittstelle und trennt das BSS und das NSS. Ausserdem sind weitere Schnittstellen dazugekommen welche bei der Erläuterung der jeweiligen Netzelemente genauer erklärt werden. Die durchgezogenen Verbindungen zwischen den Netzelementen sind Daten- und Signalisierungskanäle wobei die unterbrochenen Verbindungen nur Signalisierungskanäle darstellen. Die Signalisierungskanäle werden in einem STP¹⁴ zentral und sternförmig verbunden. Dort entscheidet ein Schaltelement welche Verbindungen gerade gemacht werden müssen. Der STP wird im Folgenden nicht speziell erklärt, muss aber bei den Messungen zum gesamten Energieverbrauch berücksichtigt werden.

Zuerst werden die Netzelemente des leitungsvermittelnden GSM erläutert (oberer Pfad in der Abbildung 4). Anschliessend sollen die von GSM und GPRS gemeinsam genutzten Netzelemente (im Zentrum der Abbildung 4) besprochen werden und zum Schluss werden die drei Netzelemente (unterer Pfad der Abbildung 4) die exklusiv für das paketvermittelnde GPRS genutzt werden erläutert.

Base Transceiver Station (BTS):

Die BTS oder Sende-/Empfangsstation enthält alle funktechnischen Einrichtungen. Hierzu gehört die Antenne, die Elektronik für die Signalverarbeitung und die Verstärker. Eine BTS kann, wie in der Abbildung 4 gezeigt, mehrere Funkzellen bilden, man spricht dann von Sektorisierung. Für jeden Sektor wird dann eine eigene Sende-/Empfangshardware eingesetzt. Der Radius der Fläche die eine BTS abdecken kann beträgt theoretisch 35km, doch auch in ländlichen Gebieten ist ein Radius von mehr als 15km kaum anzutreffen. Da die Anzahl Nutzer pro BTS begrenzt ist, sind die Radien der Zellen in städtischen Gebieten typischerweise um einiges kleiner. Sie reichen dort von einigen 100m bis zu 3 - 4km. Ausserdem wird der Radius der Fläche die eine BTS abdecken kann oft durch die Verordnung betreffend nicht-ionisierender Strahlung (NIS) begrenzt. Die BTS ist über die A_{bis}-Schnittstelle mit der BSC verbunden. Dies wird durch Richtfunkverbindungen realisiert, welche eine eigene Hardware benötigen. Da es im Verhältnis zu anderen Netzelementen sehr viele BTS gibt, liegt hier bezüglich des Energieverbrauchs wahrscheinlich das grösste Einsparpotential.

¹⁴ STP: Signaling Transfer Point

Base Station Controller (BSC):

Ein BSC kann mehrere BTS im gleichen BSS verwalten. Die Aufgabe des BSC ist der Aufbau von Signalisierungs- bzw. Sprachkanälen. Ausserdem ist der BSC für die Verbindungsübergabe der Mobilfunkteilnehmer zwischen den verschiedenen BTS zuständig. Dieser Vorgang wird als Handover bezeichnet. Für die Entscheidung ob eine Übergabe stattfindet oder nicht, werden Messungen der Signalqualität durchgeführt.

Transcoding and Rate Adaption (TRAU):

Die TRAU hat die Aufgabe die Datenraten zwischen dem BSC und der MSC anzupassen. Bei GSM belegt ein Sprachkanal etwa 13 kbit/s und wird in 1/4 eines E1-Kanals übertragen. In der TRAU werden diese 13 kbit/s in ein 64 kbit/s-PCM¹⁵-Format umgewandelt. In der Gegenrichtung werden die 64 kbit/s PCM Sprachdaten der MSC in 13 kbit/s Sprachdaten für die BSC komprimiert.

Mobile Switching Center (MSC):

Das MSC, auch mobile Vermittlungsstelle genannt, ist das zentrale Element im GSM-Netz. Eine Aufgabe ist die Verbindung zu anderen MSCs sowie die Verbindung zu mehreren BSCs über die A-Schnittstelle. Da alle Verbindungen zwischen Mobilfunkteilnehmer über ein MSC geleitet werden, ist diese auch zuständig für den Verbindungsaufbau, den Verbindungsabbau und die Verbindungsübergabe zu anderen MSCs (Handover). Ausserdem gehört die Authentifizierung sowie das Location Management¹⁶ zu den Aufgaben einer MSC. Ein GMSC¹⁷ besitzt zusätzliche Funktionen welche es ermöglichen die Verbindung zum leitungsvermittelten Festnetz herzustellen. In Abbildung 4: GSM/GPRS-Netz ist dies mit der PSTN¹⁸-Wolke dargestellt. Die Schnittstelle zwischen einem MSC und einem GMSC wird als E-Schnittstelle bezeichnet. Auch hier kommen E1-Verbindungen zum Einsatz. Ausserdem existieren SMSC die für das Weiterleiten und Speichern von Kurznachrichten (SMS) zuständig sind. Im Netzwerk befinden Sie sich zwischen den MSCs und sind eigenständige Server.

Home Location Register (HLR):

Das HLR ist eine Datenbank die alle Daten eines Mobilfunkteilnehmers beinhaltet. Dazu gehört unter anderem die Rufnummer auch MSISDN genannt, die freigegebenen Dienste (z.B. Anrufumleitung oder GPRS), die internationale Kennung IMSI, sowie Daten über den Aufenthaltsort.

Visitor Location Register (VLR):

Jedem MSC ist ein VLR zugeordnet welches alle relevanten Daten der Mobilfunkteilnehmer speichert. Es stellt eine dynamische Datenbank dar, die Daten vom HLR kopiert um Signalisierung über weite Entfernung zwischen MSC und HLR zu vermeiden. Somit sind die Teilnehmerdaten immer lokal verfügbar.

Authentication Center (AUC):

Das AUC welches zum OSS gehört, soll die Identität sowie die Datenübertragung eines Mobilfunkteilnehmers schützen. Im AUC sind die geheimen Schlüssel abgelegt die zur Verhinderung von Missbrauch durch dritte eingesetzt werden. Das AUC kann auch direkt im HLR integriert sein.

¹⁵PCM: Pulse Code Modulation ist eine Modulationsart bei der ein analoges Signal binär codiert wird

¹⁶Durch das Einschalten eines Endgerätes meldet sich dieses beim jeweiligen Netz an. Somit ist der neue Aufenthaltsort bekannt und eingehende Verbindungen können weitervermittelt werden.

¹⁷ GMSC – Gateway Mobile Switching Center. Vermittlungsstelle mit Verbindung zum Festnetz.

¹⁸Dies ist die internationale Bezeichnung für das Telefonnetz

Equipment Identity Register (EIR):

Das EIR ist eine Datenbank die alle Gerätekennungen, auch IMEI genannt, eines Mobilfunkbetreibers beinhaltet. Es gehört zum OSS und ist eine optionale Ausstattung im GSM-Netz. Das EIR überprüft ob es beim benutzten Endgerät um ein gestohlenen oder gesperrtes Gerät handelt. Hierzu wird eine schwarze Liste geführt. Das EIR kann auch in anderen Netzelementen (MSC) integriert sein.

Operation and Maintenance Center (OMC):

Das OMC überwacht und steuert den Verkehr der MSCs. Ausserdem ist ein OMC für die Abrechnung und Erstellung des Verbindungsnachweises verantwortlich. Es gehört zum OSS.

Packet Control Unit (PCU):

Die PCU ist in der GPRS-Architektur das packetvermittelnde Gegenstück zur BSC. Die Aufgaben sind einerseits die Vergabe von Timeslots, die Flusskontrolle und die Priorisierung der Datenströme. Andererseits ist sie auch zuständig für die Fehlerkorrektur im Uplink d.h. im Pfad vom Mobilfunkteilnehmer zur BTS. Der umgekehrte Fall also von der BTS zum Mobilfunkteilnehmer wird als Downlink bezeichnet.

Serving GPRS Support Node (SGSN):

Der SGSN ist in der GPRS-Architektur das packetvermittelnde Gegenstück zur MSC. Die Gb-Schnittstelle ist hier mit E1-Kanälen realisiert wobei die Gn-Schnittstelle IP als Transportprotokoll verwendet. Hier kommt Ethernet oder ATM zum Einsatz. Weiter ist der SGSN zuständig für den Aufbau der Datenverbindung, den Wechsel von Funkzellen (Handover) und die Aktualisierung des Standortes (Location Update) eines Mobilfunkteilnehmers.

Gateway GPRS Support Node (GGSN):

Der GGSN verbindet das GPRS-Netzwerk mit dem Internet. Er ist am Aufbau einer Verbindung mit dem Internet wesentlich beteiligt und vergibt die IP-Adressen. Bei der Änderung der Position eines Mobilfunkteilnehmers während einer Verbindung kann es sein, dass der SGSN gewechselt werden muss, der GGSN bleibt jedoch immer der selbe. Für das Internet bleibt somit die Mobilität des Mobilfunkteilnehmers unsichtbar.

3.2. DAS GERAN/BSS IN DER PRAXIS

In der Praxis unterscheidet sich das Geran/BSS von der im ETSI 1991b Standard beschriebenen. Die Funktion ändert nicht, doch bezüglich des Energieverbrauchs sind die Unterschiede zu berücksichtigen. Dieser Abschnitt befasst sich mit den Änderungen im BSS. Die Abbildung 5 zeigt den Aufbau des BSS beim schweizerischen Mobilfunkbetreiber Sunrise. Wie schon bei den Abbildungen weiter oben trennt die A-Schnittstelle das Core Network vom BSS.

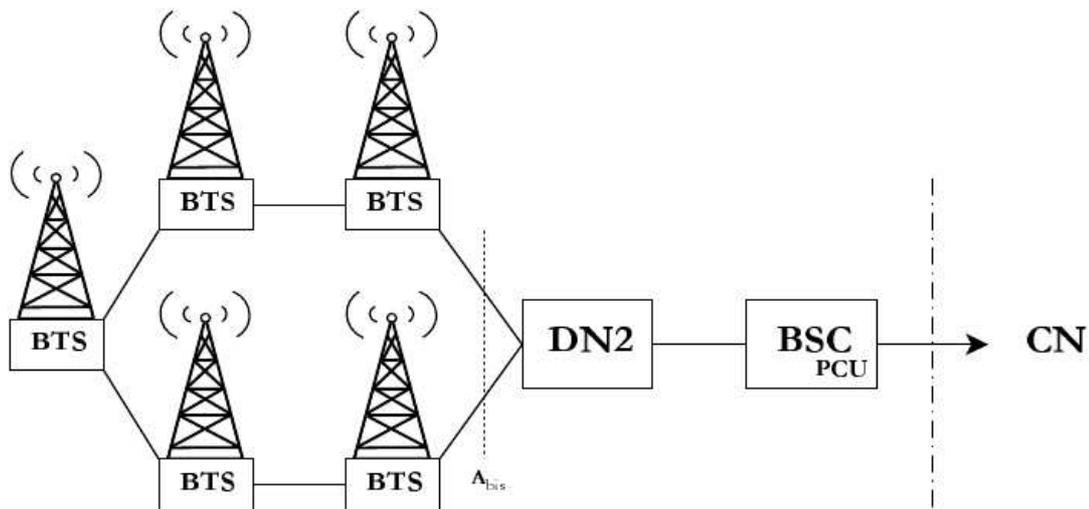


Abbildung 5: Realer Aufbau eines BSS/GERAN

Offensichtlich unterscheidet sich der reale Aufbau des BSS vom theoretischen Aufbau. Es ist ein neues Netzelement das DN2 dazugekommen, welches dafür verantwortlich ist die BTS in einem *Loop* miteinander zu verbinden. Dies geschieht aus Redundanzgründen und macht das Netz sicherer, benötigt aber die doppelte Bandbreite (2 E1 Verbindungen pro Datalink). Es besteht aber auch die Möglichkeit die BTS nicht in einem Loop sondern in einer *Chain* zu beschalten, d.h. die BTS „hängen“ wie Kettenglieder aneinander. Fällt eine BTS aus, sind alle BTS die sich hinter der ausgefallenen befinden auch abgeschnitten und funktionslos.

Ein DN2 verwaltet etwa 10-15 BTS. Eine BSC verwaltet dabei etwa 50 bis 100 DN2. Weiter ist in der Abbildung 5 (Realer Aufbau eines BSS/GERAN) zu erkennen, dass die PCU direkt in der BSC integriert ist.

3.3. DIE UMTS-NETZARCHITEKTUR RELEASE 99

Die Netzarchitektur von UMTS Release 99 unterscheidet sich nur im Radionetzwerk. Das Core-network CN bleibt dasselbe, ausser dass einige Softwareupdates gemacht wurden. Dank den neuen Technologien im RNS¹⁹ auch UTRAN genannt, konnten die Datenraten bei UMTS Release 99 gegenüber GSM um ein Vielfaches erhöht werden. Die folgende Abbildung zeigt das UTRAN wie es in Release 99 definiert ist.

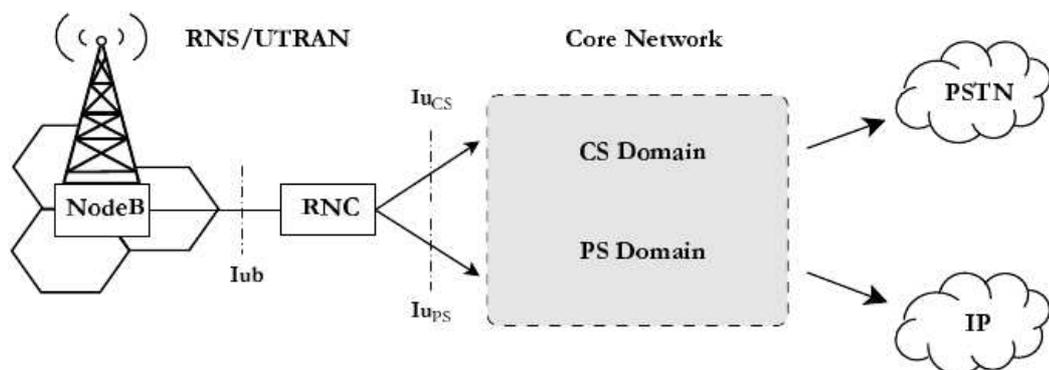


Abbildung 6: Grundarchitektur RNS/UTRAN

Wie aus der Abbildung zu sehen ist, ähnelt das UTRAN dem BSS bzw. Geran von GSM. Ein RNC kann mit einem BSC verglichen werden, ein NodeB mit einer BTS. Demzufolge verwaltet auch hier ein

¹⁹Das RNS ist zu vergleichen mit dem BSS im GSM-Netz

RNC mehrere NodeBs. Die I_{ub} -Schnittstelle zwischen NodeB und RNC ist ähnlich wie die A_{bis} Schnittstelle bei GSM. Die I_u Schnittstellen trennen hier, ähnlich wie die A-Schnittstelle bei GSM, das UTRAN vom Core Network. Ausserdem wird die I_u -Schnittstelle noch in die Schnittstellen I_{uCS} für *Circuit Switched* und die I_{uPS} für *Packet Switched* getrennt. Im Core Network ist auch wieder der leitungs- und der paketvermittelnde Teil der anschliessend mit dem Telefonnetz bzw. mit dem Internet verbunden ist.

3.4. DAS UTRAN IN DER PRAXIS

Auch das UTRAN wird in der Praxis etwas anders aufgebaut als es R99 spezifiziert. Auch hier ändert an der Funktion nichts, doch muss der Energieverbrauch des zusätzlichen Netzelementes berücksichtigt werden. Die folgende Darstellung zeigt den realen Aufbau des UTRAN.

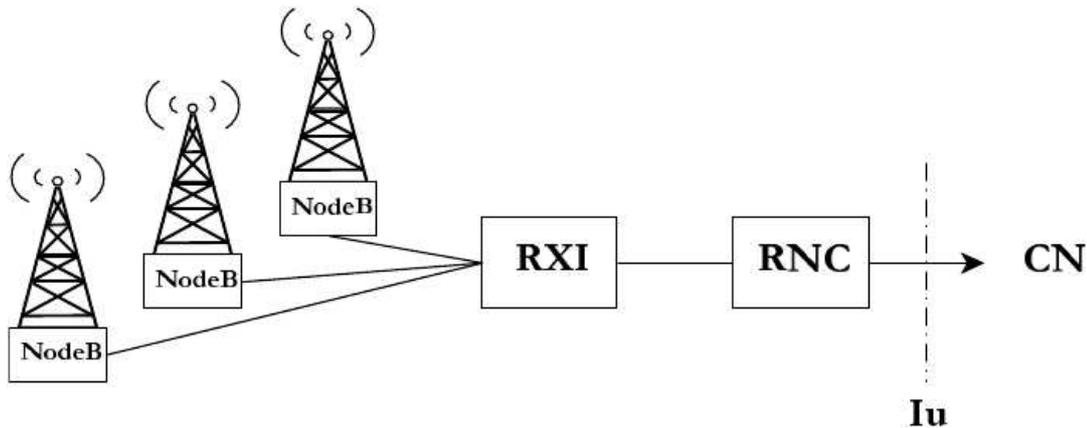


Abbildung 7: Realer Aufbau RNS/UTRAN

Das zusätzliche Netzelement wird RXI^{20} genannt und ist hauptsächlich für das Routing verantwortlich. An einem RNC können mehrere RXI angeschlossen werden, wobei ein RXI wieder mehrere NodeB verwaltet. In der Abbildung trennt die I_u -Schnittstelle das Core Network vom UTRAN.

3.5. DIE UMTS-NETZARCHITEKTUR RELEASE 4

Der Wunsch vieler Netzbetreiber ist das leitungsvermittelnde und das paketvermittelnde Kernnetz zusammen zu führen. Somit könnten vor allem auf der Weitverkehrsebene Kosten gespart werden. Wie oben erwähnt, blieb das Core Network bis zum UMTS Release 99 unverändert, ausser dass ein paar Softwareupdates vorgenommen wurden. Der Mobilfunkbetreiber Sunrise migriert zur Zeit im Kernnetzwerk von UMTS Release 99 zu UMTS R4. Der Unterschied ist, dass bei UMTS Rel.4 leitungsvermittelnde Dienste nicht mehr über E1-Verbindungen (64 kBit/s Zeitschlitz) sondern neu in ATM oder IP Paketen übermittelt werden. Somit gibt es Hardwareänderungen im Kernnetzwerk welche mit Hilfe der folgenden Abbildung erklärt werden soll.

²⁰ Auch Radio Access Network RAN-Aggregator

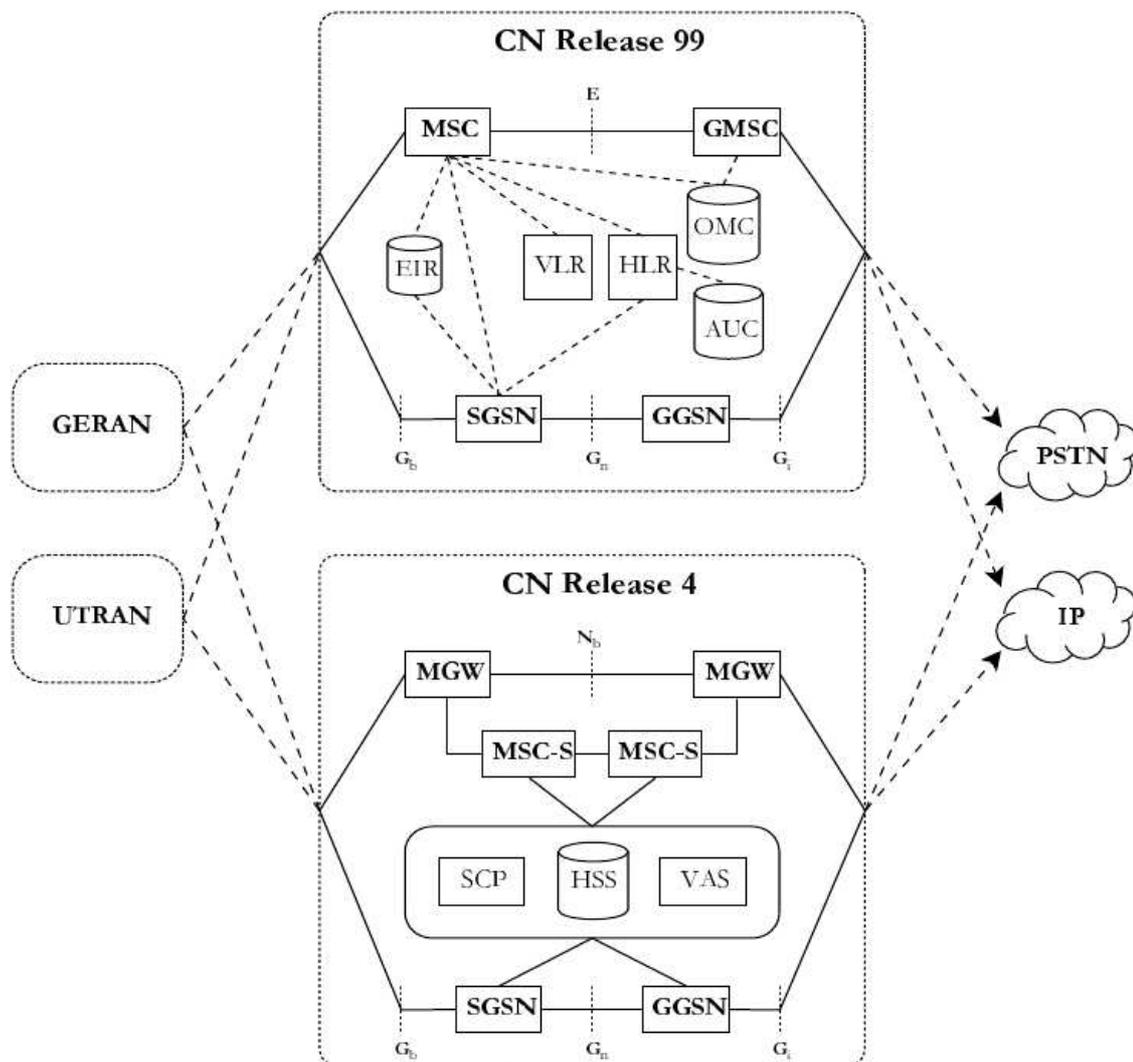


Abbildung 8: Gegenüberstellung der Kernnetze R99 und R4

Das Kernnetzwerk R99 soll nicht noch einmal erklärt werden, da es im Abschnitt „Die GSM/GPRS-Netzarchitektur und ihre Komponenten“ auf Seite 16 schon beschrieben worden ist. Im Kernnetz R4 sind im leitungsvermittelnden Teil einige Komponenten weggefallen und andere dazugekommen. Diese sollen im Folgenden erläutert werden.

Media Gateway (MGW):

Die MSC vom Kernnetzwerk R99 wurde aufgeteilt in einen MSC-Server und in einen MGW der nun zuständig ist für die Nutzdatenverbindung bzw. die Weiterleitung. Ausserdem sind Media Gateways für das Zusammenschalten verschiedener Netzwerktypen und das transcodieren der Daten zuständig. Die Verbindung zwischen zwei MGWs wird Nb-Schnittstelle genannt und basiert entweder auf ATM oder IP.

Mobile Switching Center Server (MSC-S):

Der MSC Server ist einerseits für die Signalisierung und andererseits für die Call Control- und Mobility Management Protokolle verantwortlich. Ein MSC Server kann mehrere MGW verwalten.

Home Subscriber Server (HSS):

Der HSS kann mit dem HLR aus dem GSM bzw. UMTS R99 Kernnetzwerk verglichen werden. Es beinhaltet alle nötigen Daten über den Mobilfunkteilnehmer. Ausserdem unterstützt es alle IMSNetzelemente die Anrufe bzw. Sitzungen verwalten.

Value Added Services (VAS):

Hier werden alle Nicht-Sprachdienste wie z.B. SMS, MMS u.s.w. verwaltet. Kann auch verschiedene Datenbanken und eigenen Server umfassen.

Service Control Point (SCP):

Mit diesem Netzelement können Zusatzdienste realisiert werden. Ausserdem übernimmt der SCP Funktionen, die der MSC bzw. MSC Server zusammen mit dem MGW nicht oder nur mit grossem Aufwand erledigen kann. Diese Funktionen werden auch unter dem Stichwort Intelligentes Netz (IN) zusammengefasst.

Der SGSN und der GGSN aus der paketvermittelnden Domäne werden hier nicht noch einmal erläutert, da sie dieselbe Funktion haben wie in R99.

4. MESSVORSCHRIFT

Dieser Abschnitt befasst sich mit dem Ablauf und dem Aufbau der Messungen. Zuerst wird etwas über das Ziel der Messungen und anschliessend etwas über die zu messenden Objekte gesagt. Anschliessend soll eine schematische Darstellung zum Messaufbau helfen, das Messprinzip zu verstehen. Zum Schluss werden die Messmittel und Messhilfsmittel aufgelistet und ihre speziellen Eigenschaften kurz erläutert.

4.1. ZIEL DER MESSUNGEN

Es sollen Basisstationen eines Mobilfunknetzes bezüglich ihres Energieverbrauchs ausgemessen werden. Im GSM-Netz sind dies BTS und im UMTS-Netz NodeB. Besondere Aufmerksamkeit soll der Abhängigkeit des Energieverbrauchs dieser Netzelemente zur Auslastung - also zum Datenverkehr - gewidmet werden. Ausserdem sollen auch noch weitere Faktoren wie z.B. die Konfiguration der Basisstationen berücksichtigt werden.

Messobjekte

Es wurde eine Besichtigung verschiedener Indoor- und Outdoorsites durchgeführt. Die drei Sites, die schliesslich für die Energiemessungen ausgewählt wurden, werden im folgenden Abschnitt kurz beschrieben. Die Betriebsspannung der Netzelemente liegt bei +48 VDC bzw. -48 VDC.

Outdoorsite

Es wurde eine Outdoorsite bezüglich des Energieverbrauchs untersucht. Die Site ist wie folgt bestückt:

Rack 1 GSM 1800 BTS (Nokia):

- Ultra Site Midi
- 6 TRX, je 2 pro Sektor

Rack 2 GSM 900 BTS (Nokia):

- Ultra Site Midi
- 6 TRX, je 2 pro Sektor

Rack 3 UMTS NodeB:

- Ericsson RBS 3101
- 3 TRX bzw. PA, je 1 pro Sektor
- HSDPA intergriert
- Klimaanlage und Ventilator integriert

Indoorsite 1

Rack 1 GSM 1800 BTS (Nokia):

- Ultra Site Midi

- 6 TRX, je 2 pro Sektor

Rack 2 GSM 900 BTS (Nokia):

- Ultra Site Midi
- 6 TRX, je 2 pro Sektor

Rack 3 UMTS NodeB:

- Ericsson RBS 3202
- 3 TRX bzw. PA, je 1 pro Sektor
- HSDPA integriert

Hier wird der Raum, in dem die Netzelemente untergebracht sind, durch eine Klimaanlage gekühlt.

Indoorsite 2

Die Netzauslastung dieses Standorts soll, im Vergleich zu den anderen, ziemlich gross sein. Die Netzelemente befinden sich in einem klimatisierten Container.

Rack 1 GSM 1800 und GSM 900 BTS (Nokia):

- Ultra Site
- 12 TRX (6 TRX für GSM1800 und 6 TRX für GSM900)

Rack 2 UMTS NodeB:

- Ericsson RBS 3202
- 3 TRX bzw. PA, je 1 pro Sektor
- HSDPA integriert

Speziell ist hier, dass GSM900 und GSM1800 in einem gemeinsamen Rack untergebracht sind.

4.2. MESSPRINZIP

Das Messprinzip lässt sich in zwei Teile unterteilen. Einerseits in die Messdatenerfassung und andererseits in die Messdatenübermittlung. Dieser Abschnitt soll die beiden Teile kurz erläutern und mit einer schematischen Darstellung den Messaufbau veranschaulichen.

Messdatenerfassung

Um die elektrische Energie E der Basisstationen zu bestimmen, wird die Momentanleistung p , die das Resultat des Produkts der Spannung u und des Stromes i ist, über die Zeit T integriert. Folgende Gleichung zeigt diesen Sachverhalt:

$$E_{BS} = \int_0^T p(t) dt = \int_0^T u(t)i(t) dt$$

Da mit Abtastwerten gearbeitet wird, muss die Formel zur Berechnung der Energie E auf diskrete Werte umgeschrieben werden.

$$E_{BS} = \sum_{n=0}^N p[n] \cdot T_S = \sum_{n=0}^N u[n] \cdot i[n] \cdot T_S$$

Wobei N die Anzahl Abtastwerte und T_S das Abtastintervall in Sekunden darstellen.

Die Strommessung wird durch sogenannte *Allstromzangen* realisiert. Mit diesen Stromzangen können sowohl Wechsel- wie auch Gleichströme gemessen werden. Diese Stromzangen sind mit einem Hallsensor ausgerüstet, der je nach Strom der durch die Stromzange fließt eine Hallspannung generiert. Die Hallspannung wird intern über eine Verstärkerschaltung auf einen Pegel von 10mV/A bzw. 100mV/A gebracht. Die Spannung an der Stromzange ist somit direkt proportional zum gemessenen Strom.

Da nicht erwartet wird, dass sich die Spannung in Funktion vom Datenverkehr ändert, wird die Spannung zu Beginn der Messungen einmal gemessen und anschliessend als Konstant betrachtet.

Die eigentliche Datenerfassung basiert auf einem USB-Daterecorder und einer dazugehörigen Software. Der Daterecorder ist für etwa 90 sFr. im Fachhandel erhältlich und besteht zum grössten Teil aus einem 8-Bit ADC²¹ und einem PIC-Microkontroller von Microchip. Die Samplerate ist zwischen 0,1S/s und 100S/s einstellbar. Für die von uns durchgeführten Messungen wird die kleinste Samplerate 0,1S/s gewählt, da einerseits beim Datatrafic nur 1 Wert pro Stunde zur Verfügung steht, und andererseits werden somit weniger Daten über das 3G-Modem (siehe unten) gesendet. Der Daterecorder hat ausserdem vier Kanäle (CH1 - CH4), die für vier Messungen zur Verfügung stehen.

Messdatenübermittlung

Die erfassten Strom bzw. Spannungswerte werden täglich von der Site zum FTP²²-Server der FHNW in Muttenz übermittelt. Einerseits können somit die ersten Auswertungen noch während den Messungen gemacht werden und andererseits können die Messungen auf diese Art überwacht und kontrolliert werden.

Um die Messwerte über FTP senden zu können, ist eine Verbindung mit dem Internet notwendig. Dafür werden von Sunrise 3G-Modems zur Verfügung gestellt, die über eine USB-Schnittstelle verfügen. Diese 3G-Modems stellen entweder via EDGE oder via UMTS eine Verbindung zum Internet her.

Die Messdaten werden kontinuierlich in einer Textdatei (*.txt) abgespeichert. Diese Textdatei wird mit Hilfe einer *Batchdatei*, in welcher alle benötigten FTP-Befehle enthalten sind, auf dem FTP-Server der FHNW in Muttenz abgespeichert. Unter *Windows, Geplante Tasks* kann ein neuer Task hinzugefügt werden der die Batchdatei täglich oder in einem bestimmten Intervall ausführt. Somit ist der Vorgang voll automatisiert und die aktuellen Messdaten befinden sich immer auf dem FTP-Server der FHNW in Muttenz.

Messaufbau

Die Abbildung 9 zeigt die schematische Darstellung des Messaufbaus. Die drei Punkte neben der Stromzange sollen andeuten, dass noch drei weitere Stromzangen an die USB-Messbox/Daterecorder angeschlossen werden können. Wie schon oben erwähnt, übernimmt der Laptop mit dem 3G-Modem die Übermittlung der Messdaten.

²¹ADC: Analog Digital Converter

²²FTP: File Transfer Protokoll

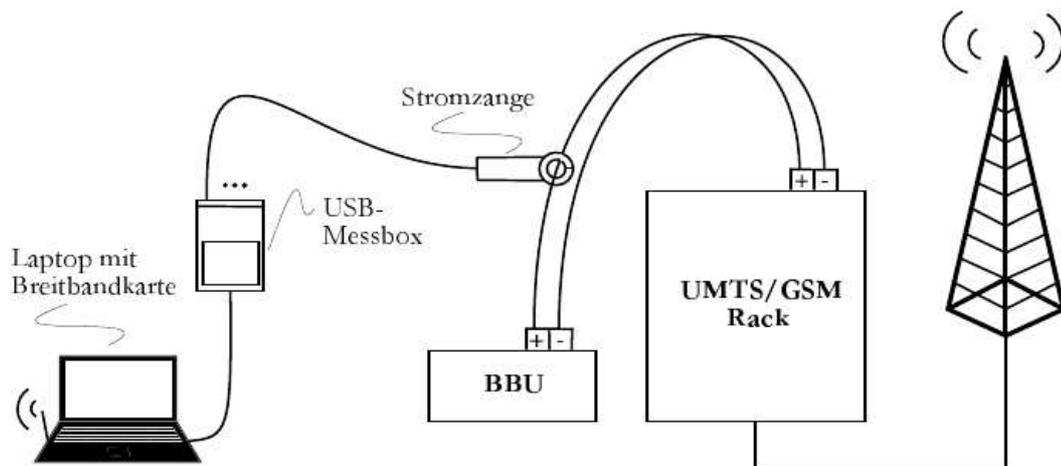


Abbildung 9: Messaufbau

Wie aus der schematischen Darstellung des Messaufbaus ersichtlich, soll zunächst nur der Strom dauernd gemessen und übermittelt werden. Die Berechnung des eigentlichen Energieverbrauchs wird dann an der FHNW in Muttenz durchgeführt.

Messmittel

Die Messmittel werden in folgender Tabelle zusammengefasst.

Anzahl	Beschreibung	Herstellerbezeichnung
6	Stromzange	LEM PR30
3	Stromzange	Tektronix A622
3	Stromzange	HP 1146A
3	USB-Datrecorder	Velleman PCS10
3	Laptop	Dell Inspiron 5100
3	3G-Modem	Zadako 3G+
1	Leistungsmessgerät	Fluke 434 Power Analyzer

Tabelle 3: Messmittel

Aus der Tabelle ist zu erkennen, dass ein Leistungsmessgerät zur Verfügung steht. Damit sollen einerseits die Stromzangen beim Messaufbau abgeglichen werden und andererseits die berechnete Leistung bzw. Energie kontrolliert werden.

Hinweise

Es folgen einige wichtige Hinweise, welche für die Einrichtung der Messungen wichtig sind. Ausserdem sind weitere Punkte aufgeführt, welche zu beachten sind.

Wie aus der Messmitteltabelle zu entnehmen ist, stehen 3 verschiedene Messzangen zur Verfügung. Die beiden Stromzangen von HP und von Tektronix können problemlos zusammen an einer USB-Messbox verwendet werden. Offensichtlich ist die Elektronik bzw. die interne Verstärkerschaltung bei beiden gleich aufgebaut. Ausserdem sehen sie optisch gleich aus. Die LEM PR30 darf nicht mit den anderen Stromzangen an einer USB-Messbox angeschlossen werden. Die interne Verstärkerschaltung der LEM PR30 setzt ihre virtuelle Masse immer genau in die Mitte der

Versorgungsspannung, wobei die Stromzangen von HP und Tektronix eine Konstante Spannung zwischen dem Pluspol und der virtuellen Masse halten.

An der USB-Messbox mit der Beschriftung 1 dürfen nur LEM PR30 Stromzangen verwendet werden.

Da bei der Übertragung der Messresultate immer das ganze Textfile übermittelt wird, werden zu Beginn der Messungen kleine Datenmengen via FTP zum FTP-Server der FHNW gesendet. Die Datenmenge nimmt anschliessend proportional zu. Jeden Tag kommen etwa 400KB an Daten dazu. D.h. am ersten Tag werden etwa 400KB übermittelt, am dreissigsten Tag etwa knapp 12MB.

Die Hersteller der Stromzangen geben eine Genauigkeit von etwa 1% an. Der Hersteller des Datarecorders etwa 3% auf den Endwert. Die Annahme, dass die Versorgungsspannung konstant ist, könnte einen weiteren Messfehler einbringen. Da das Ziel des Projekts eine grobe Hochrechnung der Energieverbrauchsdaten ist, sind Fehler im Prozentbereich unbedeutend.

Die Daten betreffend der Netzauslastung werden von Sunrise zur Verfügung gestellt. Hier steht jeweils ein Wert pro Stunde zur Verfügung, d.h. pro Tag 24 Werte. Um den Zusammenhang zwischen Datenverkehr bzw. Netzauslastung und Leistungsbedarf zu ermitteln, sollen die Daten miteinander korreliert werden.

5. ERGEBNISSE

Dieses Kapitel befasst sich mit den Resultaten der durchgeführten Messungen. Die Messresultate der drei Stationen, bei welchen BTS bzw. NodeBs ausgemessen wurden, werden nacheinander analysiert und es werden auch Aussagen über den Zusammenhang des Leistungsbedarfes bzw. der Energie und der Netzauslastung gemacht. Anschliessend folgen die Resultate der Bestimmung des Leistungsbedarfes weiterer Netzelemente. Zum Schluss folgt eine Untersuchung der Klimatisierung.

5.1. ERSTE MESSPERIODE BTS UND RBS

Bei den ausgemessenen Anlagen handelt es sich um GSM bzw. UMTS Basisstationen, die im Kapitel Messvorschrift (Seite 23) beschrieben sind. Die Messresultate dieser Anlagen werden im Folgenden nacheinander dargestellt.

Outdooranlage

Bei dieser Anlage wurde die Stromaufnahme der Basisstationen der Technologien GSM900 und GSM1800 untersucht. Auf die Untersuchung der UMTS-Basisstation wurde auf dieser Site verzichtet, da dies mit grossem Mehraufwand verbunden gewesen wäre. Diese Anlage wird etwas detaillierter betrachtet. Deshalb wird zuerst ein kleiner Überblick über den Leistungsbedarf gegeben, und anschliessend wird der Leistungsbedarf grafisch mit der Netzauslastung verglichen. Zum Schluss wird die Korrelation zwischen Leistungsbedarf und Netzauslastung mathematisch untersucht und beurteilt.

Überblick

Die erste Grafik zeigt den Leistungsbedarf der beiden Technologien in einem Zeitraum von etwa zwanzig Tagen. Die Abbildung soll einen ersten Eindruck für den Leistungsbedarf und die Tageschwankungen des Leistungsbedarfes einer Basisstation vermitteln.

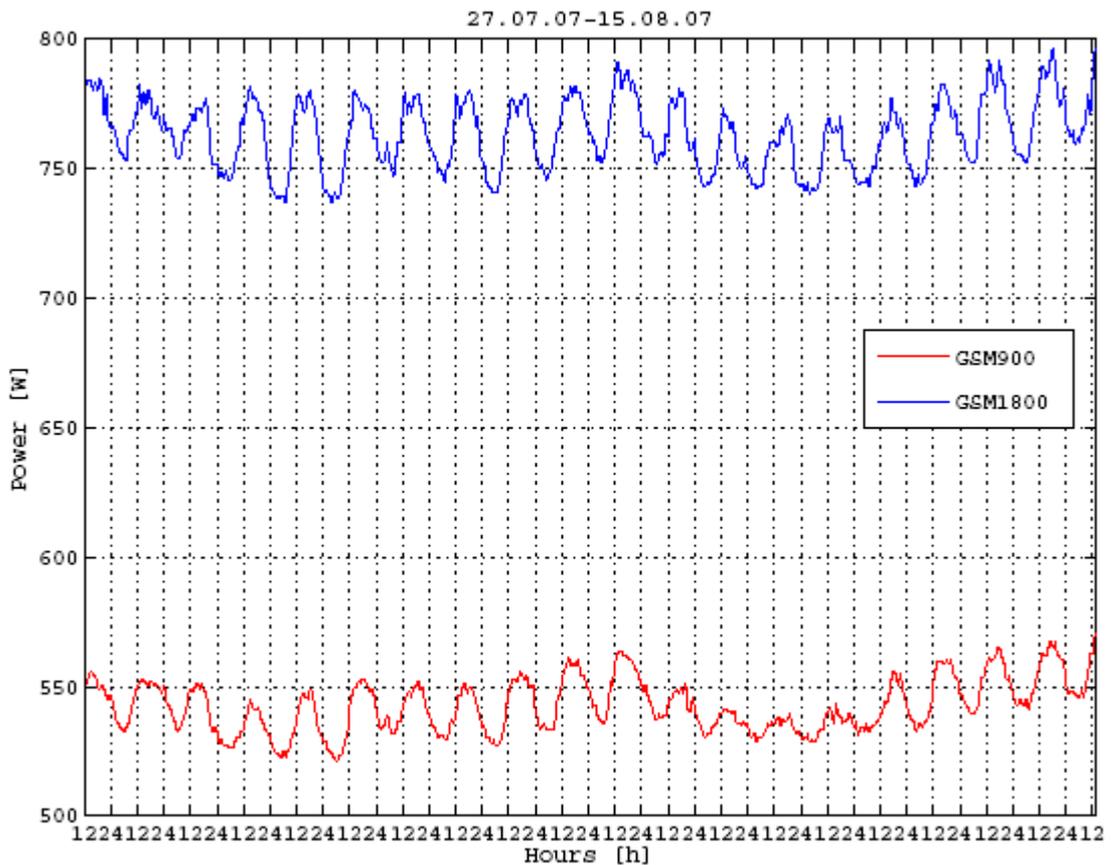


Abbildung 10: Leistungsbedarf Outdooranlage GSM900 und GSM1800

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Tageshöchstwert immer zwischen Mittag und Mitternacht liegt. Gemäss Leistungsbedarf der Basisstationen sind die Mobilfunkerteilnehmer so gegen den späten Nachmittag bzw. am frühen Abend am aktivsten. Der kleinste Wert wird immer früh am Morgen erreicht. Dies lässt sich daraus erklären, dass die meisten Menschen um diese Zeit schlafen. Weiter ist aus dieser ersten Grafik zu erkennen, dass der Grundleistungsbedarf (Leistungsbedarf der Basisstation wenn die Netzauslastung gegen 0 geht) bei den beiden Technologien sehr unterschiedlich ist. Bei GSM900 liegt dieser bei etwa 540W während er bei GSM1800 ungefähr bei 740W liegt. Ein möglicher Grund dafür wäre, dass bei GSM1800 aufgrund der grösseren Freiraumdämpfung (vgl. Anhang A:) die effektive Strahlungsleistung ERP²³ grösser sein muss um die gleiche Fläche abzudecken. Die folgende Tabelle zeigt die mittleren ERP-Werte der drei Sektoren für beide Technologien in W sowie in dBm. Ausserdem ist der Antennengewinn sowohl in dBi als auch als Faktor aufgeführt.

Technologie	ERP[W]	ERP[dBm]	Ant.gew.[1]	Ant.gew.[dBi]
GSM900	264.06	54.22	42.66	16.3
GSM1800	327.36	55.15	56.23	17.5

Tabelle 4: Mittlere effektive Strahlungsleistung ERP und Antennengewinn Outdooranlage

Die mittlere effektive Strahlungsleistung ERP ist bei GSM1800 um etwa 25% grösser als bei GSM900. Gemäss Angaben des Mobilfunkbetreibers sind die Sektoren flächenmässig etwa gleich gross, wobei der Antennengewinn bei der GSM1800 BTS etwa 30% grösser ist.

²³ERP: Effective radiated power (effektiv Abgestrahlte Leistung)

Graphischer Vergleich

Weiter ist interessant, wie stark der Leistungsbedarf mit der Netzauslastung korreliert. Hierfür sollen der Leistungsbedarf und die Netzauslastung der beiden Technologien für die gleiche Zeitspanne dargestellt und graphisch miteinander verglichen werden. Im Folgenden wird zuerst die Abbildung der Netzauslastung von GSM900 bzw. GSM1800 in Erlang gezeigt und anschliessend die Abbildung des Leistungsbedarfs in Watt. Beide Abbildungen decken denselben Zeitraum von sieben Tage ab.

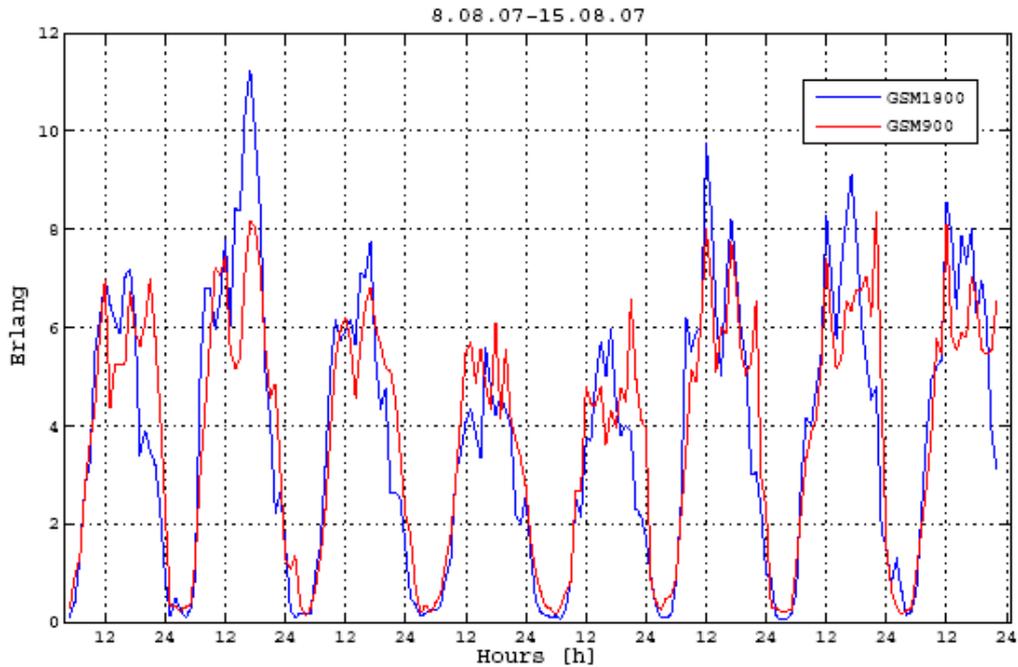


Abbildung 11: Netzauslastung Outdooranlage GSM900 und GSM1800

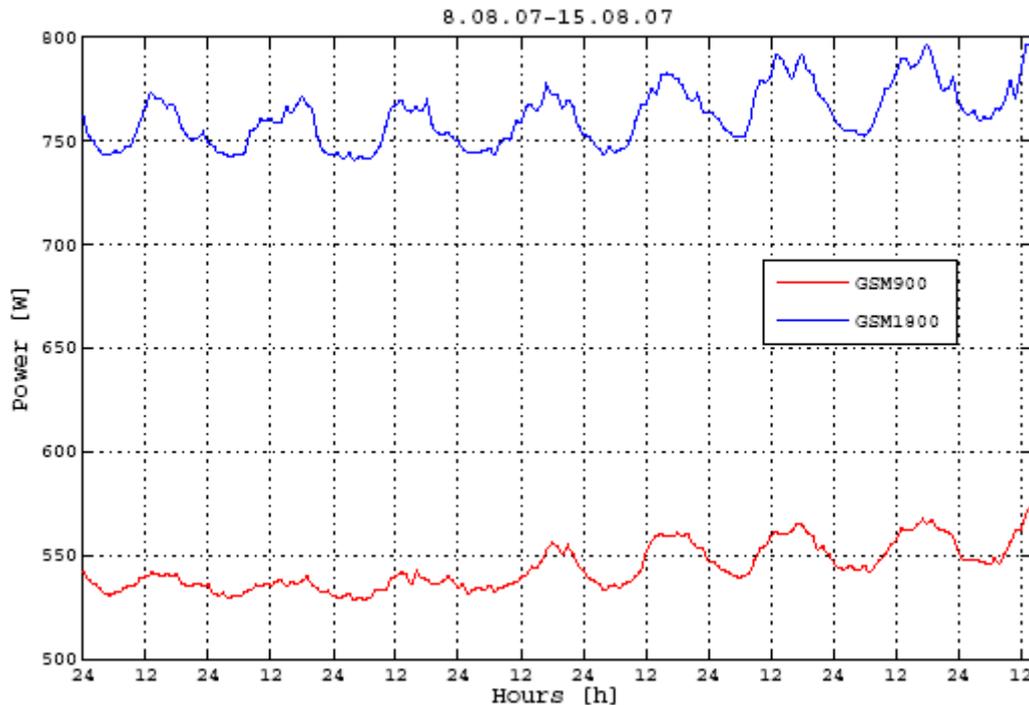


Abbildung 12: Leistungsbedarf Outdooranlage GSM900 und GSM1800

Auch bei der Netzauslastung liegt die Spitze zwischen Mittag und Mitternacht. Auch hier wird der Mindestwert in den frühen Morgenstunden erreicht. Ausserdem ist festzustellen, dass beide Technologien bzw. beide Basisstationen etwa gleich ausgelastet sind. Aus der Abbildung 11 lässt sich für beide Basisstationen ein Mittelwert von etwas mehr als 3 Erlang schätzen.

Wichtig: Bei der Bestimmung des Leistungsbedarfes wurde der Strom alle 10s abgetastet (siehe Kapitel 4). Um je einen Wert pro Stunde zu erhalten wurde für jede Stunde aus den 360 vorhergehenden Werten das arithmetische Mittel gebildet. Aus diesem Grund kann nicht erwartet werden dass die Abbildung zur Netzauslastung vollständig deckungsgleich zur Abbildung mit dem Leistungsbedarf ist.

Mathematische Untersuchung

Durch lineare Regression soll gezeigt werden, wie gut der lineare Zusammenhang zwischen Leistungsbedarf und Netzauslastung ist. Dass eine gewisse Korrelation besteht, ist aus den vorhergehenden Abbildungen schon zu erkennen. Dies soll nun mathematisch am Beispiel der Basisstation GSM1800 der Outdooranlage gezeigt werden. Es wird die Leistung (Power [W]) in Funktion zur Netzauslastung (Datatraffic[Erlang]) in einem kartesischen Koordinatensystem aufgezeichnet. Es gilt:

$$Power[W] = f(Datatraffic[Erlang])$$

Somit entsteht eine Punktwolke, die in der folgenden Abbildung dargestellt wird.

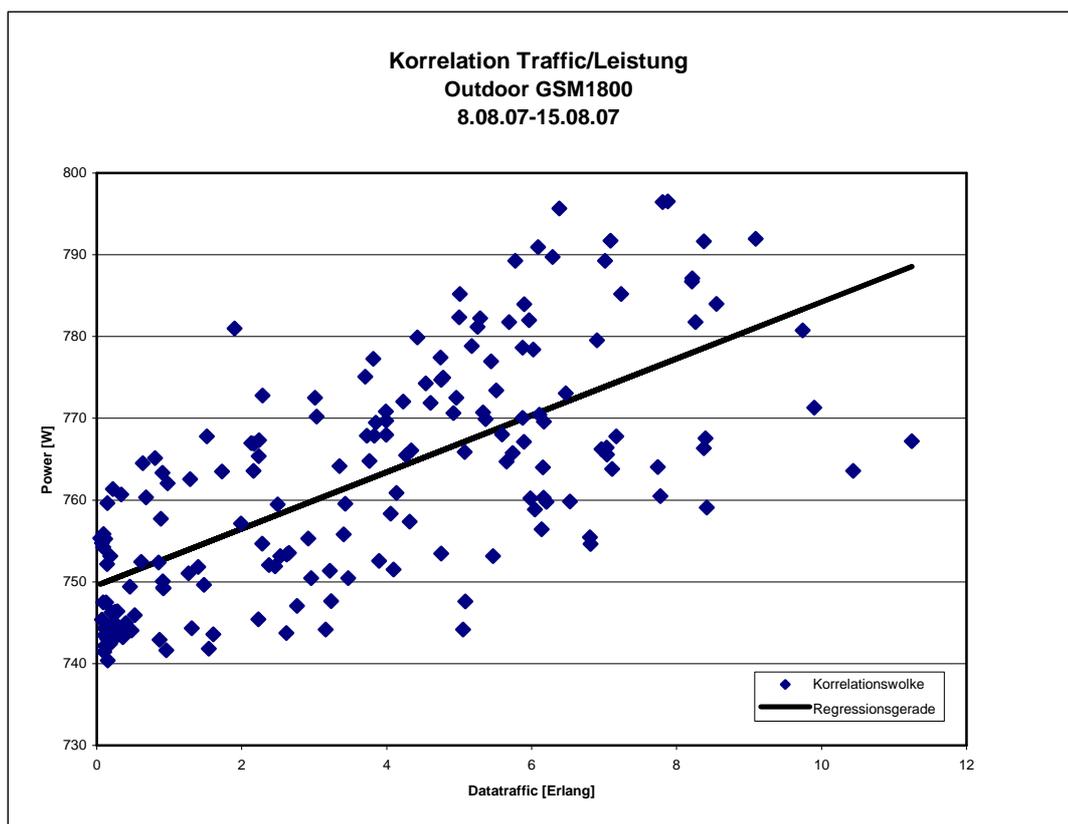


Abbildung 13: Korrelation mit Regressionsgerade

Die Punktwolke zeigt einen leicht linearen Zusammenhang zwischen der Netzauslastung und dem Leistungsbedarf. Der lineare Zusammenhang wird durch die Regressionsgerade mit der Gleichung $y = f(x) = ax + b$ verdeutlicht. Im Folgenden sollen die Koeffizienten dieser Funktion bestimmt und einige Zwischenresultate genauer analysiert werden. Um die Formeln etwas übersichtlicher zu gestalten wird die Leistung *Power* auf der Ordinate mit y und die Netzauslastung *Datatraffic* der Abszisse mit x substituiert. Die Anzahl der Werte wird dabei mit n bezeichnet.

Es werden zuerst die Mittelwerte \bar{x} und \bar{y} berechnet. Dadurch kann eine Aussage über die mittlere Leistung sowie über die mittlere Netzauslastung von GSM1800 der Outdooranlage gemacht werden.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 3,695 \text{ Erlang}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 762,365 \text{ Watt}$$

Die mittlere Leistung der Basisstation GSM1800 im Zeitraum vom 8.-15.August 2007 liegt also bei $\approx 762W$ wobei die mittlere Netzauslastung bei $\approx 3.7 \text{ Erlang}$ liegt. Weiter ist das Streumass *Varianz* σ^2 , das ein Mass für die Abweichungen zu den Erwartungswerten bzw. Mittelwerten ist, von Bedeutung.

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 7,745 \text{ (Erlang)}^2$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 199,49 \text{ (Watt)}^2$$

Die Quadratwurzel der *Varianz* ist die *Standartabweichung* σ . Sie wird oft als *mittlerer Fehler* bezeichnet. Der *mittlere Fehler* oder eben die *mittlere Abweichung* des Leistungsbedarfes ist somit $\approx 14W$ bzw. $\approx 1.9 \text{ Erlang}$ für die Netzauslastung. Gemessen an der mittleren Leistung ist die *Leistungsschwankung* in Abhängigkeit der Auslastung also vergleichsweise gering.

Um den Koeffizient a der Gleichung für die *Regressionsgerade* zu erhalten wird die *Kovarianz* definiert.

$$c_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = 26,862 \text{ Watt} \cdot \text{Erlang}$$

Die *Kovarianz* kann als *Masszahl* für den *Zusammenhang* zweier Merkmale beschrieben werden. Ist die *Kovarianz* positiv so besteht ein *gleichsinnig linearer Zusammenhang*. Ist sie negativ so ist der *Zusammenhang* *gegensinnig linear*. Bei einer *Kovarianz* von null besteht gar kein *linearer Zusammenhang*.

Es können nun die *Koeffizienten* der Gleichung für die *Regressionsgerade* bestimmt werden. Die *Steigung* a wird wie folgt berechnet:

$$a = \frac{c_{xy}}{\sigma_x^2} = 3,468 \frac{\text{Watt}}{\text{Erlang}}$$

Der *Y-Achsenabschnitt* b der *Regressionsgeraden* ergibt sich dann aus folgender Gleichung:

$$b = \bar{y} - a\bar{x} = 749,55 \text{ Watt}$$

Die Gleichung der *Regressionsgeraden* lautet somit:

$$y = f(x) = ax + b = 3,468x + 749,55$$

Der *Koeffizient* b sagt aus wie gross der *Leistungsbedarf* bei *Leerlauf* ist, d.h. wie gross der *Leistungsbedarf* ist wenn kein *Datenverkehr* vorhanden ist. Dieser Wert liegt bei $\approx 750W$. Der *Koeffizient* a kann als *zusätzlicher mittlerer Leistungsbedarf* pro *Erlang* identifiziert werden. Bei

gegebener Netzauslastung in Erlang kann also mit Hilfe der beiden Koeffizienten bzw. mit der Regressionsgeraden der Leistungsbedarf dieser Basis-Station ziemlich genau vorhergesagt werden.

Es soll nun noch der Korrelationskoeffizient r_{xy} berechnet werden. Je näher $|r_{xy}|$ bei 1, desto besser ist die Linearität zwischen dem Leistungsbedarf und der Netzauslastung. Wären sie vollständig miteinander korreliert so wäre $|r_{xy}|=1$ und alle Punkte der Korrelationswolke würden auf einer Geraden liegen. Ergibt das Resultat des Korrelationskoeffizienten null, so sind die beiden Merkmale linear unkorreliert, es besteht jedoch die Möglichkeit dass der Zusammenhang durch eine andere Funktion beschrieben werden kann. In unserem Fall ergibt sich folgender Korrelationskoeffizient:

$$r_{xy} = \frac{c_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = a \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = 0,6834$$

Es ist nicht trivial diesen Korrelationskoeffizienten zu beurteilen. Es besteht auf jeden Fall eine gewisse Korrelation, jedoch ist diese nicht besonders stark. Ein möglicher Grund dafür wäre der hohe Leerlaufleistungsbedarf und der geringe zusätzliche mittlere Leistungsbedarf pro Erlang (Steigung a der Regressionsgeraden). Die Bewertung des Korrelationskoeffizienten hängt auch sehr stark vom untersuchten Gebiet ab. Oft wird bei einem Korrelationskoeffizienten $0.3 \leq |r| \leq 0.7$ von einem mässigen bzw. mittleren linearen Zusammenhang gesprochen.

Indooranlage 1

Bei dieser Anlage wird die Stromaufnahme der Basisstationen der Technologien GSM900, GSM1800 und UMTS untersucht. Es wird vor allem der Leistungsbedarf kommentiert, wobei auch die Netzauslastung zu Hilfe genommen wird. Auf die mathematische Korrelationsbetrachtung soll hier verzichtet werden. Die folgende Abbildung zeigt den Leistungsbedarf dieser Anlage für knapp 15 Tage.

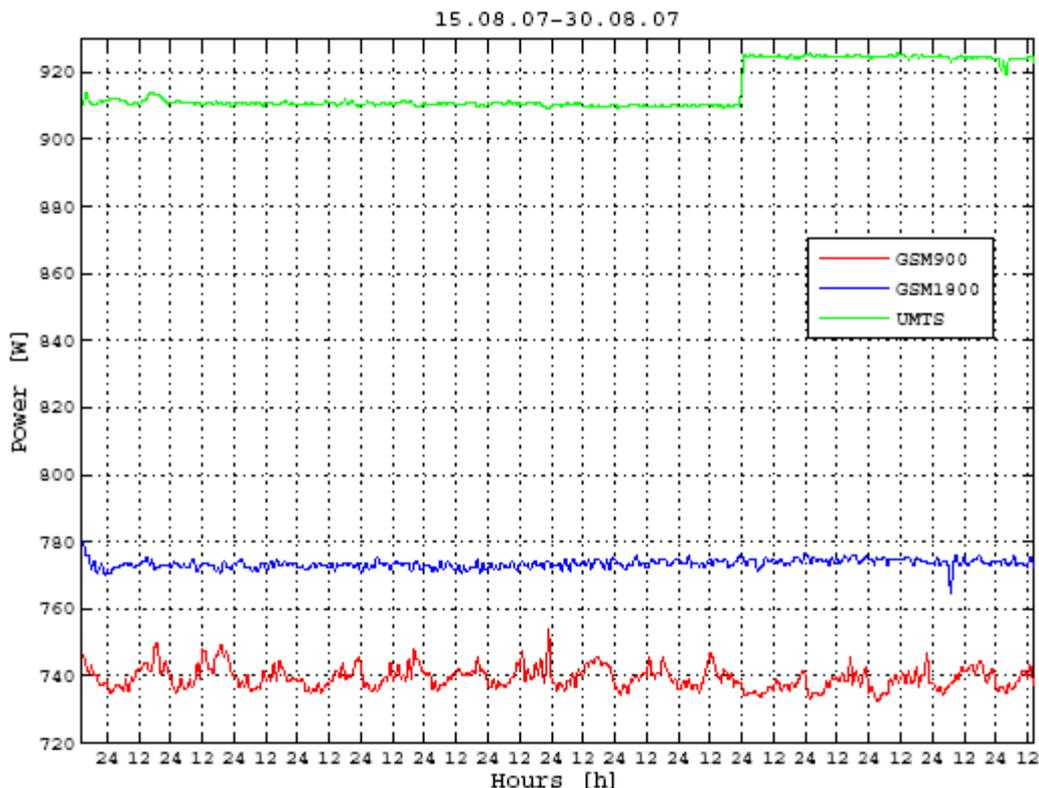


Abbildung 14: Leistungsbedarf Indooranlage 1 GSM900, GSM1800 und UMTS

Im Vergleich zur Outdooranlage ist hier offensichtlich einiges anders. Die Tages- bzw. Nachtschwankungen (durch die unterschiedliche Netzauslastung bedingt) sind hier nur bei der GSM900 Basisstation zu erkennen. GSM1800 wie auch UMTS scheinen auf den ersten Blick von der Netzauslastung unabhängig. Ausserdem ist die Grundlast von GSM900 hier um etwa 200W höher als bei der Outdooranlage. Die folgenden zwei Abbildungen stellen die Netzauslastung für GSM1800, GSM900 und UMTS für den gleichen Zeitraum (15. - 30.08.07) dar. Die Netzauslastung von GSM900 und GSM1800 wird dabei wieder in Erlang angegeben, wobei die Netzauslastung für die UMTS Basisstation in kbit/h angegeben wird.

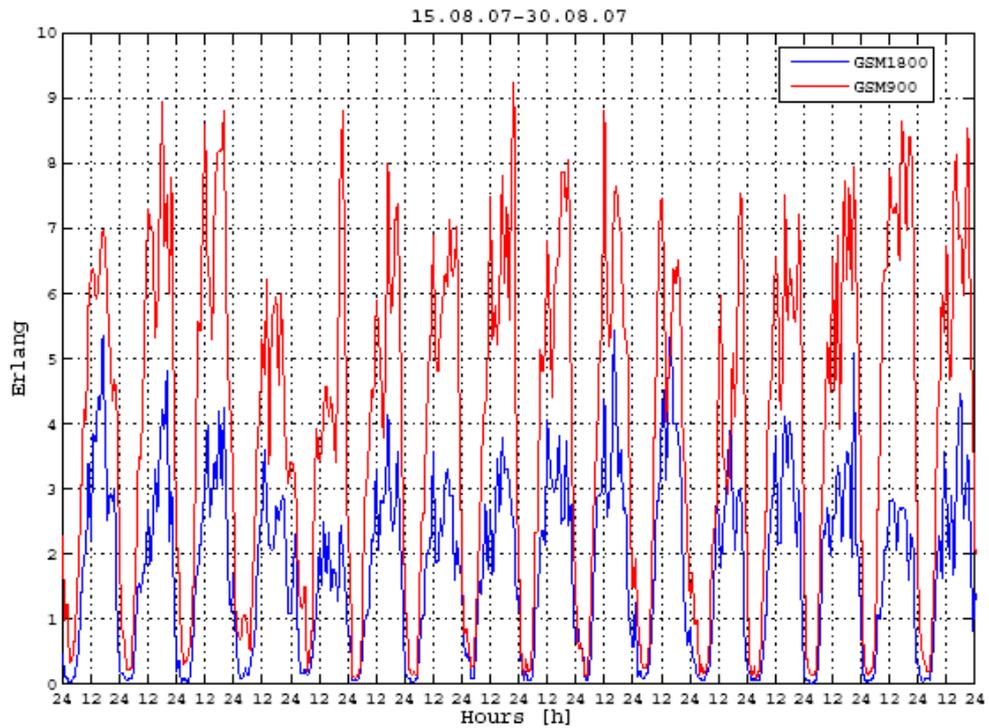


Abbildung 15: Netzauslastung Indooranlage 1 GSM900 und GSM1800

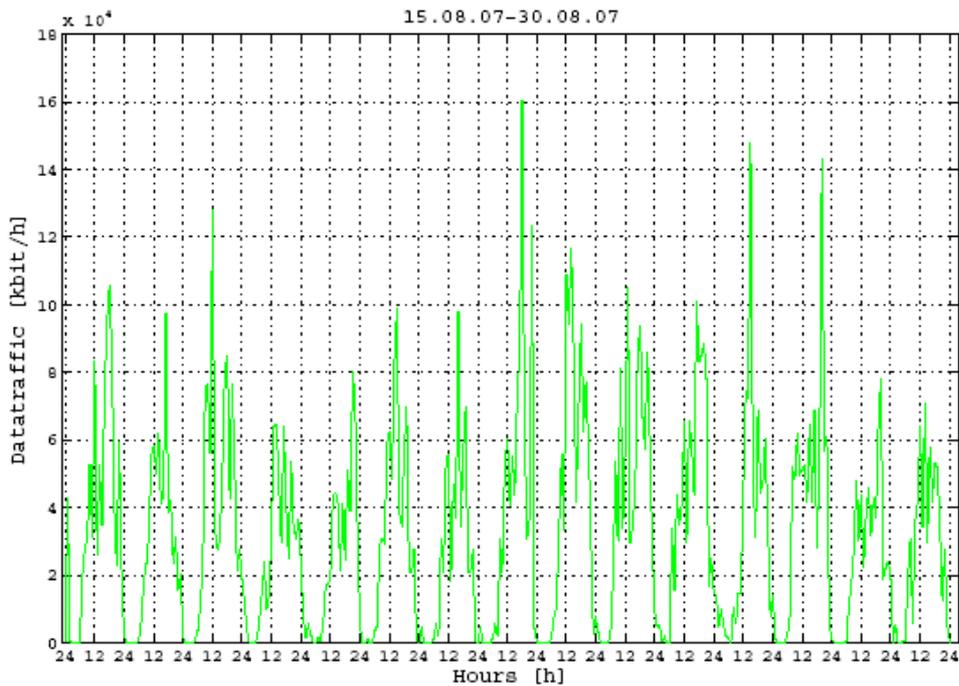


Abbildung 16: Netzauslastung Indooranlage 1 UMTS

Die Netzauslastung der GSM900 Basisstation scheint ähnlich zu sein wie bei der Outdooranlage. Aus der Abbildung lässt sich eine mittlere Netzauslastung von etwa 3 - 4 Erlang schätzen. Ausserdem befindet sich auch hier der Spitzenwert zwischen Mittag und Mitternacht wobei die minimale Netzauslastung wieder früh morgens ist.

Die Netzauslastung der GSM1800 Basisstation ist hier im Vergleich zur Outdooranlage ziemlich gering. Aus der Abbildung lässt sich eine mittlere Netzauslastung zwischen 1-2 Erlang schätzen. Im Vergleich zur Outdooranlage ist dies etwa die Hälfte. Dies ist ein möglicher Grund dafür dass der Leistungsbedarf dieser Basisstation während dieser Zeit praktisch konstant ist.

Auch die Netzauslastung der UMTS Basisstation zeigt einen Tages- Nachtrhythmus . Dieser erscheint aber beim Leistungsbedarf Abbildung 14 nicht. Weiter ist noch zu sagen, dass der Leistungsbedarf bei UMTS zwar konstant aber ziemlich hoch ist. Er liegt bis zum 25.August 2007 bei $\approx 910W$ wobei er in der Nacht vom 24. auf den 25.August 2007 sprunghaft auf über 920W klettert. Was hier genau der Grund war (z.B. Aufschalten eines zusätzlichen Dienstes, Erhöhung der effektiven Sendeleistung ERP, zwischenzeitlicher Ausfall eines Sektors u.s.w.) ist nicht bekannt.

Die folgende Tabelle zeigt die mittleren effektiven Sendeleistungen der drei Sektoren für alle drei Technologien in W sowie in dBm.

Technologie	ERP[W]	ERP[dBm]
GSM900	592.10	57.72
GSM1800	466.87	56.69
UMTS	441.57	56.45

Tabelle 5: Mittlere effektive Strahlungsleistung ERP pro Sektor Indooranlage 1

Die effektive Strahlungsleistung ERP pro Sektor für die GSM900 Basisstation ist in diesem Fall mehr als doppelt so gross wie bei der Outdooranlage. Dies könnte ein Grund für den grösseren Leistungsbedarf bei Leerlauf sein. Ausserdem sind die Sektoren hier etwas grösser als bei der Outdooranlage.

Indooranlage 2

Bei dieser Anlage wird auch wieder die Stromaufnahme der Basisstationen der Technologien GSM900, GSM1800 und UMTS untersucht. Speziell ist hier, dass die Basisstationen (BTS) von GSM900 und GSM1800 gemeinsam versorgt werden. Die Transceiver befinden sich also in einem Rack (siehe Kapitel 4). Diese Site ist bei der Sunrise bekannt für eine grosse Netzauslastung. Wie auch beim vorhergehenden Abschnitt soll zuerst der Leistungsbedarf und anschliessend die Netzauslastung dargestellt und kommentiert werden. Auf die mathematische Korrelationsbetrachtung soll auch hier verzichtet werden. Die folgende Abbildung zeigt den Leistungsbedarf für 7 Tage.

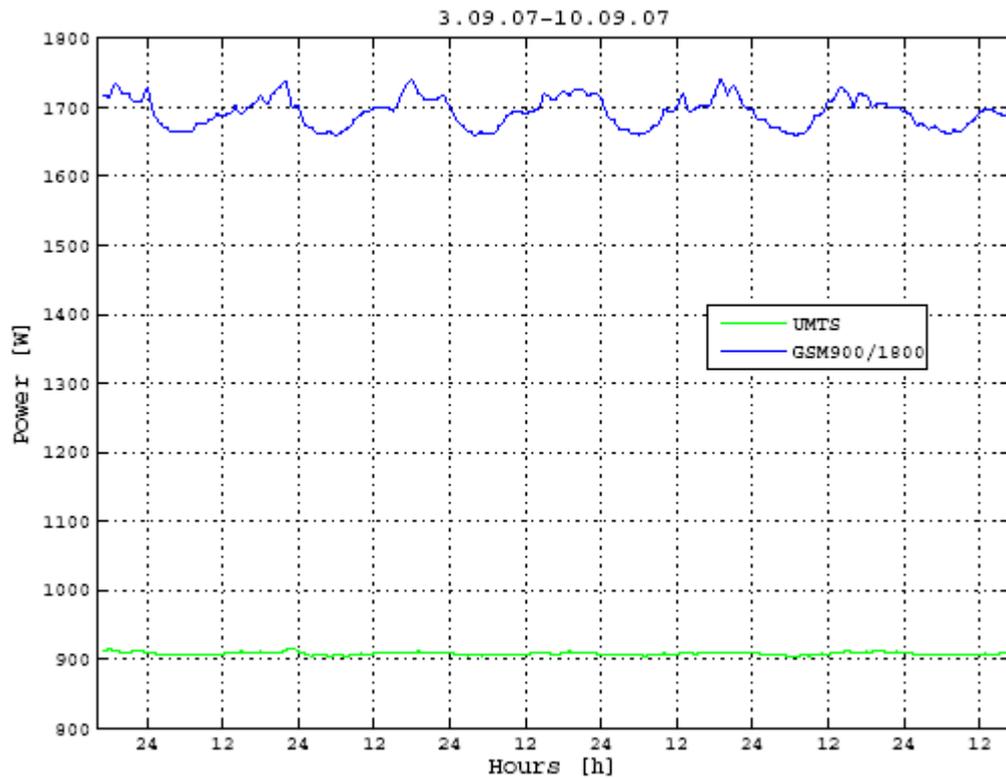


Abbildung 17: Leistungsbedarf Indooranlage 2 GSM900, GSM1800 und UMTS

Beim gemeinsamen Leistungsbedarf von GSM900 und GSM1800 ist wieder deutlich der Tages- und Nachtrhythmus zu erkennen. Ausserdem ist der mittlere Leistungsbedarf bei knapp 1700W was ziemlich hoch ist. Bei der UMTS Basisstation ist auch ein leichter Rhythmus zu erkennen. Die folgende Abbildung zeigt den Ausschnitt dieses Leistungsbedarfes der UMTS Basisstation stark vergrössert.

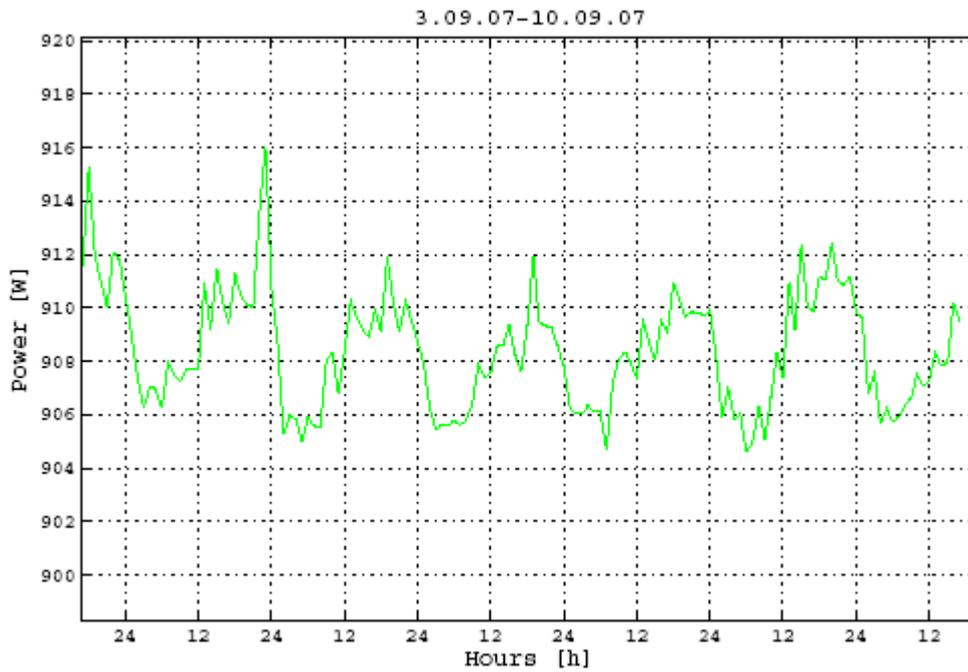


Abbildung 18: Leistungsbedarf Indooranlage 2 UMTS

Offensichtlich liegt hier auch bei der UMTS Basisstation ein Tages- Nachrhythmus vor. Die Leistungsänderung ΔP liegt jedoch bei nur $\approx 7W$. Die folgenden Abbildungen zeigen die Netzauslastung dieser Site.

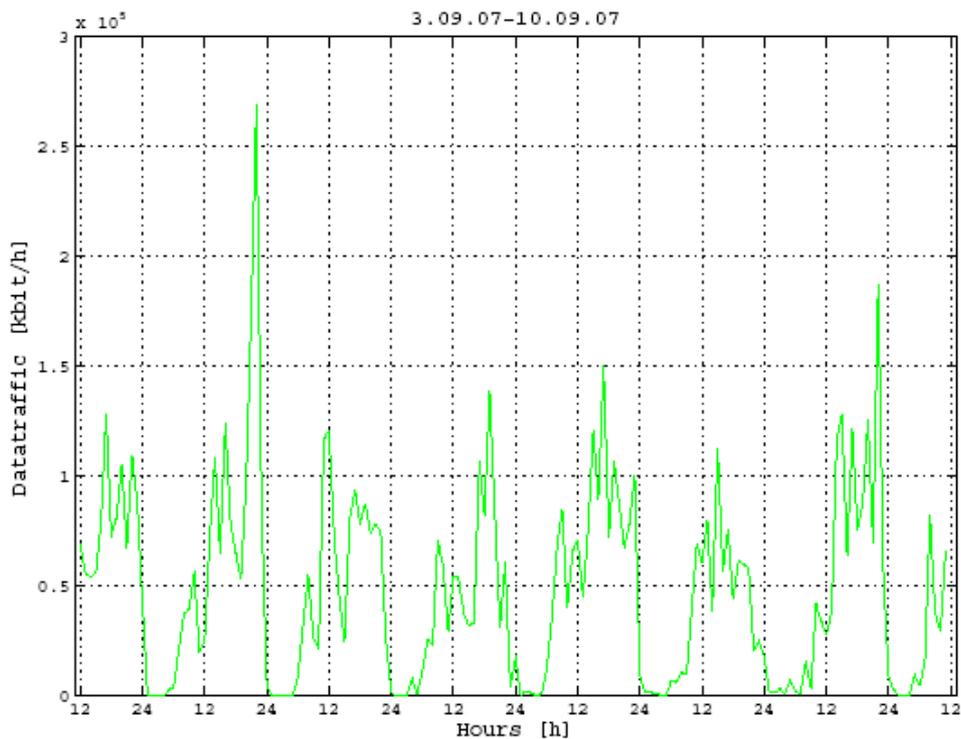


Abbildung 19: Netzauslastung UMTS Indooranlage 2 UMTS

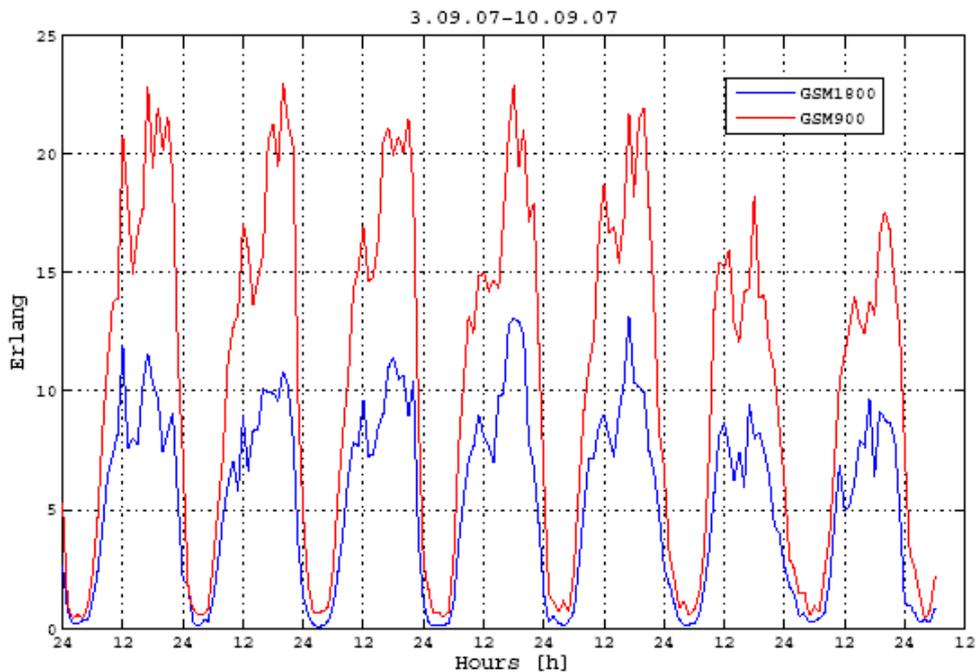


Abbildung 20: Netzauslastung GSM Indooranlage 2 UMTS

Auch bei diesen Abbildungen der Netzauslastung ist die unterschiedliche Auslastung am Tag bzw. während der Nacht deutlich sichtbar. Bei der UMTS Basisstation ist am 4. September 2007 gegen den späteren Abend eine Spitze zu beobachten. Auch beim Leistungsbedarf ist um diese Zeit eine Spitze zu erkennen. Ausserdem ist zu sehen, dass die mittlere Netzauslastung etwa doppelt so hoch ist wie bei der Indooranlage 1. Offensichtlich sind bei höherer Netzauslastung auch bei UMTS Leistungsbedarf und Netzauslastung korreliert.

Bei GSM ist die Netzauslastung im Vergleich zur Outdooranlage auch deutlich höher. Für GSM900 ist eine mittlere Netzauslastung von etwa 10 Erlang aus der Grafik zu entnehmen, wobei die mittlere Netzauslastung für GSM1800 bei etwa 5 Erlang liegt. Dies entspricht für GSM etwa drei mal mehr Datenverkehr im Vergleich zur Indooranlage 1.

Auch hier soll wieder eine Tabelle die mittleren effektiven Sendeleistungen ERP pro Sektor darstellen.

Technologie	ERP[W]	ERP[dBm]
GSM900	698.31	58.44
GSM1800	824.2	59.12
UMTS	441.57	56.45

Tabelle 6: Mittlere effektive Strahlungsleistung ERP pro Sektor Indooranlage 2

Die effektive Strahlungsleistung für GSM900 ist bei dieser Site nochmals etwa 100 W grösser im Vergleich zur Indooranlage 1 und somit fast drei mal grösser im Vergleich zur Outdooranlage. Bei GSM1800 ist dabei die effektive Strahlungsleistung im Vergleich zur Indooranlage 1 (467 W) fast doppelt so gross. Möglicherweise hat bei den GSM-Technologien die effektive Strahlungsleistung ERP einen grossen Einfluss auf den Leistungsbedarf bei Leerlauf (bei den untersuchten Anlagen waren die Antennen pro Band jeweils gleich, wiesen also den gleichen Antennengewinn auf). Bei der UMTS Basisstation ist die effektive Strahlungsleistung im Vergleich zur Indooranlage 1 etwa gleich. Dadurch resultiert auch ein ähnlicher Leistungsbedarf.

Zusammenfassung der Beobachtungen

Aus den ersten Messungen können folgende Beobachtungen gemacht werden:

Bei den GSM Technologien besteht zwischen der Netzauslastung und dem Leistungsbedarf eine mittlere Korrelation. Bei den untersuchten Anlagen waren die Schwankungen des Leistungsbedarfes jedoch nicht grösser als 50W, bezogen auf eine mittlere Leistung von $\approx 500 - 800$ W.

Bei UMTS scheint eine noch geringere Korrelation zwischen Netzauslastung und Leistungsbedarf zu bestehen. Die untersuchten Stationen zeigten eine Schwankung von 0 – 10 W. Wobei bei den untersuchten Anlagen die UMTS-Netzauslastung bei weitem nicht voll ausgeschöpft war.

Bei der selben effektiven Strahlungsleistung ist bei GSM1800 der Grundleistungsbedarf höher als bei GSM900. Jedoch ist der Grundleistungsbedarf einer UMTS Basisstation am höchsten.

Grundsätzlich gilt für eine Basisstation je höher die effektive Strahlungsleistung desto höher auch der Leistungsbedarf.

Bei zwei von den untersuchten Anlagen ist die mittlere Netzauslastung von GSM900 fast doppelt so gross wie bei GSM1800. Bei einer Anlage ist die mittlere Netzauslastung etwa gleich.

5.2. ZWEITE MESSPERIODE BTS UND RBS

Dieser Abschnitt befasst sich einerseits mit den Messdaten des Messzyklus über einen ganzen Monat, und andererseits sollen hier noch einige Analysen durchgeführt werden. Eine Zusammenfassung typischer Eigenschaften der Basisstation wird hier zum Schluss durchgeführt.

Bestätigung der ersten Messungen

Der zweite Messzyklus dauerte etwas mehr als einen Monat. Im Wesentlichen wurden durch diese Messungen die ersten Messresultate bestätigt. Als typisches Beispiel soll der Leistungsbedarf der Outdooranlage 1 betrachtet werden. Die folgende Abbildung zeigt den Leistungsbedarf der Outdooranlage 1 während eines Monats.

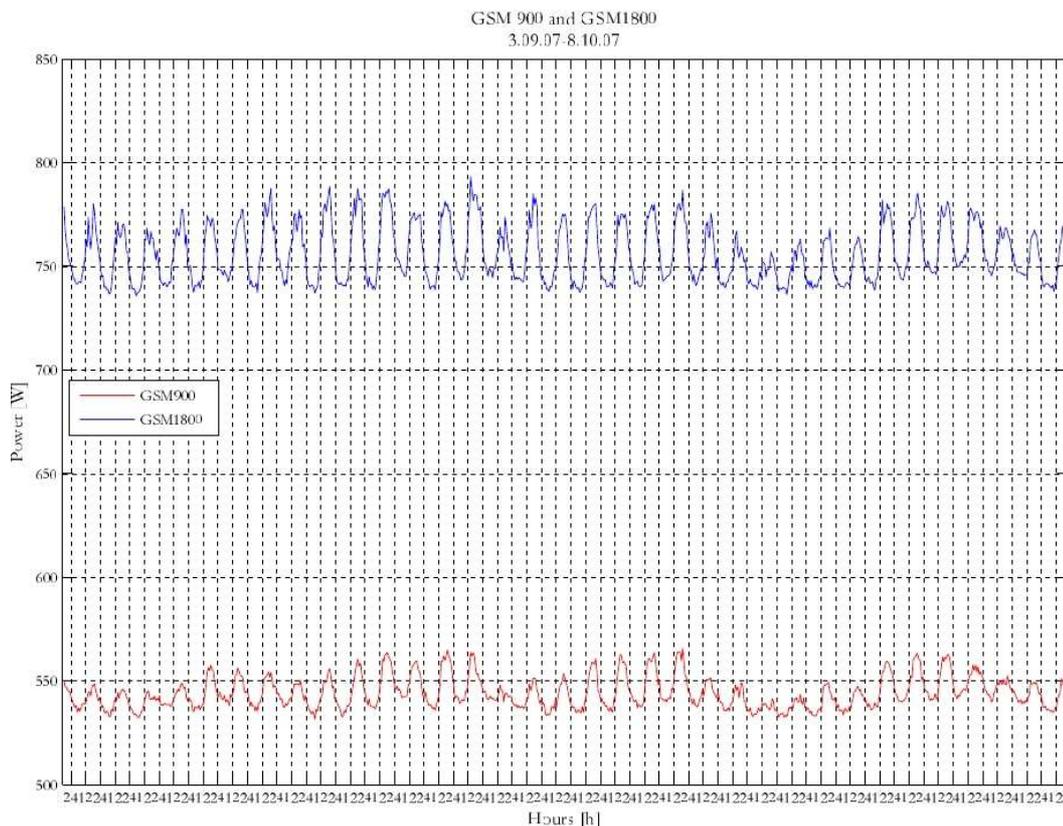


Abbildung 21: Leistungsbedarf Outdooranlage Messzyklus 2

Es ist zu erkennen, dass der Grundleistungsbedarf der GSM900 BTS weiterhin bei ungefähr 540 W ist bzw. der Grundleistungsbedarf der GSM1800 BTS bei 740 W. Auch die Tagesschwankungen sind unverändert. Auch die Netzauslastungen sind den Netzauslastungen aus der ersten Messperiode sehr ähnlich. Möglicherweise zeichnet sich beim Leistungsbedarf ein leichter Wochenrhythmus aus, der aber hier nicht weiter analysiert wird.

Gemittelter Verlauf des Tagesleistungsbedarfes

Hier wird der Tagesleistungsbedarf der Basisstationen untersucht und analysiert. Dafür wurde der Mittelwert jeder Stunde über einen ganzen Tag und die ganze Messperiode gebildet, um somit eine durchschnittliche Tageskurve zu erhalten. Die folgende Abbildung zeigt den Tagesleistungsbedarf von GSM900 der ausgemessenen Outdoorbasisstation.

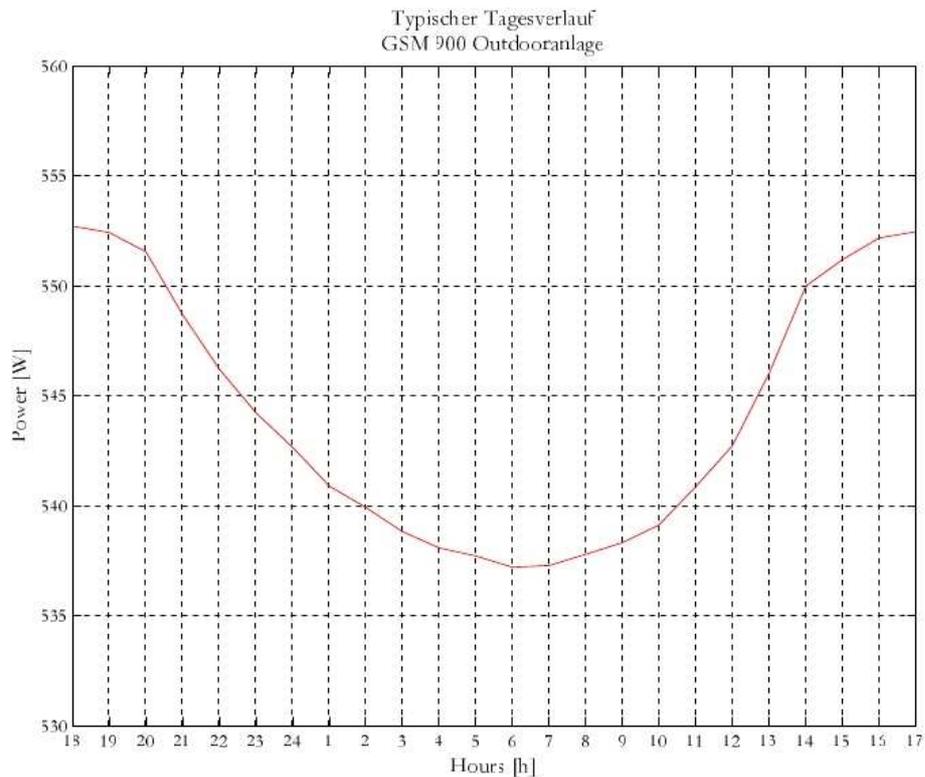


Abbildung 22: Durchschnittlicher Tagesleistungsbedarf GSM900 Outdooranlage

Die durchschnittliche Tagesschwankung liegt genau bei 15,5 W wobei deutlich zu erkennen ist, dass das Maximum um 18 h (552,7 W) und das Minimum (537,2 W) in den frühen Morgenstunden um 6 h erreicht wird. Im Vergleich dazu sei der durchschnittliche Tagesleistungsbedarf von GSM1800 der gleichen Basisstation in der folgenden Abbildung dargestellt.

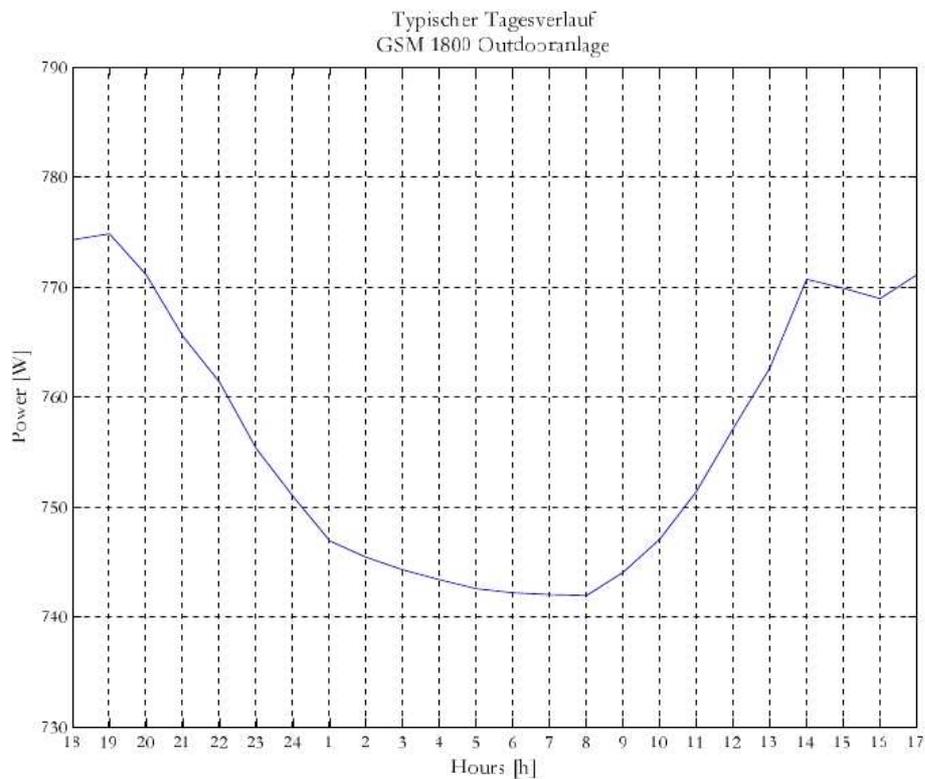


Abbildung 23: Durchschnittlicher Tagesleistungsbedarf GSM1800 Outdooranlage

Die durchschnittliche Tagesschwankung liegt hier genau bei 32,9 W. Also etwa das Doppelte wie bei GSM900. Die Netzauslastung ist dabei bei beiden Technologien gleich. Weiter lässt sich aus der Grafik erkennen, dass bei GSM1800 im Mittel das Maximum um 19 h (774,8 W) und das Minimum um 8h (741,9 W) erreicht wird. Ansonsten sind sich die Tagesverläufe des Leistungsbedarfes der beiden Technologien sehr ähnlich.

Auf eine Grafik, die den durchschnittlichen Tagesverlauf der verschiedenen Technologien der Indooranlage 1 zeigt, wird hier verzichtet, da die Netzauslastung und somit die Tagesschwankung des Leistungsbedarfes sehr gering ist. Der durchschnittliche Tagesleistungsbedarf der Indooranlage 2 soll jedoch aufgrund der hohen Netzauslastung dieser Anlage untersucht werden. Die folgende Abbildung zeigt den durchschnittlichen Tagesleistungsbedarf von GSM900 und GSM1800, die auf dieser Anlage in einem Rack untergebracht sind.

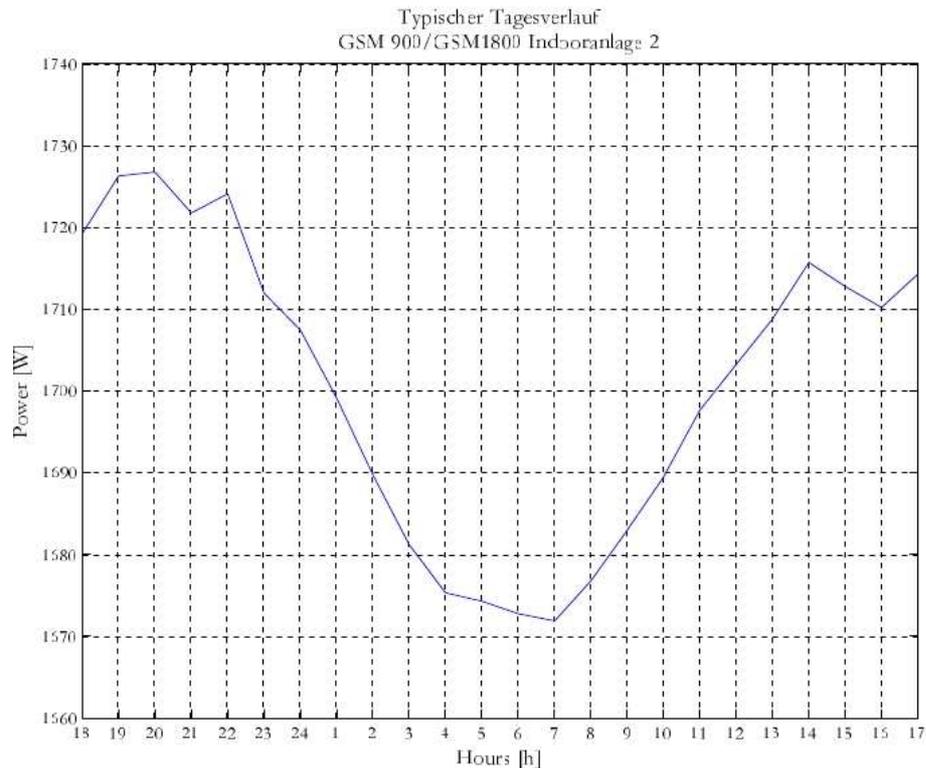


Abbildung 24: Durchschnittlicher Tagesleistungsbedarf GSM900+1800 Indooranlage 2

Die durchschnittliche Tagesschwankung liegt bei 55 W wobei das Maximum um 20 h (1727 W) und das Minimum (1672 W) um 7 h erreicht wird. Wie oben schon beschrieben, ist dank der grossen Netzauslastung bei dieser Station auch bei UMTS eine Tagesschwankung zu erkennen. Die folgende Abbildung zeigt die typische Tagesschwankung von UMTS der untersuchten Indoorstation 2.

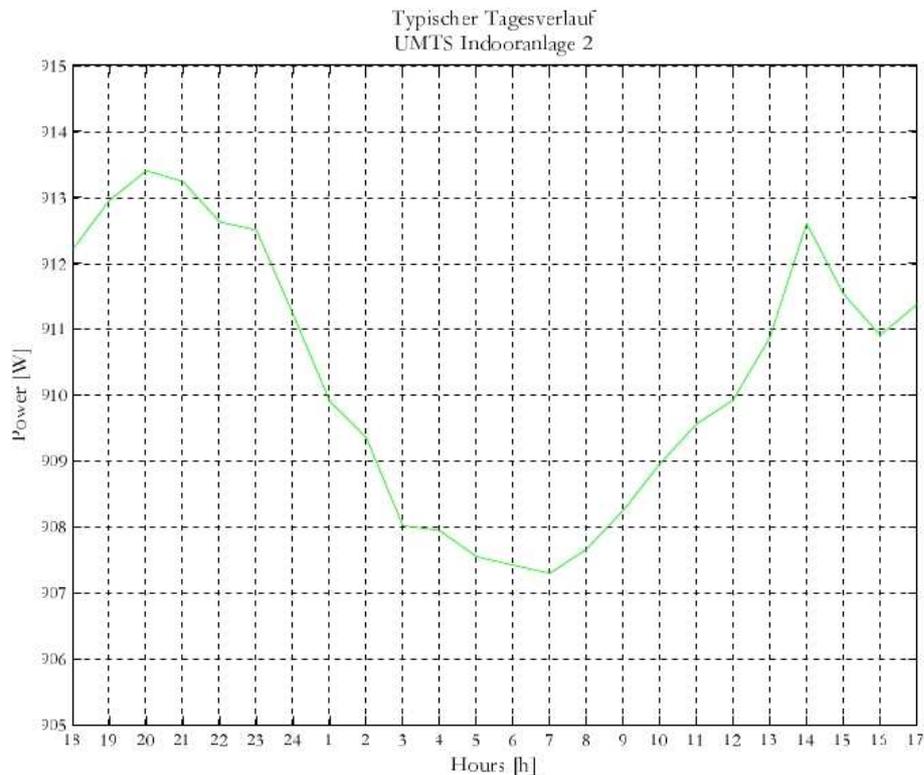


Abbildung 25: Durchschnittlicher Tagesleistungsbedarf UMTS Outdooranlage 2

Die durchschnittliche Tagesschwankung ist sehr gering (5,1W), aber doch deutlich zu erkennen, Gleich wie auch beim Tagesleistungsbedarf von GSM900+1800 befindet sich das Maximum bei 20 h (913,4 W) und das Minimum bei 7 h (907,3 W).

Merkmale der Basisstationen

Die folgende Tabelle fasst wichtige Erkenntnisse, und die gesammelten Daten der durchgeführten Messungen, zusammen.

Anl.	Techn.	Grundl.	#TRX/PA	\varnothing -P Δ	α [W/E]	ERP[W]	max.Sendel.	Ant.gew.
Outd.	GSM900	535W	6	15.5W	4.5	265	40 dBm	16.3 dBi
	GSM1800	740W	6	33W	9.5	330	40 dBm	17.5dBi
Ind.1	GSM900	735W	5	3W	0.9	600	44 dBm	16.3dBi
	GSM1800	770W	3	-	-	480	42 dBm	17.5dBi
	UMTS	920W	3	-	-	442	40.6 dBm	18dBi
Ind.2	900/1800	1670W	6/6	55W	-	700/825	46 dBm	16.3/17.5dBi
	UMTS	905W	3	5W	-	442	40.6 dBm	18dBi

Tabelle 7: Merkmale der untersuchten Anlagen

Die vierte Spalte #TRX/PA gibt die Anzahl Sendeempfänger für GSM (TRX) und für UMTS (PA) an. Es ist zu sehen, dass bei der Indooranlage 1 für GSM1800 nur 3 Sendeempfänger in Betrieb sind, der Grundleistungsbedarf aber trotzdem bei 770 W ist. Der Grund ist offensichtlich bei der grösseren Sendeleistung (ERP). Die fünfte Spalte \varnothing -P Δ zeigt die durchschnittliche Leistungsschwankung der

jeweiligen Stationen. Die sechste Spalte, die Spalte α [W/E] gibt das Verhältnis der durchschnittlichen Leistungsschwankung $\sigma \cdot P_{\Delta}$ in Watt zur durchschnittlichen Verkehrslast in Erlang an.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die ersten Beobachtungen (*Zusammenfassung der Beobachtungen*) bestätigt werden können. Ausserdem zeigt sich der Trend, dass bei einer grösseren Sendeleistung (dadurch meistens auch eine grössere Sektorfläche) der Leistungsbedarf der Basisstationen steigt. Dies zeigt sich hier jedoch nur bei den GSM-Technologien.

5.3. BESTIMMUNG DES LEISTUNGSBEDARFES WEITERER NETZELEMENTE

Um den Leistungsbedarf weiterer Netzelemente der GSM- bzw. UMTS-Netzarchitektur zu untersuchen, wurden gesonderte Messungen durchgeführt. Da aus den Messresultaten der Untersuchung der BTS bzw. NodeB hervorgeht, dass die Netzauslastung (Traffic) nur wenig Einfluss auf den Leistungsbedarf hat, wurde hier auf eine Untersuchung über mehrere Wochen verzichtet. Es wird also angenommen der Leistungsbedarf der Netzelemente sei etwa konstant, zumindest solange die Konfiguration nicht ändert. Im folgenden Abschnitt werden die Messresultate zu weiteren Netzelementen des Radionetworks (Geran und Utran) sowie zum Corenetwork präsentiert. Es handelt sich dabei um folgende Netzelemente (vgl. Kapitel 3):

	Netzelement	Bezeichnung/Erklärung
Geran:	DN2	Beschreibung in Analyse der Mobilfunknetzarchitektur
	BSC	Base Station Controller
Utran:	RXI	Beschreibung in Analyse der Mobilfunknetzarchitektur
	RNC	Radio Network Controller
	TRAU	Transcoding and Rate Adaption
Core:	MSC	Mobile Switching Center (neues Modell)
	HLR	Home Location Register
	MGW	Media Gateway
	SGSN	Serving GPRS Support Node
	GGSN	Gateway GPRS Support Node
	STP	Signaling Transfer Point
	VMS	Voice Message Server
	SMSC	Short Message Service Center

Tabelle 8: Übersichtstabelle der untersuchten Netzelemente

Geran

Es werden hier die Messresultate der beiden Netzelemente BSC, DN2 und TRAU, die zum Geran gehören, gezeigt. Es wurde ein älteres Modell einer BSC, die BSC311, und ein neueres Modell einer BSC, die BSC354, ausgemessen. Die folgende Tabelle zeigt die beiden BSC mit Leistungsbedarf und Konfiguration.

	# BTS	# TRX	# Real-TCHS	Power [W]
BSC 311:	90	377	2744	1315
BSC 354:	108	522	3818	1256

Tabelle 9: Leistungsbedarf und Konfiguration BSC

Aus dieser Tabelle ist zu erkennen, dass der Leistungsbedarf der neueren BSC (BSC354) trotz der grösseren Anzahl BTS kleiner ist. Die grössere Anzahl Sende-Empfangseinheiten (TRX) ergibt sich aus der grösseren Anzahl BTS. Daraus folgt auch die grössere Anzahl der Traffic-Channels TCHs.

Für die Untersuchung der DN2 sei die Konfiguration der DN2(CCx) in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

DN2	# BTS	Konfiguration	
		# Loop	# Chain
CC1:	8	8	-
CC2:	8	6	2
CC3:	13	1	12
CC4:	7	7	-
CC5:	8	8	-
CC6:	9	9	-
CC7:	9	9	-
CC8:	9	9	-
CC9:	9	9	-

Tabelle 10: Konfiguration DN2

Dabei werden mehrere DN2 von der gleichen Versorgung gespeist. Die folgende Tabelle zeigt die verschiedenen DN2s und ihren Leistungsbedarf.

CCx	Power[W]
1,2,3	225
5,6	148
7,8,9	219

Tabelle 11: Leistungsbedarf DN2

DN4 hängt mit anderen Geräten an einer Spannungsversorgung und erscheint deshalb nicht in der Tabelle. Somit ist der Leistungsbedarf einer einzelnen DN2 die etwa 10 BTS verwaltet $\approx 75W$.

Ausserdem gehört auch noch die TRAU zum Geran, obschon sie in der Praxis bei den Netzelementen des Corenetworks steht. Der Leistungsbedarf einer TRAU ist in folgender Tabelle aufgeführt.

	Power[W]
TRAU:	3696

Tabelle 12: Leistungsbedarf TRAU

Utran

Zum Utran gehören ausser den NodeBs, deren Leistungsbedarf oben behandelt wurde, auch noch die Netzelemente RXI und RNC. Es werden hier die Messresultate des Leistungsbedarfes dieser Netzelemente aufgeführt. Daten einer RXI820 werden in der folgenden Tabelle gezeigt. Die RXI ist hier für 69 UMTS-Basisstationen zuständig und ist zu einem Drittel ausgebaut.

	# NodeB	Power[W]
RXI 820:	69	27

Tabelle 13: Leistungsbedarf RXI

Bei einem vollen Ausbau und einer dreifachen Anzahl zu verwaltender NodeBs kann mit einem Leistungsbedarf von $\approx 90W$ gerechnet werden.

Bei der Untersuchung der RNC standen ein voll ausgebauter RNC (drei Subracks) und ein minimal ausgebauter RNC (ein Subrack) zur Verfügung. Schweizweit sind bei Sunrise zurzeit drei bis fünf dieser Netzelemente im Einsatz. Der Leistungsbedarf ist in der Tabelle dargestellt.

	# Subracks	Power[W]
RNC1:	1	413
RNC2:	3	1173

Tabelle 14: Leistungsbedarf RNC

Corenetwork

Bei den ausgemessenen Elementen des Corenetworks wird auf das Unterscheiden zwischen packet- und leitungsorientiert verzichtet. Die folgende Tabelle fasst die untersuchten Netzelemente mit ihrem Leistungsbedarf zusammen. Die Funktion dieser Elemente ist im Kapitel 3 beschrieben.

Netzelement	Power[W]
MSCi6	7495
HLR6	1813
HLR5i	5581
MGW	6330
GGSN	403
SGSN	2136
STP	1393
VMS	4750
SMSC	1828
SMSEvo	1451

Tabelle 15: Leistungsbedarf Elemente CN

Es wurden zwei HLRs ausgemessen. Das HLR5i ist dabei das neuere. Im Kapitel 3 werden VMS, SMSC und SMSEvo nicht erwähnt. Sie sind Bestandteile des VAS (value added services). Das VMS (voice message service) ist zuständig für alle Funktionen und Verwaltung der Combox. SMSC und SMSEvo sind SMS-Center, welche die Verwaltung der SMS übernehmen. Das SMSEvo ist dabei das neuere Element, welches das SMSC ersetzen wird.

Zusammenfassung

Als kleine Zusammenfassung der Messresultate, soll das folgende Diagramm betrachtet werden.

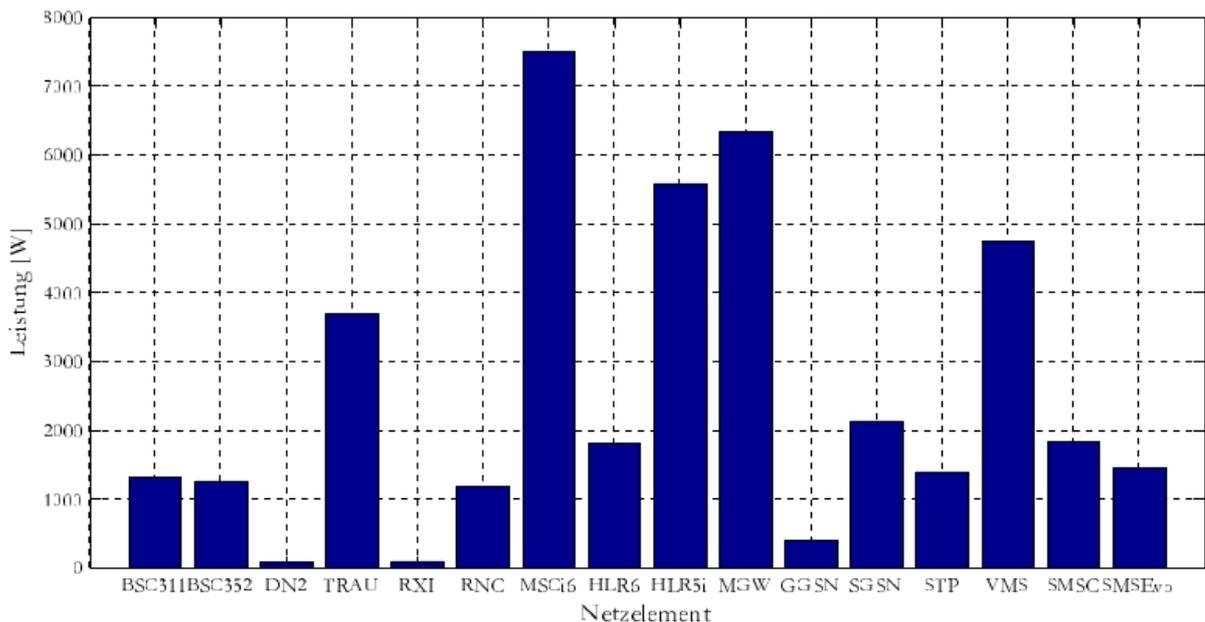


Abbildung 26: Leistungsbedarf pro Netzelement

Es ist zu erkennen, dass der Leistungsbedarf nur weniger Netzelemente grösser als 2 kW ist. Das Verhältnis der Anzahl dieser Netzelemente zur Anzahl Basisstationen ist zudem sehr klein. Der untersuchte Mobilfunkbetreiber soll z.B. schweizweit nur noch vier MSCs unterhalten. In dieser

Größenordnung sollte auch die Anzahl der MGWs liegen. Somit sollte versucht werden, bei den BTS und bei der Planung der Zellen auf den Energieverbrauch zu achten.

5.4. LEISTUNGSBEDARF EINER INDOOR-KLIMAAANLAGE

Schon bei der Erstellung des Projektantrags wurde angenommen, dass die Klimatisierung der einzelnen Stationen einen nicht zu vernachlässigbaren Anteil des Gesamtenergiebedarfes eines Mobilfunknetzes ausmachen würde. Ausserdem wurde von Mitarbeitern des untersuchten Mobilfunkbetreibers das grösste Einsparpotenzial bei der Erhöhung der Temperatur in den einzelnen Stationen vermutet. Das folgende Kapitel befasst sich mit den durchgeführten Leistungsmessungen einer Klimaanlage. Mit Hilfe der Messresultate wird anschliessend eine grobe Hochrechnung gemacht, welche die möglichen Ersparnisse bezüglich Energie und Kosten darstellt.

Übersicht

Um die Funktionsfähigkeit elektronischer Komponenten von Netzelementen eines Mobilfunknetzes nicht einzuschränken, müssen Stationen (Räume in denen Netzelemente stehen) klimatisiert werden. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden die Stationen auf eine Temperatur $T_0=24^{\circ}\text{C}$ gekühlt. Die Netzelemente besitzen eine so grosse Verlustleistung, dass auch im Winter die Räume gekühlt werden müssen. Die Station, die untersucht wurde, enthält folgende Netzelemente:

- BTS GSM 900
- BTS GSM 1800
- NodeB/RBS UMTS
- Netzteil und USV (BBU)

Der Innenraum der Station hat etwa die Dimensionen $2m \cdot 2,5m \cdot 2,2m$. Die folgende Tabelle fasst kurz die wichtigsten Merkmale der Klimaanlage zusammen, die in dieser Station verwendet wird um die Temperatur etwa konstant zu halten.

Klimaanlage - Merkmale	
Hersteller	Airwell
Bezeichnung	California SX24N/GC24N
Kühlleistung	6830 W
Leistungsaufnahme	2270 W
Betriebsspannung	400 VAC 50Hz 3Ph

Table 16: Daten der Klimaanlage

Diese Daten wurden der technischen Beschreibung des Herstellers der Klimaanlage entnommen. Da es sich um eine Dreiphasen-Klimaanlage handelt wurde sowohl die Spannung wie auch der Strom mit dem Poweranalyzer Fluke 434 aufgenommen. Es wurden insgesamt drei Messungen durchgeführt. Die erste Messung erstreckt sich über einen Zeitraum von 450h, also etwas mehr als 18 Tage, und stellt den Gesamtenergieverbrauch der Station dar. Die zweite und die dritte Messung konzentrieren sich auf die Leistungsaufnahme der Klimaanlage während 150h also etwa 6 Tage bei einer eingestellten Temperatur von 24°C bzw. 28°C .

Messung der Gesamtleistung der Station

Um den Einfluss der Klimaanlage auf den Gesamtleistungsbedarf der Station festzustellen, wurde eine Messung über 18 Tage durchgeführt. Die folgende Figur zeigt das Resultat dieser Messung.

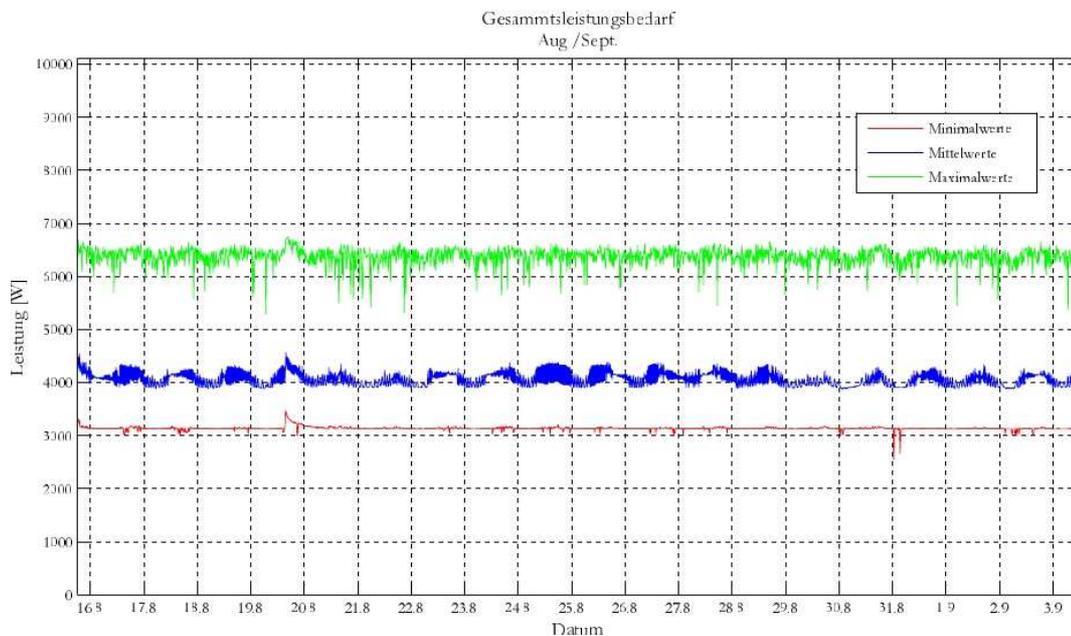


Abbildung 27: Verlauf des Gesamtleistungsbedarfes der Station

Um die Abbildung leichter zu verstehen, ist es hilfreich zu wissen, wie der Poweranalyzer Fluke 434 eingestellt wurde. Das Messgerät wurde so eingestellt, dass es jeweils während 15 Minuten den Mittelwert bestimmt sowie die auftretenden Minimal- und Maximalwerte registriert. Es wurden somit während ungefähr 18 Tagen alle 15 Minuten drei Werte gespeichert.

Die blaue Kurve zeigt die Mittelwerte. Auch hier ist wieder deutlich die Tagesschwankung im Leistungsbedarf zu erkennen, welche durch die unterschiedliche Netzauslastung verursacht wird. Der Mittelwert des Gesamtleistungsbedarfes der Station über die 18 Tage berechnet sich zu:

$$\bar{P}_{\text{Tot18d}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i = 4061,1 \text{ W}$$

Die rote Kurve zeigt die Minimalwerte, die jeweils während den 15 Minuten aufgetreten sind. Höchstwahrscheinlich treten diese auf wenn die Klimaanlage gerade nicht kühlen muss. Die Ventilatoren der Klimaanlage sind jedoch immer in Betrieb und werden nicht ausgeschaltet. Die Minimalwerte lassen sich aus der Grafik schätzen und liegen etwa bei 3150 W.

Die grüne Kurve stellt die Maximalwerte dar. Diese treten einerseits auf wenn die Anlage am Kühlen ist und andererseits wenn der Kühlvorgang gestartet wird. Der hohe Anlaufstrom der Klimaanlage verursacht kurzzeitig eine sehr hohe Leistungsaufnahme. Die Maximalwerte lassen sich aus der Grafik schätzen und liegen etwa bei 6400 W.

Messwerte Klimaanlage

Aus der Messung der Gesamtleistung und den Messungen des Leistungsbedarfes der einzelnen Netzelemente dieser Station (siehe Kapitel 5.1) könnte der Leistungsbedarf der Klimaanlage eigentlich schon bestimmt werden. Um doch genauere Resultate zu erhalten und vor allem die Differenz der Leistungsaufnahme bei verschiedenen Temperaturen zu erkunden, wurde zweimal während etwa 6 Tagen der Leistungsbedarf untersucht. In einem ersten Zyklus wurde eine Temperatur von 24°C eingestellt und in einem zweiten Zyklus die Temperatur 28°C. Die folgende Figur zeigt das Resultat beider Messungen.

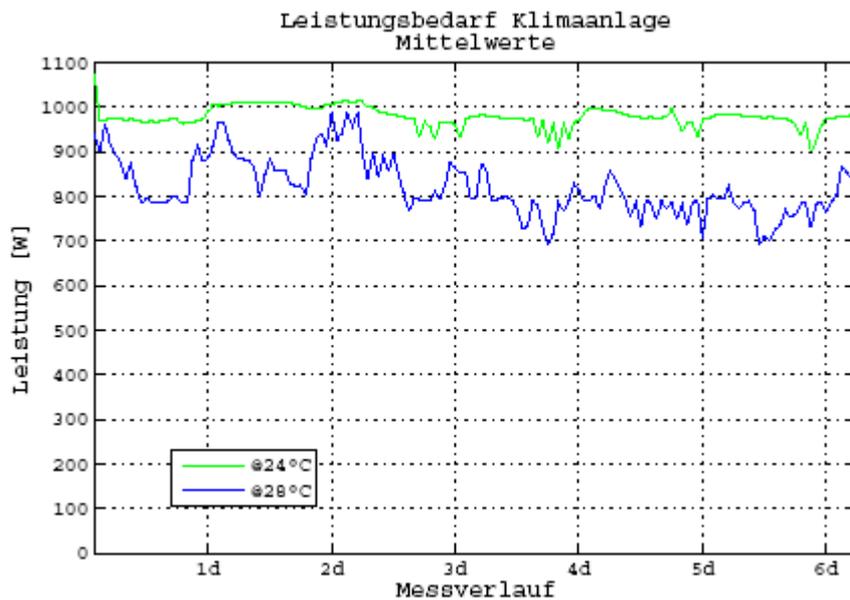


Abbildung 28: Verlauf des Leistungsbedarfes der Klimaanlage

Die folgende Figur stellt den Temperaturverlauf dar. Es ist zu erkennen, dass es Mitte Monat einen kleinen Temperatureinbruch gab. Wie sehr dies die Messung des Leistungsbedarfes @28°C beeinflusst hatte, müsste bei weiteren Messungen noch genauer untersucht werden.

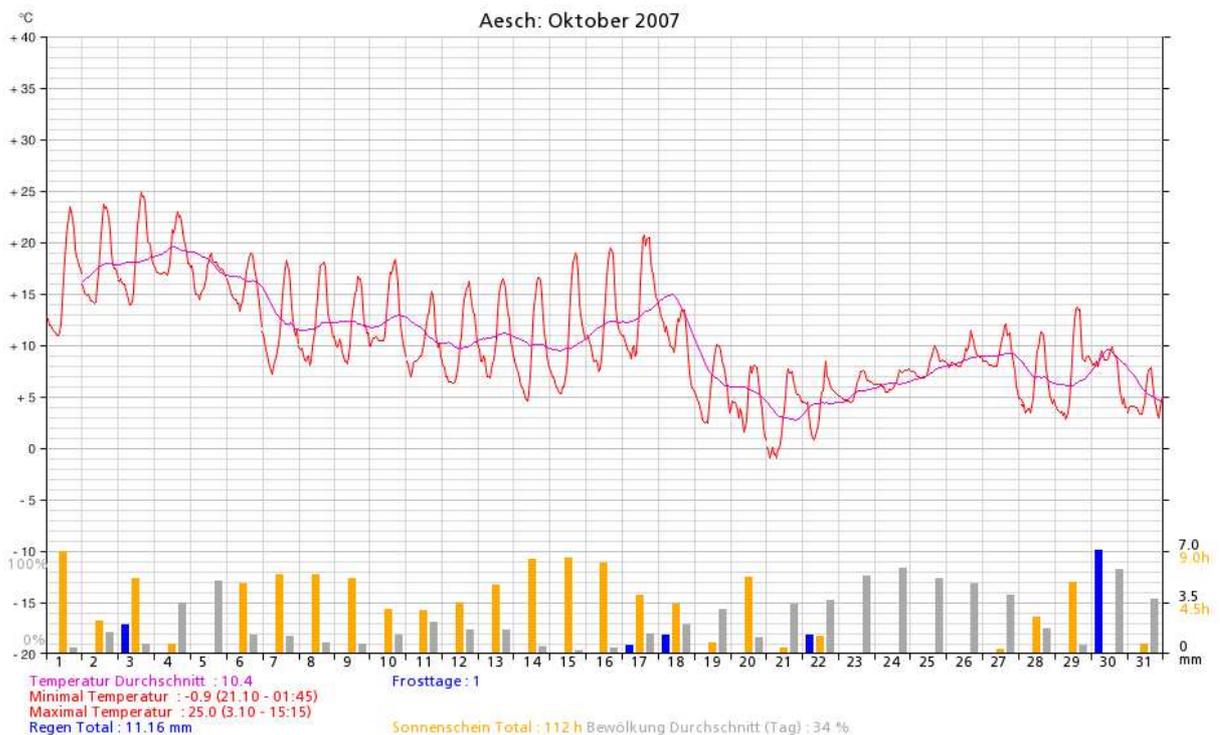


Abbildung 29: Temperaturverlauf Oktober 07 Aesch (Quelle: www.dreer.ch)

Die Einstellungen des Messgerätes sind hier ähnlich wie bei der Bestimmung des Gesamtleistungsbedarfes der Station. Der Unterschied ist, dass das Messgerät bei dieser Messung jeweils während 5 Minuten den Mittelwert bestimmt und die aufgetretenen Minimal- und Maximalwerte registriert. Um die Grafik anschaulicher zu machen, wurden jeweils die Messwerte über eine Stunde gemittelt. Es ist hier ausserdem zu beachten, dass die Messungen zu unterschiedlichen Zeiten durchgeführt wurden. Es lässt sich somit aus der Abbildung zum Leistungsverlauf der Klimaanlage nicht auf die jeweilige Tageszeit schliessen. Die folgende Tabelle zeigt die genauen Zeiten der Messungen.

	Startdatum	Uhrzeit
Messung @ 24°C:	8.10.07	11:38
Messung @ 28°C:	15.10.07	14:20

Table 17: Zeitangaben der Klimamessungen

Es ist schon aus der Grafik deutlich zu erkennen, dass der Leistungsbedarf der Klimaanlage bei einer Temperaturdifferenz $\Delta T = 4^\circ\text{C}$ im Mittel $\approx 150\text{W}$ kleiner ist. Bei genauer Bestimmung des Mittelwertes ergibt sich bei der Messung mit einer eingestellten Temperatur $T_0 = 24^\circ\text{C}$ eine mittlere Leistung von

$$\bar{P}_{T_0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i = 1070.8 \text{ W}$$

und mit einer eingestellten Temperatur $T_1 = 28^\circ\text{C}$ eine mittlere Leistung von

$$\bar{P}_{T_1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i = 894.7 \text{ W}$$

Offensichtlich ist bei beiden Messungen der mittlere Leistungsbedarf deutlich unter der vom Hersteller angegebenen Leistungsaufnahme von 2270 W. Der Anteil der Klimaanlage am Gesamtleistungsbedarf einer Station ist somit bei einer eingestellten Temperatur $T_0 = 24^\circ\text{C}$

$$A_0 = \frac{\bar{P}_{T_0}}{\bar{P}_{\text{Tot18d}}} \approx 26\%$$

und mit einer eingestellten Temperatur $T_1 = 28^\circ\text{C}$

$$A_1 = \frac{\bar{P}_{T_1}}{\bar{P}_{\text{Tot18d}}} \approx 22\%$$

Grobe Energiebetrachtung

Aus den erhobenen Messdaten lassen sich nun auch Energieberechnungen durchführen. Einerseits soll der unterschiedliche Energiebedarf während den sechs Tagen dargestellt werden. Andererseits wird eine grobe Hochrechnung auf ein ganzes Jahr durchgeführt, welche die eingesparte Energie und die eingesparten Kosten aufzeigt. Der unterschiedliche Energieverbrauch der Klimaanlage wird in der folgenden Abbildung dargestellt.

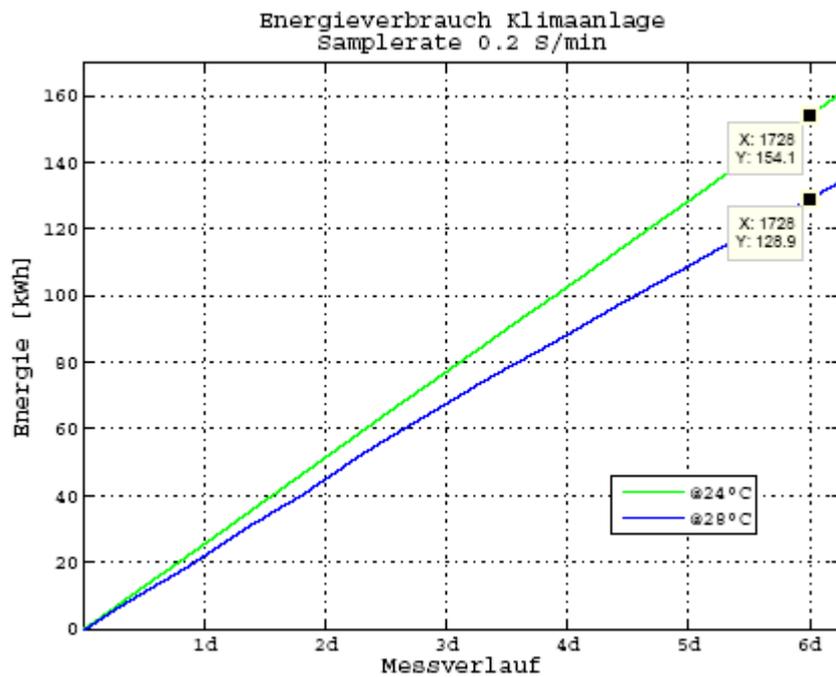


Abbildung 30: Energiebedarf der Klimaanlage in 6 Tagen

Aus der Grafik ist zu erkennen, dass der Energieverbrauch der untersuchten Klimaanlage in etwa linear ansteigt. Somit ist es für eine grobe Hochrechnungen zulässig, die Kurve zu linearisieren. Die folgende Tabelle fasst die wichtigsten Energiedaten zusammen.

Energieverbrauch [kWh]		
Zeitspanne	@ 24°C	@ 28°C
6 Tage	154.1	128.9
1 Jahr	9374	7841
1 Tag	25.7	21.5

Tabelle 18: Energieverbrauch der Klimaanlage in kWh

Die Werte der zweiten Zeile sind direkt aus der Grafik entnommen, wobei die Werte der dritten und der vierten Zeile berechnet wurden. Aus der dritten Zeile lässt sich somit folgende Energiedifferenz E_{Δ} berechnen:

$$E_{\Delta} = E_{T1} - E_{T0} = 9374 \text{ kWh} - 7841 \text{ kWh} = 1533 \text{ kWh}$$

Dies stellt zugleich die eingesparte Energie pro Jahr dar. Wird mit einem durchschnittlichen, geschätzten Energiepreis von $K_{\phi} = 0.14 \frac{\text{SFr.}}{\text{kWh}}$ gerechnet²⁴ so ergibt sich ein Kosteneinsparpotential von

²⁴ Der durchschnittliche Energiepreis für einen Betrieb der Kategorie C5 500000 (500'000 kWh/a) beträgt in der Schweiz ca. 14 Rp./kWh.
Quelle: <http://strompreise.preisueberwacher.ch/web/index.asp?z=5&codekategorie=C5%20500000> .

$$E_{\Delta} \cdot K_{\phi} = 1533 \text{ kWh} \cdot 0.14 \frac{\text{SFr.}}{\text{kWh}} = 214.62 \text{ SFr.}$$

Somit liesse sich pro eingesetzte Klimaanlage und pro Jahr etwa SFr. 215 einsparen. Eine Hochrechnung für das gesamte Mobilfunknetz der Schweiz folgt in Kapitel 9.

Fazit

Es soll hier noch einmal festgehalten werden, dass diese Resultate nur einen ungefähren Anhaltspunkt geben sollen. Für eine genauere Untersuchung müssten die Aussentemperaturen, die Isolation der Station, die Anzahl Stunden direkter Sonnenbestrahlung u.s.w. mitberücksichtigt werden. Die grobe Schätzung für das Einsparpotential pro Jahr und pro Indooranlage soll in der folgenden Tabelle noch einmal zusammengefasst werden.

Einsparpotential pro Jahr	
Energiekosten	Energie
214.60 SFr.	1533 kWh

Tabelle 19: Mögliches Einsparpotential einer Klimaanlage pro Jahr

Bei einer Erhöhung der Temperatur der Klimaanlage sind die Faktoren zu berücksichtigen welche Einflüsse auf den Betrieb der Station haben könnten. Es sind dies z.B. eine verkürzte Lebensdauer der Komponenten, eine höhere Ausfallrate, u.s.w.

Ausserdem könnte die Dimensionierung der Klimaanlagen künftiger Stationen überdacht werden. Es könnte zum Beispiel geprüft werden, ob die Kühlleistung dieser Klimaanlagen von knapp 7 kW in jedem Fall wirklich notwendig ist.

6. ENERGIEVERBRAUCH INFRASTRUKTUR

Basierend auf den durchgeführten Messungen, den daraus gewonnenen Erkenntnissen, und einer Hochrechnung der Firma Sunrise über die Anzahl Netzelemente in der Schweiz, wird im folgenden Abschnitt eine Hochrechnung des Energieverbrauchs der Infrastruktur der Mobilfunkunternehmen in der Schweiz durchgeführt.

Die folgende Tabelle zeigt die wichtigsten Netzelemente eines Mobilfunknetzes, ihre geschätzte Anzahl (alle Netzbetreiber in der gesamten Schweiz), den Leistungsbedarf pro Einheit sowie das errechnete Total des Leistungsbedarfes.

Netzelement	Anzahl	Leistung/Einheit	Leistung Gesamt	Bemerkungen
BTS (GSM900+1800)	11000	800 W	8800 kW	-
RBS / NodeB	4500	900 W	4050 kW	-
DN2	1100	75 W	82.5 kW	10 BTS pro DN2
RXI	40	60 W	2.4 kW	Zu 2/3 ausgebauter RXI
BSC	100	1300 W	130 kW	-
RNC	15	1200 W	18 kW	Vollausbau (3 Sub-racks)
TRAU	15	3700 W	55.5 kW	-
MSC	15	7500 W	112.5 kW	MSCi6 (neuere Version)
MGW	15	6300 W	94.5 kW	-
HLR	20	5500 W	110 kW	HLR5i (neuere Version)
SGSN	10	2000 W	20 kW	-
GGSN	8	400 W	3.2 kW	-
STP	10	1400 W	14 kW	-
VMS	10	5000 W	50 kW	-
SMSC	15	1600 W	24 kW	-

Tabelle 20: Anzahl und Leistungsbedarf Netzelemente

Der totale Leistungsbedarf der Infrastruktur der Mobilfunknetze der Schweiz, wie auch der Energieverbrauch pro Jahr, fasst die folgende Tabelle zusammen. Wie schon oben erwähnt, handelt es sich um eine Schätzung, die Werte sind deshalb grosszügig gerundet.

Mittlerer Leistungsbedarf	Energieverbrauch pro Jahr
13500 kW	118.26 GWh

Tabelle 21: Leistungsbedarf und Energieverbrauch Infrastruktur

Es ist zu beachten, dass diese Tabelle nur den Energieverbrauch der Netzelemente zeigt. Wird die Klimatisierung der Indooranlagen miteinberechnet, ändern sich diese Werte. Es wurden 9350 Standorte geschätzt, wobei diese entweder Netzelemente aller drei Technologien enthalten, GSM900 *only* oder GSM1800 *only* sind. Weiter kommen noch etwa 1350 Standorte die nur RBS/NodeBs enthalten (UMTS *only*) hinzu. Von all diesen Standorten sind etwa 50% Indooranlagen und etwa 50% Outdooranlagen. Es müssten somit ungefähr 5350 Klimaanlage für Indooranlagen in Betrieb sein.

Wird mit einem durchschnittlichen Leistungsbedarf von etwa 900 W pro Klimaanlage gerechnet, ergibt sich der folgende neue Leistungsbedarf und Energieverbrauch:

	Mittlerer Leistungsbedarf	Energieverbrauch pro Jahr
Netzelemente:	13500 kW	118.26 GWh
Klimaanlagen:	4815 kW	42.18 GWh
Total:	18315 kW	160.44 GWh

Tabelle 22: Leistungsbedarf und Energieverbrauch Netzelemente und Indoorklimaanlagen

Der Anteil am Gesamtelektrizitätsverbrauch der Indoorklimaanlagen ist offensichtlich markant. Er beträgt schon hier etwa 25% wobei die Klimatisierung, Durchlüftung von Outdooranlagen noch gar nicht berücksichtigt wurde.

Fazit

Vor allem aus der Tabelle 22 ist deutlich zu erkennen, dass der grösste Anteil des Energieverbrauchs bzw. Leistungsbedarfes bei den Basisstationen d.h. bei den RBS/NodeBs und den BTS liegt. Es kann grob gesagt werden, dass die Basisstationen 70% des Energieverbrauchs der Infrastruktur im schweizerischen Mobilfunknetz ausmachen. Weitere 26% gehen dabei auf die Klimatisierung der Indooranlagen.

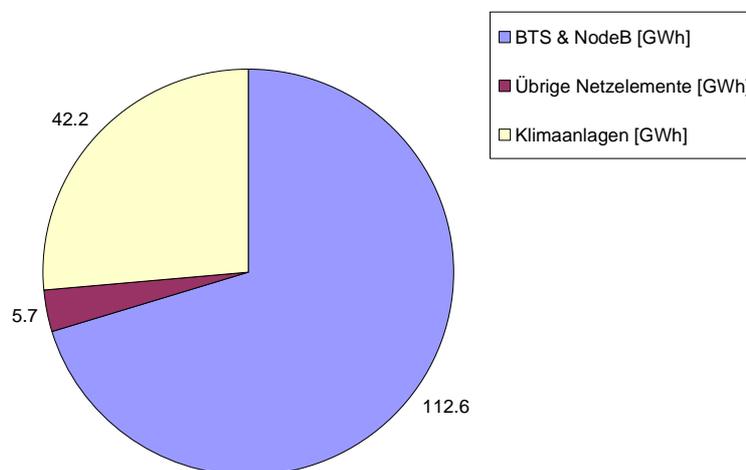


Abbildung 31: Energieverbrauch Infrastruktur

Somit zeigt sich deutlich, dass im Hinblick auf eine energieeffiziente Infrastruktur besonders auf die Basisstationen bzw. die Anzahl derer und die Klimatisierung geachtet werden muss.

7. MÖGLICHE ZUKÜNFTIGE SZENARIEN UND DEREN ENERGETISCHE AUSWIRKUNGEN

7.1. UMTS900

Der IMT-2000/UMTS Dienst wurde im Jahr 2001 im 2 GHz-Band (1920-1980 MHz/2110-2170 MHz) gestartet. Fünf Jahre später gab es weltweit mehr als 75 Millionen Abonnenten und mehr als 110 UMTS-Netze.

Die Europäische Konferenz der Verwaltung für Post und Telekommunikation (CEPT) hat mit einem Beschluss vom 1. Januar 2007, den Weg für UMTS900 in den europäischen Mitgliedsländern freigemacht. Diese Technologie erlaubt es, UMTS auch für das bisher für GSM reservierte Frequenzband von 900 MHz zu nutzen. In der Schweiz hat die Eidgenössische Kommunikationskommission (ComCom) im März 2007²⁵ die GSM-Konzessionen von Orange, Sunrise und Swisscom Mobile erneuert. Die Ende Mai 2008 ablaufenden Lizenzen sind nun bis 2013 gültig. Die neuen Konzessionen ermöglichen den Betrieb von UMTS in einem Frequenzbereich, der bisher ausschliesslich für die GSM-Technologie vorgesehen war. Damit alle drei Unternehmen im frequenztechnisch interessanten 900MHz-Bereich auch UMTS betreiben können (UMTS900), hat die ComCom die zugeteilten Frequenzen angepasst.

Die Erneuerung der Konzessionen soll eine schnelle Migration zu UMTS ermöglichen. Dazu Marc Furrer, Präsident der ComCom: „Die fortschrittliche UMTS-Technologie wird mittelfristig das ‚alte‘ GSM ersetzen.“ Eine Begründung findet sich in der Pressemitteilung:

Warum wird GSM längerfristig durch UMTS abgelöst?

Die GSM-Technologie wird bereits seit rund 16 Jahre genutzt und dürfte mittelfristig kaum mehr weiter entwickelt werden. UMTS ermöglicht als moderne, zukunftsorientierte Technologie neben der Telefonie eine viel höhere Übertragungsgeschwindigkeit. Sie zeichnet sich dabei nicht nur durch eine bessere Ausnützung der Funkfrequenzen aus, sondern die Sender arbeiten durchschnittlich auch mit kleineren Sendeleistungen als GSM. Schliesslich ist der Unterhalt nur eines modernen Netzes auch wirtschaftlicher. Wie lange die Übergangsperiode von GSM zu UMTS jedoch dauern wird, ist heute noch offen. Mit Sicherheit wird dies mehrere Jahre in Anspruch nehmen.

UMTS900 hat für die Netzbetreiber vor allem den Vorteil, dass die Signale im 900 MHz-Bereich wesentlich besser übermittelt werden als über das sonst übliche UMTS-Netz und das ist gerade in ländlichen Regionen von Vorteil. So ist die Freiraumdämpfung bei 900 MHz um etwa 7 dB geringer als bei 2.1 GHz, woraus theoretisch eine um den Faktor vier verbesserte Reichweite resultiert. Vor allem in ländlichen Gebieten werden dadurch Basisstationen eingespart, wodurch der Aufbau der Infrastruktur erheblich kostengünstiger wird. UMTS900 ermöglicht zudem eine bessere Versorgung innerhalb von Gebäuden. Dies ist insbesondere interessant, wenn man die steigende Nutzung von Mobilfunkgeräten als Ergänzung oder gar Ersetzung von Festnetzdiensten betrachtet.

Allerdings ist die Zuweisung freier Frequenzen problematisch, da der Bereich um 900 MHz zur Zeit noch zum grössten Teil durch GSM-Technologie belegt ist. In städtischen Agglomerationen ist der Reichweitenvorteil von UMTS900 nicht von Bedeutung, da dort die Zellengrösse weitgehend durch das Verkehrsaufkommen bestimmt wird.

Die Einführung von UMTS900 dürfte einen deutlichen Einfluss auf die Topologie der Netze, insbesondere die Zellgrösse und damit die Anzahl Zellen haben. Gemäss eines Berichts des UMTS

²⁵ Medienmitteilung der Eidgenössischen Kommunikationskommission (ComCom) vom 22.03.2007.

Forums²⁶ reduziert sich die für eine gegebene Datenraten und örtliche Abdeckung notwendige Anzahl an Standorte um 60%.

Dienst	2 GHz-Band	900 MHz-Band	Reduktion der Anzahl Standorte
Leitungsvermittelt, 64 kbit/s	224	90	60%
Paketvermittelt, 384 kbit/s	468	181	61%

Tabelle 23: Die Anzahl benötigter Standorte (UMTS Forum Report #38)

Der Wechsel auf UMTS900 lässt sich vergleichsweise einfach durchführen, da bestehende Standorte für GSM900 sowie (wenigstens teilweise) deren Antennensysteme und –zuführungen genutzt werden können.

7.2. 3G FUNKZELLEN FÜR INDOOR BASISSTATIONEN (FEMTO-ZELLEN)

Eine neue Technologie, die den Markt für Telekommunikation nachhaltig verändern könnte, sind die sogenannten Femto-Zellen. Kerngedanke dieser Lösung ist es, dass ein Haushalt mit einem eigenen, GSM- und UMTS-fähigen Zugangsknoten ausgerüstet wird und so über seine eigene Basisstation (home base station – HBS) verfügt. Diese wird über DSL oder ein Cablemodem an das IP-Netz angeschlossen, kann aber auch mit dem bestehenden Festnetz verbunden werden. Sobald sich der Teilnehmer in Reichweite der HBS befindet, wird das Mobiltelefon automatisch damit verbunden. In einem Umkreis von etwa 30 Metern kann folglich über die eigene GSM/UMTS-Basisstation telefoniert werden.

Mit der Femto Cell-Lösung können Netzbetreiber für alle Mitgliedern eines Haushalts eine „Home Zone“ einrichten, also ein örtlich begrenztes Gebiet, in dem Telefongespräche zu einem wesentlich günstigerem Tarif angeboten werden. Besitzer von GSM- und UMTS-Handys können ihre Mobiltelefone folglich auch zu Hause nutzen und gleichzeitig von den Preisvorteilen einer Festnetz- oder IP-Verbindung profitieren. Der Vorteil für den Betreiber besteht darin, dass das Mobiltelefon in einem solchen Fall stärker genutzt wird und möglicherweise sogar den Festnetzanschluss ersetzt, wodurch trotz geringerer Tarife ein höherer Umsatz pro Kunde entsteht.

Der europaweit beobachtete Trend vom Fest- zum Mobilnetz wird durch die Femto-Zellen begünstigt. Nach Meinung gewisser Analysten (Alastair Brydon, Analysys Mason Group) könnten diese Mikro-Funkzellen sogar einen entscheidenden Beitrag zur endgültigen Ablösung des Festnetzes liefern.

Entsprechende Produkte wurden anfangs 2007 von diversen Herstellern, beispielsweise von Ericsson, von Ubiquisys oder von der britischen 3 Way Networks, angekündigt und sollen bald auf den Markt kommen. ABI Research²⁷ rechnet für das Jahr 2011 mit über 100 Millionen Benutzern dieser Technologie und mit ungefähr 19 Millionen verkauften Femto-Zellen pro Jahr.

Heimzugangsknoten für 3G befinden sich noch in einer relativ frühen Phase der Entwicklung. Erste kommerzielle Lösungen (z.B. UMTS Home Base Station (HBS) von 3 Way oder ZoneGate von Ubiquisys) sind gerade dabei, auf den Markt zu kommen. Es müssen grosse Kostenersparnisse durch Massenproduktion erzielt werden, da für die Teilnehmer-Endgeräte Preise von ca. US\$ 100.- angestrebt werden. Hinderlich ist dabei im Moment noch die fehlende Standardisierung. Weitere Fragezeichen bestehen hinsichtlich Störanfälligkeit, Reichweite, Leistung, Netzintegration, Handover, Gebührenerfassung oder Sicherheit.

²⁶ UMTS Forum Report 38: „Coverage Extension Bands for UMTS/IMT-2000 in the bands between 470-600 MHz“

²⁷ ABI Research: „Femtocell Access Points: Fixed-Mobile Convergence for Residential, SMB, and Enterprise Markets“

Die Auswirkungen der Femto-Zellen sind gemäss einer Untersuchung der Firma Analysys Research²⁸ weitreichend:

- Indoor Femto-Zellen für 3G werden dank hohem Volumen deutlich preiswerter werden.
- Femto-Zellen werden die Migration des Sprachverkehrs vom Fest zum Mobilnetz beschleunigen. In Zukunft wird der Sprachverkehr zur Mehrheit über 3G-Netze abgewickelt werden.
- Mobilfunkbetreiber werden Femto-Zellen anbieten müssen, um Kunden zu gewinnen oder zu halten.
- Benutzer profitieren von einer preiswerteren Alternative innerhalb von Gebäuden.
- Die Tarife werden vergleichbar sein mit denjenigen von Zellular/WLAN-Lösungen, jedoch mit dem Vorteil, dass der Benutzer nur ein Mobilfunkgerät benötigt. („convergence without compromise“)

Über den Stromverbrauch der Heimzugangsknoten ist noch wenig bekannt. Die im Moment angekündigten Lösungen besitzen eine bescheidene maximale Sendeleistung von +21 dBm (125 mW). Zudem verfügen Sie, wie alle CDMA-Lösungen, über eine dynamische Leistungsregelung. Obwohl der Energiebedarf eines einzelnen Knotens voraussichtlich gering sein wird (Grössenordnung: 10 - 20 W, d.h. 88 - 175 kWh/Jahr), könnte eine hohe Anzahl von Knoten und die Tatsache, dass diese dauernd eingeschaltet sein werden, zu einem gesamthaft grossen Energieverbrauch führen. Würden in ferner Zukunft 20% der total 3.2 Millionen Schweizer Haushalte mit einem Heimzugangsknoten für 3G ausgerüstet, würde daraus ein Leistungsbedarf in der Grössenordnung von 10 MW resultieren, also ein jährlicher Energiebedarf von ca. 88 GWh, was, gemessen am Landesendverbrauch von 57'400 GWh, eher von untergeordneter Bedeutung erscheint. Selbst bezogen auf die jährlich von den Haushalten verbrauchte elektrische Energie von ca. 17'700 GWh würden diese Femto-Zellen den Verbrauch um lediglich 0.5% erhöhen. Vergleicht man den Energiebedarf jedoch mit dem im Kapitel 6 (Tabelle 22) geschätzten Energieverbrauch der bestehenden Infrastruktur, würden die 88 GWh hingegen eine Erhöhung in der Grössenordnung von 50% darstellen.

7.3. OPEN WIRELESS, PUBLIC WLAN, FREE WI-FI

Im Jahre 2005 wurde in St. Gallen das Projekt „Wireless St.Gallen“ ins Leben gerufen. Das Ziel dieses Projektes ist es, allen Einwohnerinnen und Einwohnern der Stadt St.Gallen ein Internetsignal über Wireless Technologie ohne monatliche Gebühren zur Verfügung zu stellen. Als Kooperationspartner konnten die Technische Hochschule Rapperswil, die Stadt St. Gallen (OIA), die Stadtwerke St.Gallen, die Internetcommunity openwireless.ch sowie die Studentenschaft der Universität St.Gallen gewonnen werden. Nach dem Abschluss der Pilotphase konnte das Netz Ende März 2007 den operativen Betrieb vollumfänglich aufnehmen. Wireless St. Gallen ist das erste flächendeckende WLAN der Schweiz, welches gebührenfrei einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Das Netz ist über drei Gateways mit dem Internet verbunden. Zugang zum Netz erhält der Benutzer über zahlreiche WLAN Router, die untereinander selbstständig Verbindungen aufbauen (selbstorganisierendes OLSR²⁹ Funknetz), so dass ein vollständig vermaschtes Netz (full mesh) entsteht, das die Verbindung zu den Gateways sicherstellt. Die mit einer speziellen Firmware ausgestatteten Router werden in privaten Häuser und Haushalten platziert und bieten Computern in der näheren Umgebung kostenlosen und drahtlosen Internetzugang.

Unklarheit besteht noch über die erzielbaren Verbindungsgeschwindigkeiten und Antwortzeiten. Erwartet werden jedoch durchschnittliche Übertragungsraten in der Grössenordnung von 1 Mbit/s (125 kByte/s), was für IP-Telephonie ausreichend ist. Allerdings hängt die Übertragungsrate stark von der Qualität des Signals, von der Netztopologie und damit vom Standort ab. Überdies ist die Verfügbarkeit aufgrund der mehrheitlich privaten Routern nicht immer gewährleistet. Eine minimale

²⁸ „Picocells and Femtocells: will indoor base stations transform the telecoms industry?“, März 2007.

²⁹ OLSR - Optimized Link State Routing, Routingprotokoll für mobile ad-hoc Netze.

Dienstqualität kann somit nicht garantiert werden, was insbesondere für zeitkritische Dienste wie die Telephonie negativ ist. Für den Zugang zum Internet stehen momentan symmetrisch 10 MBit/s zur Verfügung, die in der Zukunft jedoch auf 100 Mbit/s ausgebaut werden können. Entscheidend für Internettelefonie ist neben der Übertragungsrates vor allem die Verzögerungszeit. Diese hängt hauptsächlich von der Anzahl Router ab, über welche das Signal weitergeleitet werden muss und ist folglich auch wieder stark vom individuellen Standort abhängig. Gegenwärtig scheint dies noch eines der Probleme zu sein. Ein anderer Schwachpunkt ist die Datensicherheit. Da die Daten grundsätzlich über private Router laufen, kann deren Vertraulichkeit nicht garantiert werden. Durch zusätzliche Massnahmen wie Virtual Private Networks (VPN), d.h. die Verwendung eines gesicherten Tunnels, können jedoch auch über unsichere Netze Daten sicher übertragen werden. Heftige Bedenken werden aus den Reihen der Umweltschützer geäussert³⁰. Da ein Open Wireless Netzwerk nur mit einer grossen Anzahl Routern funktioniert, die zudem dauernd eingeschaltet sein sollten, werden Ängste hinsichtlich der Strahlenbelastung geäussert. Angesichts der relativ kleinen Sendeleistung von maximal 100 mW (EIRP) ist die Belastung im Abstand von 1 m vom Router allerdings deutlich kleiner (< 2.5%) als der von der Internationalen Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) empfohlene Grenzwert³¹. Die möglichen Auswirkungen auf die Gesundheit, insbesondere die nicht-thermischen Wirkungen, sind indes noch nicht vollständig untersucht³²:

Die wissenschaftliche Datenlage ist durch die neuen Forschungsergebnisse noch vielfältiger, jedoch nicht deutlicher geworden. Es wurden keine gesundheitlich bedeutsamen Effekte identifiziert, die neu als wissenschaftlich gesichert gelten können, eine Anpassung der Immissionsgrenzwerte drängt sich daher aus wissenschaftlicher Sicht nicht auf. Generell bleiben jedoch bezüglich nicht-thermischer Wirkungen hochfrequenter Strahlung viele Fragen offen, sowohl was die Sicherheit ihres Nachweises als auch ihre potenzielle Bedeutung für die Gesundheit betrifft.

Ähnliche Projekte wie in St. Gallen sind in der ganzen Schweiz³³, unter anderem in Bern, Luzern³⁴, Zürich und auf der Riederalp³⁵, in Planung oder bereits im Betrieb. Berichte aus Berlin, Leipzig, London, Paris und San Francisco zeugen davon, dass es sich um einen weltweiten Trend handelt. Wie das Beispiel St. Gallen mit derzeit über 400 aktiven Routern zeigt (vgl. Abbildung 32), wachsen die bestehenden Netze gegenwärtig sehr schnell.

³⁰ vgl. beispielsweise <http://www.gigaherz.ch>

³¹ Bundesamtes für Gesundheit (BAG): „Risikopotential von drahtlosen Netzwerken“, Januar 2007.

³² Bundesamt für Umwelt (BAFU): „Hochfrequente Strahlung und Gesundheit. Bewertung von wissenschaftlichen Studien im Niedrigdosisbereich“. 2. aktualisierte Aufl. 2007.

³³ NZZ am Sonntag: „Drahtloses Internet, gratis und überall“, S. 15, 3. 10. 2006.

³⁴ Cash-Daily: „Luftangriff auf Handy- und Internet-Tarife“, 30. 04. 2007.

³⁵ Tagesanzeiger: „Wald, Wiesen, WLAN – das WWW der Riederalp“, 17. 04. 2007.

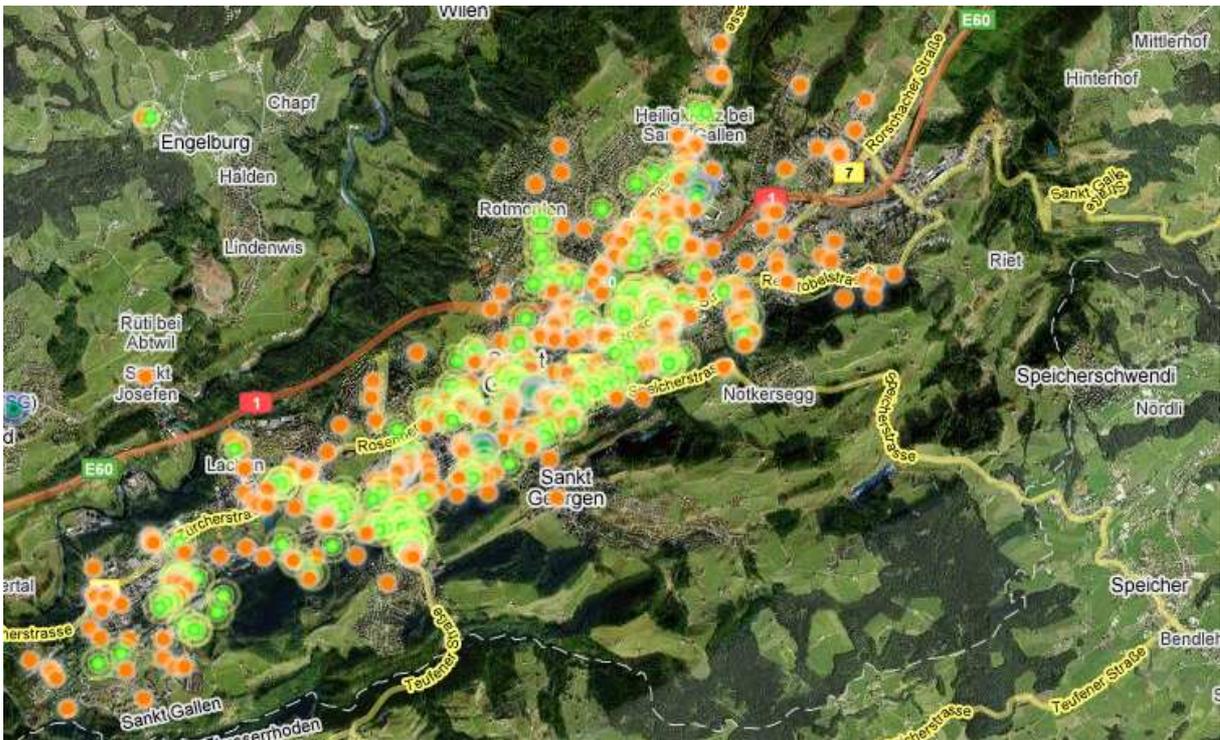


Abbildung 32: Status des Open Wireless Netzes in St. Gallen, Stand Ende August 2007

Die Meinungen über die zukünftige Bedeutung von öffentlichen WLANs gehen stark auseinander. Während die Telekombetreiber sich gelassen geben und den Ausbau von offenen WLAN-Netze scheinbar nicht fürchten, tönt es bei den Firmen, welche drahtlose Internetlösungen realisieren, optimistischer. Jim Romaguera, Managing Director von TheNet (<http://www.tenet.ch>), prognostiziert, dass im Jahre 2009 jede Schweizer Stadt ein öffentliches WLAN besitzen dürfte. Joerg Furrer, CEO von tpn the public network AG, meint sogar: „WLAN und vergleichbare Technologien werden die mobile Welt verändern; drahtlose IP-Wolken werden (fast) überall sein und das Internet ist das umfassende Kommunikationsnetz für Telefonie, Information & Entertainment.“

Für die flächendeckende Versorgung eines Gebiets eignen sich die Open Wireless Netze nur sehr beschränkt. Einerseits ist die Reichweite der WLAN-Router gering. Mit der erlaubten Sendeleistung von 100 mW EIRP können bei 2.4 GHz selbst unter optimalen Bedingungen nur wenige 100 m erzielt werden. Durch den Einsatz von Antennen mit Richtwirkung können bei Punkt-zu-Punktverbindungen grössere Reichweiten erzielt werden. Allerdings ist zu beachten, dass der Gewinn der Antennen nur im Empfangsfall zum Tragen kommt, da die erlaubte EIRP nicht überschritten werden darf. Im Frequenzbereich zwischen 5470 und 5725 MHz sind entsprechend der technischen Schnittstellenanforderung RIR1010-04 des BAKOMs Sendeleistungen von 1 W EIRP zugelassen, sofern eine Sendeleistungsregelung (TPC – transmit power control) implementiert ist. Aufgrund der grösseren Freiraumdämpfung lässt sich damit die Reichweite jedoch nur um etwa 40% vergrössern. Eine einigermassen flächendeckende Versorgung liesse sich folglich nur in urbanen Agglomerationen erreichen. Nehmen wir als Beispiel die Stadt Zürich mit einer Gesamtfläche (ohne See) von 87.8 km². Davon sind 32.9 % Gebäudeareale, 4.2 % Industrieareale und 15.5 % Verkehrsflächen³⁶. Der Rest teilt sich auf in Wald, landwirtschaftliche Nutzfläche und Erholungsanlagen. Die Fläche des zu versorgenden Gebiets beträgt demnach etwa 46 km². Unter der Annahme einer durchschnittlichen Reichweite von 80 m deckt ein WLAN-Router eine Fläche von ca. 0.02 km² ab. Die Frage, wie viele zufällig verteilte Router benötigt werden um einen gegebenen Flächenabdeckungsgrad zu erzielen, ist nicht trivial. Unter gewissen, vereinfachenden Annahmen (vgl. Anhang) ergibt sich ein annähernd exponentieller Zusammenhang:

³⁶ Statistisches Jahrbuch der Stadt Zürich, 2003.

$$\eta(k) \approx 1 - e^{-k \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2}.$$

- η : Abdeckungsgrad
- k : Anzahl zufällig verteilter Router
- r : Radius einer Funkzelle
- R : Radius des Versorgungsgebiets

Für das Beispiel der Stadt Zürich ($R = 3800$ m, $r = 80$ m) ergeben sich die in der Tabelle 24 zusammengestellten Werte.

Abdeckungsgrad	Anzahl Router	Leistungsbedarf
60%	2067	20.6 kW
70%	2716	27.2 kW
80%	3631	36.3 kW
90%	5195	52.0 kW
95%	6759	67.6 kW

Tabelle 24: Anzahl Router und geschätzter Leistungsbedarf für einen gegebenen Abdeckungsgrad am Beispiel der Stadt Zürich.

Handelsübliche WLAN-Router für IEEE 802.11g weisen - nahezu unabhängig von der Sendeleistung - eine Leistungsaufnahme von etwa 10 W auf. Auf dieser Annahme basieren die in Tabelle 24 angegebenen Werte. Falls die Router nicht drahtlos sondern übers Kabel miteinander kommunizieren, muss zusätzlich der Leistungsbedarf des Modems berücksichtigt werden, der in der gleichen Größenordnung liegt. Gemessen am mittleren Leistungsbedarf der privaten Haushalte in Zürich³⁷ von 76.5 MW bewegen sich die Zahlen im Promillebereich.

Etwa ein Viertel der Schweizer Bevölkerung lebt in den zwanzig bevölkerungsreichsten Städten der Schweiz (vgl. Tabelle 25).

³⁷ Statistisches Jahrbuch der Stadt Zürich, 2005, S. 195.

Stadt	Fläche [km ²]	Einwohner	Stadt	Fläche [km ²]	Einwohner
Zürich	91.9	372'000	Thun	21.7	42'000
Genf	15.9	186'000	Köniz	51.1	38'000
Basel	22.8	165'000	La Chaux-de-Fonds	55.7	37'000
Bern	51.6	128'000	Schaffhausen	31.0	33'000
Lausanne	41.4	129'000	Freiburg	9.3	33'000
Winterthur	68.1	96'000	Chur	28.1	35'000
St. Gallen	39.4	70'000	Neuenburg	18.1	32'000
Luzern	24.2	58'000	Vernier	7.7	32'000
Lugano	48.7	52'000	Uster	28.6	31'000
Biel	21.2	51'000	Sion	25.6	29'000

Tabelle 25: Die 20 bevölkerungsreichsten Städte der Schweiz

Wollte man diese Städte mit WLAN-Routern abdecken, so ergeben sich in etwa die in Tabelle 26 zusammengefassten Energiewerte.

Abdeckungsgrad	Anzahl Router	Energiebedarf pro Jahr
60%	≈10'000	0.9 GWh
70%	≈12'000	1.1 GWh
80%	≈16'000	1.4 GWh
90%	≈23'000	2.0 GWh
95%	≈30'000	2.6 GWh

Tabelle 26: Anzahl Router und geschätzter Energiebedarf für einen gegebenen Abdeckungsgrad hochgerechnet auf die 20 bevölkerungsreichsten Städte der Schweiz.

Gemessen am momentanen Leistungsbedarf der Infrastruktur (vgl. Tabelle 22) ist der Energiebedarf bescheiden (1 - 2%).

7.4. NGN – NEXT GENERATION NETWORK/IMS – IP MULTIMEDIA SUBSYSTEM

Mehrere Standardisierungsgremien, unter anderem TISPAN³⁸ (Telecommunications & Internet Converged Services & Protocols for Advanced Networks) und 3GPP (3rd Generation Partnership Project), arbeiten zur Zeit an der Definition des NGN (Next Generation Network), auf dessen Basis in Zukunft drahtgebundene und drahtlose Multimedia-Dienste angeboten werden sollen. Die wichtigsten Merkmale des NGN sind³⁹

- Paketvermittelt

³⁸ TISPAN ist eine Standardisierungsgruppe innerhalb der ETSI (European Telecommunication Standards Institute).

³⁹ ITU-T Recommendation Y.2001

- Transporttechnologie mit QoS⁴⁰
- Dienstbezogene Funktionen sind unabhängig von der zu Grunde liegenden Transporttechnologie
- Weitgehende Mobilität des Benutzers

Ein bemerkenswerter Schritt ist dabei die Trennung von Transportnetz und Diensten⁴¹, woraus folgt, dass der Benutzer die Möglichkeit haben soll, über alle Transportnetze auf alle Dienste zugreifen zu können und zwar an beliebigen festen oder beweglichen Orten mit beliebigen Endgeräten.

Ein wichtiger Bestandteil des NGN ist das IMS⁴² (IP Multimedia Subsystem), welches im Rahmen des 3rd Generation Partnership Project (3GPP⁴³) als Teil von UMTS Release 5/IMT2000 standardisiert wurde. IMS soll im NGN sowohl im Festnetz als auch in den drahtlosen Netzen als Kernnetz (CN - core network) eingesetzt werden und gemeinsam genutzte Funktionen zur Verfügung stellen. Die Aufgabe von IMS besteht darin, für Endgeräte und Anwendungen sichere und zuverlässige Mittel bereitzustellen, damit diese sich finden, untereinander Bedingungen aushandeln und schliesslich kommunizieren können.

The IM subsystem comprises all CN elements for provision of IP multimedia services comprising audio, video, text, chat, etc. and a combination of them delivered over the PS domain.

Das Ziel von IMS ist es, innovative Multimediadienste über Fest- und Mobilnetze anzubieten und zwar unter Verwendung von offenen Standards. Zu diesem Zweck definiert IMS standardisierte Mechanismen für:

- Sicherung der Dienstqualität (QoS) während der Multimedia Sitzung (session),
- Vergebührung der Multimedia Sitzung,
- Roaming,
- Integration der Dienste und Drittanbieter,
- Netzmanagement.

Dazu werden im Wesentlichen IP Protokolle eingesetzt:

- SIP⁴⁴ (Session Initiation Protocol) ist das vorwiegende Signalisierungsprotokoll. Es wurde von der Internet Engineering Task Force (IETF) entwickelt und später für IMS übernommen.
- IPv6 (Internet Protocol, Version 6) wird als Protokoll in der Vermittlungsschicht von den Geräten verwendet, um Daten in einem paketvermittelten Netz auszutauschen. IMS unterstützt zusätzlich IPv4.
- Diameter⁴⁵ entstand aus dem Radius-Protokoll und dient der Authentifizierung, der Autorisierung und der Abrechnung.

⁴⁰ QoS – Quality of Service (Güte eines Kommunikationsdienstes)

⁴¹ „The separation of services from the network is a key cornerstone of the NGN, i.e., two distinct blocks of functionality“

⁴² 3GPP TS 23.228 V8.1.0 (2007-06)

⁴³ Ein ähnliches, aber nicht identisches IMS wurde auch von 3GPP2 standardisiert.

⁴⁴ RFC 3261

⁴⁵ RFC 3588

- Und vielen anderen: z.B. SDP, RTP, RTCP, MGCP, etc.

Daneben werden auch einige ITU-Protokolle eingesetzt (z.B. H-248).

In herkömmlichen Netzstrukturen wurden die Funktionalitäten meist dienstabhängig realisiert, was zu einer hohen Komplexität und damit verbundenen Kosten führte. Für jeden Dienst waren auf jeder Schicht separate Implementierungen notwendig, die zudem auf den Endgeräten und im Kernnetz reproduziert werden mussten. Gegenüber den herkömmlichen Architekturen ermöglicht IMS eine echte Konvergenz. IMS nutzt das Internet Protocol (IP) und ermöglicht die Konvergenz von Daten, Sprache und diversen Netzzugangstechnologien über eine IP-basierte Infrastruktur. Die IMS Architektur bietet eine Anzahl von gemeinsam genutzten Funktionen an, die in ihrer Struktur und Implementation generisch sind und von fast allen Diensten im Netz genutzt werden können. Durch diese gemeinsam genutzten Funktionen werden parallele Entwicklungen vermieden und die Systeme werden stabiler, da die zentralen Funktionalitäten schon gereift und erprobt sind. Zudem profitieren die Dienstentwickler von einem höheren Abstraktionslevel und können sich auf die eigentliche Anwendung konzentrieren.

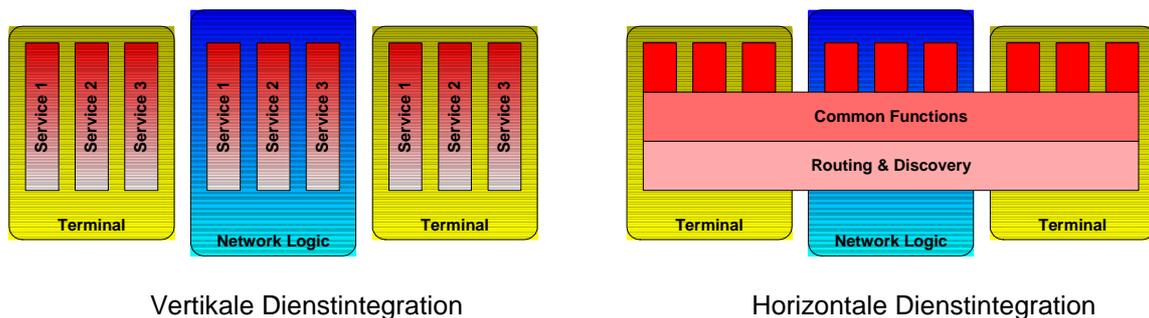


Abbildung 33: *Herkömmlich vertikale Dienstintegration und Verwendung von gemeinsam genutzten Funktionen im IMS*

Ein wesentlicher Vorteil von IMS ist die Tatsache, dass es keine Rolle spielt, über welches Netz (fix, mobil), mit welchem Endgerät oder von welchem Ort (Inland, Ausland) der Benutzer auf die IMS-Serviceplattform zugreift. Multi-Access Funktionalität ist ein fester Bestandteil von IMS. Die unterschiedlichen Eigenschaften (Bandbreite, Latenz, Rechenleistung) der Zugangsmethoden und Endgeräte sind dem Netz bekannt und die Dienste werden entsprechend angepasst, was eine echte Konvergenz von Fest- und Mobilnetz (FMC – fixed-mobile convergence) ermöglicht.

8. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Dieses Kapitel soll vor allem die Erkenntnisse die während den Untersuchungen gemacht wurden zusammenfassen. Einerseits handelt es sich um die Erkenntnisse aus den durchgeführten Messungen und andererseits um die Erkenntnisse aus den Literaturrecherchen und Berechnungen.

8.1. MESSUNGEN DER BASISSTATIONEN

Aus dem Kapitel 5 ist klar ersichtlich, dass der Leistungsbedarf einer Basisstation nur wenig von der Verkehrslast abhängig ist. Dabei spielt es keine Rolle ob es sich um eine GSM900, GSM1800 oder um eine UMTS Basisstation handelt. Bei genauer Untersuchung ist jedoch festzustellen, dass die durchschnittliche Leistungsschwankung bei GSM1800, im Vergleich zur durchschnittlichen Leistungsschwankung von GSM900 oder UMTS, am Grössten ist.

Für den Zusammenhang zwischen Leistungsbedarf und Verkehrslast kann in erster Näherung ein linearer (jedoch nicht proportionaler) Zusammenhang formuliert werden:

$$P(\text{Erlang}) = P_{\text{Ruhe}} + \alpha \cdot \text{Erlang} .$$

Dabei bezeichnet α die differentielle Leistungsänderung pro Erlang. Die Grössen P_{Ruhe} und α sind von Basisstation zu Basisstation verschieden. Sie liegen in der Grössenordnung 500 - 900 W und 1 - 10 W/Erlang. Im Allgemeinen ist die Ruheleistung also deutlich höher als der durch den Verkehr verursachte zusätzliche Leistungsbedarf. Bezieht man die Leistung auf den Verkehrswert, so erhält man

$$\frac{P(\text{Erlang})}{\text{Erlang}} = \frac{P_{\text{Ruhe}}}{\text{Erlang}} + \alpha ,$$

ein Ergebnis, das umgekehrt proportional von der Auslastung

$$\eta = \frac{\text{Erlang}}{\text{Erlang}_{\text{max}}}$$

der Zelle abhängt:

$$\frac{P(\text{Erlang})}{\text{Erlang}} = \frac{P_{\text{Ruhe}}}{\text{Erlang}_{\text{max}}} \cdot \frac{1}{\eta} + \alpha .$$

Dieser (stark vereinfachte) Zusammenhang ist in Abbildung 34 graphisch dargestellt. Um den spezifischen Leistungsbedarf zu minimieren sollte demnach eine möglichst hohe Auslastung der Zelle angestrebt werden. Zudem sollte, wie schon erwähnt, der Grundleistungsbedarf P_{Ruhe} möglichst minimiert werden.

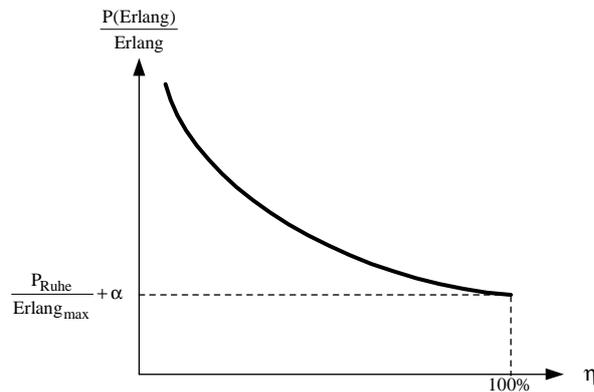


Abbildung 34: Zusammenhang zwischen Auslastung η und spezifischem Leistungsbedarf in W/Erlang.

Der Grundleistungsbedarf ist von der Frequenz und auch von der Technologie abhängig. Der Grundleistungsbedarf ist bei gleicher effektiven Strahlungsleistung [ERP] und gleicher Netzauslastung bei GSM900 (900 MHz-Band) kleiner als bei GSM1800 (1800 MHz-Band). Wobei bei einer UMTS-Basisstation (1900-2100 MHz) der Leistungsbedarf am grössten ist.

Weiter kann über den Zusammenhang des Leistungsbedarfes einer Basisstation und der Zellengrösse eine Aussage gemacht werden. Eine grössere Zelle bedingt meistens eine grössere Sendeleistung die wiederum den Grundleistungsbedarf anhebt. Im freien Raum nimmt die erforderliche Sendeleistung quadratisch mit der Distanz d zu. Im Allgemeinen kann der Zusammenhang durch den path loss exponent m beschrieben werden:

$$P_{TX} \sim d^m,$$

wobei m meist grösser als 2 ist und in einer städtischen Umgebung typischerweise Werte zwischen 2.7 und 3.5 annimmt.

8.2. MESSUNGEN AN WEITEREN NETZELEMENTEN

Die Messungen an weiteren Netzelementen, d.h. an den meisten Netzelementen des GSM- und UMTS-Netzes, ausgeschlossen Basisstationen (BTS und NodeB) zeigen, dass der Einfluss dieser Netzelemente am Gesamtenergiebedarf der Infrastruktur nur etwa 5% beträgt. Dies ist auf die geringe Stückzahl im Vergleich zu den Basisstationen zurückzuführen. Netzelemente wie MSC, MGW, und HLR haben zwar einen deutlich höheren Leistungsbedarf als Basisstationen, beeinflussen jedoch den Gesamtenergiebedarf nur sehr wenig. Die folgende Tabelle soll den Leistungsbedarf und den Energieverbrauch der Basisstationen (BTS und NodeB/RBS) und den restlichen Netzelementen nochmals zum Vergleich darstellen.

	Mittlerer Leistungsbedarf	Energieverbrauch pro Jahr
BTS,NodeB/RBS:	12850 kW	112.57 GWh
Weitere. Elemente:	717 kW	6.28 GWh

Tabelle 27: Vergleich Leistung und Energie Basisstationen vs. restl. Netzelemente

Der Energieverbrauch der Basisstationen ist somit um etwa einen Faktor 20 grösser.

Positiv ist, dass die Hersteller dieser Netzelemente (Nokia, Ericsson) offensichtlich auch auf Energieeffizienz setzen. So ist der Leistungsbedarf der neueren BSC der BSC354, trotz dem Verwalten von mehr Basisstationen und einer deutlich grösseren Zahl von Sendeempfängern, kleiner als der Leistungsbedarf der älteren BSC der BSC311.

8.3. KLIMATISIERUNG

Der Energieverbrauch der Klimatisierung ist ein wesentlicher Anteil, je nach eingestellter Temperatur und enthaltenen Netzelementen, kann mit einem Anteil von ca. 25% des gesamten Leistungsbedarfes der Station gerechnet werden.

Die Erhöhung der Betriebstemperatur bzw. der Raumtemperatur des Containers verringerte die Leistungsaufnahme der Klimaanlage. Bei der Bestimmung des Leistungsbedarfes, wurde bei einer Erhöhung der Temperatur um 4°C, eine Reduktion des durchschnittlichen Leistungsbedarfes der Klimaanlage um etwa 150W erreicht.

Die Kühlleistung der Klimaanlage ist, bei der ausgemessenen Station, deutlich über dem Leistungsbedarf der Station. Die folgende Tabelle zeigt diesen Sachverhalt.

Kühlleistung	Leistung BS ohne AC	Leistung AC aus Datenblatt	Leistung AC gemessen
6830 W	≈ 2600 W	2270 W	≈ 900 W

Tabelle 28: Kühlleistung und Leistung der BS

Die Klimaanlage ist offensichtlich sehr grosszügig dimensioniert. Das zeigt sich einerseits im Verhältnis der Kühlleistung (Spalte 1) zur Leistung der Basisstation ohne Klimaanlage (Spalte 2). Andererseits ist dies auch daraus ersichtlich, dass die Klimaanlage einen deutlich kleineren mittleren Leistungsbedarf aufweist als die Leistung die im Datenblatt angegeben ist (Spalte 3). Die Klimaanlage ist offenbar zeitlich weniger am Kühlen als dass sie nur am Lüften ist.

8.4. ZUKUNFTSSZENARIEN

UMTS900

Im Vergleich zu UMTS auf dem 2100MHz Band, könnte, zumindest in ländlicher Umgebung, eine deutliche Reduktion der Anzahl Basisstationen (bis 60%) erreicht werden. Dies hätte, falls der Energieverbrauch der Basisstation etwa gleich wäre, auch eine 60% Verringerung des Energieverbrauchs zufolge. Es ist jedoch eher unwahrscheinlich, dass UMTS900 die jetzigen UMTS Basisstationen ersetzt. Aus energetischer Sicht würde es aber durchaus Sinn ergeben die heutigen GSM900 und GSM1800 Basisstationen langsam herunter zu fahren und dafür den ganzen Datenverkehr über die beiden UMTS Technologien zu leiten. Gemäss aktuellsten Resultaten aus den Feldtests von Qualcomm mit Telefonica Espana und Huawei Technologies ist sogar eine Koexistenz von GSM900 und UMTS900 möglich⁴⁶. Somit könnte das Ablösen von GSM durch UMTS gemächlicher vollzogen werden.

Femtozellen

Auf dem Mobile World Congress 2008 in Barcelona wurden die ersten Femtozellen vorgestellt. Motorolas wie auch Netgears Femtozelle basieren dabei auf einen Ethernet-Gateway. Ausserdem sind bei beiden Geräten neben anderen Funktionen auch Router, Switch und WLAN integriert. Der Trend geht offensichtlich in Richtung Komplettlösungen. Somit ist es durchaus wahrscheinlich, dass in nicht zu ferner Zukunft in den heutigen ADSL-Modem - das ja schon jetzt gleichzeitig Router, Switch und WLAN Access Point ist - eine Femtozelle integriert wird. Würde dieses Szenario zutreffen, so hätte dies höchstwahrscheinlich einen geringen Einfluss auf den Energiebedarf, da das Modem selbst ja schon einen gewissen Leistungsbedarf aufweist. Es sei hier trotzdem nochmals auf das Potenzial von Femtozellen in Bezug auf das „Ablösung des Festnetzes“ hingewiesen. Dies hätte einen sehr positiven Einfluss auf den Energiebedarf, da die ganze Infrastruktur fürs Festnetz wegfallen würde.

⁴⁶ Qualcomm, Telefónica España and Huawei Technologies Complete UMTS/HSDPA 900 MHz Field Trial (www.qualcomm.com/press/releases/2008/080211_UMTS900_field_trial.html)

Open Wireless

Zurzeit betrachten Mobilfunkbetreiber das Thema *Open WiFi als Ersatz von UMTS* weiterhin gelassen. Aufgrund der oben diskutierten Schwierigkeiten bei grossen WLAN-Netzen (flächendeckende Abdeckung, beschränkte Anzahl Frequenzen...), dürfte Open-Wireless (zumindest in nächster Zukunft) eher als Ergänzung zu UMTS genutzt werden. Mobilfunkbetreiber bieten ausserdem ihre eigenen Hotspots an.

Das Problem der flächendeckenden Abdeckung soll anhand des OSLR Open-Wireless Netzes in St.Gallen verdeutlicht werden. Die folgende Abbildung zeigt die Flächenabdeckung in St.Gallen. Die grünen Punkte sind dabei Router die *online* sind, bei den orangen Routern kann nicht mit Sicherheit gesagt werden ob sie online sind oder nicht. Der Status ist unbekannt.

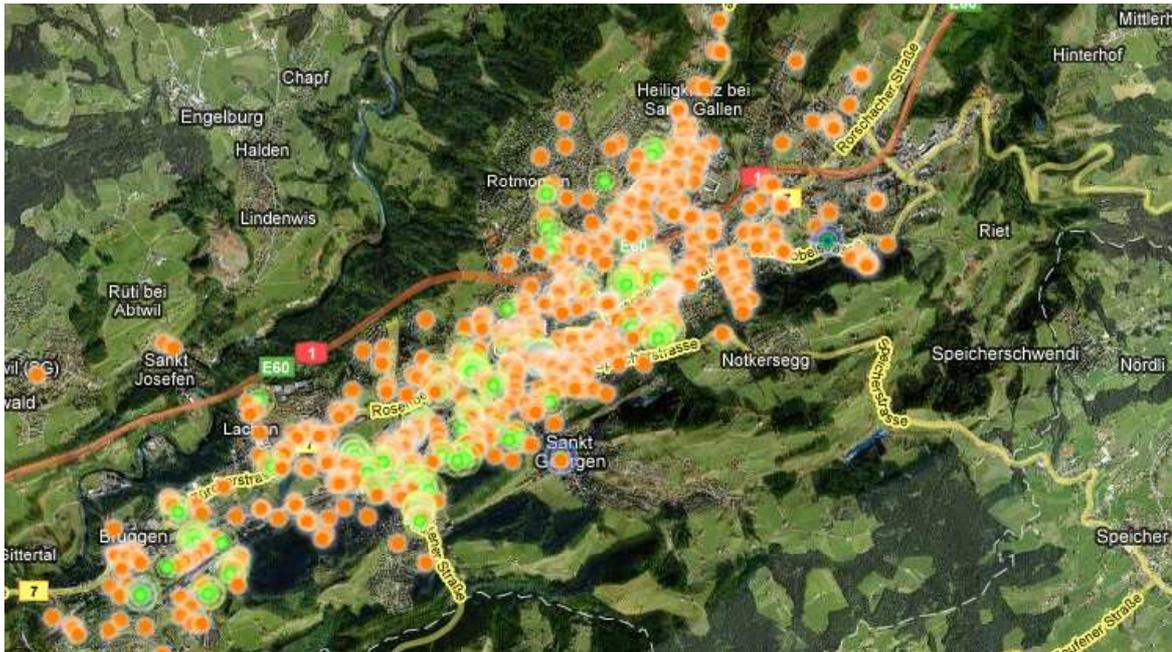


Abbildung 35: Status des Open Wireless Netzes in St. Gallen, Stand Ende Februar 2008⁴⁷

Im Vergleich zum Stand Ende August 2007 (vgl. Abbildung 32) sind etwa 300 neue Router hinzugekommen. Es sind jetzt über 700 Router im Einsatz. Ausserdem ist festzustellen, dass der Anteil der Router bei welchen der Status unbekannt ist, markant zugenommen hat. Nur gerade 1/5 der Router, also etwa 140 Stück sind garantiert online. Trotz der Zunahme der Anzahl Router bestätigt sich der Schwachpunkt der flächendeckenden Abdeckung bei OSLR tendenziell.

IMS

Der Einfluss des IMS auf den Energiebedarf der mobilen Kommunikation wurde im Rahmen dieses Projekts nicht untersucht. Einerseits betrifft dies das Kernnetz, das nicht Gegenstand der Untersuchung war und andererseits ist die Fragestellung so komplex, dass sie in einem gesonderten Forschungsprojekt abgeklärt werden müsste.

⁴⁷ Quelle: sg.openwireless.ch/karte

9. OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEITEN UND HANDLUNGALTERNATIVEN

9.1. MINIMIEREN DES RUHELEISTUNGSBEDARFS

Die Messungen an den Basisstation ergaben, dass der Leistungsbedarf ganz wesentlich durch den hohen Ruheleistungsbedarf geprägt ist. Die Abhängigkeit von der Verkehrslast beträgt demgegenüber weniger als 10%. In Hinsicht auf eine Optimierung des Energieverbrauchs muss also vor allem der Ruheleistungsbedarf optimiert werden.

Eine erste, diesbezügliche Massnahme ist es, schon bei der Beschaffung der Netzelemente auf eine möglichst geringe Ruheleistung zu achten und bei der Beurteilung der Offerten dieses Kriterium mit einfließen zu lassen.

Zusätzlich müsste abgeklärt werden, ob ein lastabhängiges Abschalten von Sendeempfängern technisch realisierbar und betrieblich durchführbar wäre.

Um den Anteil der Ruheleistung am spezifischen Energieverbrauch möglichst gering zu halten, ist eine möglichst hohe Auslastung der Zellen anzustreben (vgl. Kapitel 8.1 auf Seite 65). Desgleichen dürfte es energetisch sinnvoll sein, die Anzahl Sendeempfänger pro Basisstation so zu wählen, dass diese möglichst gut ausgelastet sind. Sendeempfänger, die nur wenig Verkehr handhaben, brauchen nur unwesentlich weniger Energie als gut ausgelastete Sendeempfänger und tragen deshalb zu einer schlechteren spezifischen Energiebilanz bei.

9.2. WAHL DER ZELLENGRÖSSE

Die Wahl der Zellengrösse ist von vielerlei Faktoren abhängig:

- Prognostizierte Verkehrslast
- Topologie
- Verfügbarkeit von Standorten
- Einhaltung der NIS-Grenzwerte (Maximale ERP)
- Erzielbare Reichweite (abhängig von Frequenz, Sendeleistung, Antenne, Bebauung, ...)
- Besiedelung

Andererseits beeinflusst die Wahl der Zellengrösse auch die Anzahl notwendiger Standorte und den Energieverbrauch der Infrastruktur für ein gegebenes Versorgungsgebiet. Aufgrund des hohen Anteils des Ruheleistungsbedarfs und der Klimatisierung ist es in energetischer Hinsicht vorteilhafter, einen bestehenden Standort auszubauen statt einen zweiten, neuen Standort zu erstellen. Dies wird aber durch mehrere Faktoren erschwert oder gar verunmöglicht. So lassen die Grenzwerte der NIS-Verordnung⁴⁸ oft keinen Ausbau zu. Der Einsatz von zusätzlichen Sendeempfängern würde zu einer Überschreitung des zulässigen ERP-Wertes der Anlage führen. In der neueren, bundesgerichtlichen Rechtsprechung⁴⁹ wird das in der Vollzugsempfehlung zur NIS-Verordnung enthaltene

⁴⁸ Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung vom 23. Dezember 1999 (Stand am 1. Januar 2008)

⁴⁹ Urteil 1C.40/2007 vom 6. November 2007

Anlageperimeter-Modell angezweifelt. Die vom Bundesgericht angeregte Änderung auf einen fixen Abstand könnte die geschilderte Problematik verschärfen.

9.3. KLIMATISIERUNG

Es sollen hier Vorschläge gemacht werden, die den Energieverbrauch der Klimaanlage bzw. der Klimatisierung senken.

Erhöhung der Raumtemperatur und Dimensionierung der Kühlanlagen

Die Innenraumtemperatur von Indooranlagen sollte in einem ersten Schritt von 24°C auf 28°C erhöht werden. Der Nutzen und die Einsparmöglichkeiten sind im Abschnitt 5.4. erläutert. Die Dimensionierung (Kühlleistung) der Klimaanlage bei neuen Basisstationen könnte, im Hinblick auf das Abschalten von GSM (2010-2015), überdacht werden. Die Klimaanlage sind zurzeit so dimensioniert, dass sie einen Container, mit mindestens zwei vollausgebauten GSM (GSM900 und GSM1800) Basisstationen sowie einer vollausgebaute NodeB/RBS, klimatisieren können.

Einsatz von Frischluftkühlanlagen

Die typischen mittleren Aussenlufttemperaturen in der Schweiz befinden sich in tieferen Lagen jährlich ungefähr im Bereich von 0 und 19°C. Die folgende Abbildung soll den langjährig gemittelten Verlauf des Klimas in Basel-Binningen (Normperiode 1961-1990) darstellen, da sich in dieser Region die untersuchte Klimaanlage befindet. Die monatlichen Mittel der Maximum- der Tagesmittel- und der Minimumtemperaturen sind rot (von oben nach unten) dargestellt.

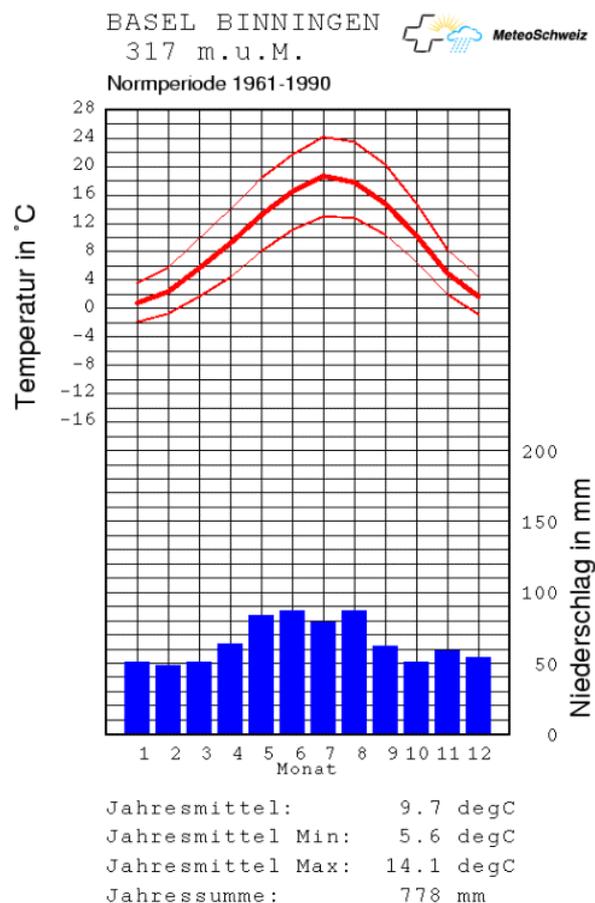


Abbildung 36: Normtemperatur Basel-Binningen (Quelle: www.meteoschweiz.admin.ch)

Es ist ersichtlich, dass die mittlere monatliche Aussenlufttemperatur selbst im Juli nur bei etwa 24°C liegt. Der Jahresdurchschnitt der Maximumtemperaturen liegt dabei bei lediglich 14.1°C. Obwohl die Normtemperatur der Periode 1961-1990 in jüngster Zeit durchschnittlich um etwa 1 - 2°C überschritten wird, könnte die Aussenluft zum Kühlen von Netzelementen benutzt werden.

Wie von einigen Mobilfunkbetreibern untersucht und sogar erprobt⁵⁰, kann sogar komplett auf eine Klimatisierung mit Kompressoren verzichtet werden. Der enorme Leistungsbedarf der Klimatisierung könnte durch den Einsatz von Frischluftkühlanlagen erheblich gesenkt werden. Es gibt folgende Vorteile durch das Kühlen mit Frischluftkühlanlagen:

- Es kann ein COP⁵¹ von mindestens 20 erreicht werden, gemäss Datenblatt ist der COP der zurzeit eingesetzten Klimaanlage bei ≈ 3 .
- Reduktion des Energieverbrauchs zur Klimatisierung um bis zu 80%
- Grössere Zuverlässigkeit durch niedrigere durchschnittliche Jahrestemperatur in den Containern
- Erhöhter Komfort für Mitarbeitende, da die Innentemperatur immer der Aussentemperatur angepasst ist
- Erhebliche Kostensenkung durch geringerer Leistungsbedarf
- Verzicht auf Kältemittel

9.4. SITE-SHARING

Unter Site-Sharing versteht man die gemeinsame Nutzung von Infrastruktur oder Trägerstrukturen (z.B. Gebäude, Starkstromleitungsmast, Silo, Mobilfunkmasten) an ein und dem selben Standort. Jeder Operator betreibt sein Netz nach wie vor individuell. Der Hauptvorteil von Site-Sharing ist die Verringerung der Anzahl Antennenstandorte. Die Ansammlung verschiedener Antennen am gleichen Ort führt zu einer Erhöhung der Leistungsflussdichte im Umkreis der Anlage und wirkt sich hinsichtlich der Strahlungsbelastung in der Umgebung ungünstig aus.

Zurzeit kommt es schon oft vor, dass die Mobilfunkbetreiber ihre Antennen am gleichen Mast betreiben. Die eigentlichen Netzelemente befinden sich dann jeweils für jeden Betreiber in einem separaten Container. Für den Mobilfunkbetreiber der als Zweiter oder sogar als Dritter den Standort belegt, besteht oft das Problem, dass er die Sendeleistung aufgrund der NISV sehr gering halten muss. Die NIS-Verordnung verhindert zurzeit bei den meisten GSM900 und GSM1800 Basisstationen ein weiteres Ausbauen (zusätzliche TRX) der bestehenden BTS. Der maximal zulässige ERP-Wert ist bei vielen Anlagen bereits ausgeschöpft.

Da für den Betrieb eines Standorts, unabhängig von der Verkehrslast, eine vergleichsweise hohe Grundleistung benötigt wird, wäre es aus energetischer Sicht grundsätzlich von Vorteil, die Anzahl Standorte klein zu halten. Wie erwähnt, scheitert dies häufig an den bestehenden Immissionsgrenzwerten. Daneben existieren weitere Gründe (unterschiedliche Strategien in der Netzplanung, Koordinierungsaufwand, bauliche Massnahmen, ...) die das Site-Sharing erschweren.

Unter Berücksichtigung der Begrenzung der effektiv abgestrahlten Leistung (ERP) an einem Standort (genauer: innerhalb eines Anlageperimeters) durch die Grenzwerte der NIS-Verordnung, hat das Site-Sharing eine Reduktion der Emissionen des einzelnen Betreibers zur Folge und bedeutet folglich eine Verkleinerung der Zellen und damit eine Zunahme der Zellenzahl, was in Hinblick auf den Energieverbrauch als ungünstig zu bewerten ist.

⁵⁰ Energy an Cost Savings with fresh Air Cooling Systems (swisscom Innovations comtec 06/05)

⁵¹ COP: Coefficient of Performance ist das Verhältnis der Kühlleistung zum Leistungsbedarf der Kühlanlage

9.5. WAHL DER TECHNOLOGIE

Die Wahl der Technologie dürfte in den wenigstens Fällen durch energetische Überlegungen beeinflusst werden. GSM900 und GSM1800 werden noch längere Zeit bestehen bleiben. Die Technologie der Zukunft dürfte jedoch UMTS sein, wobei sich in den vergangenen Monaten eine rapide Zunahme der Verkehrsmenge abgezeichnet hat. Aus diesem Grund dürften in näherer Zukunft auch die zweiten Frequenzen aktiviert werden. Wie sich bei UMTS die Aufteilung zwischen 2.1 GHz und 900 MHz entwickeln wird, ist im Moment noch schwierig abzuschätzen.

Die durchgeführten Messungen scheinen darauf hinzu deuten, dass UMTS im Vergleich zu GSM tendenziell einen höheren Leistungsbedarf aufweist. Allerdings ist es schwierig, die beiden Technologien fair miteinander zu vergleichen. Eine Schwierigkeit besteht darin, dass die Verkehrslast bei UMTS in Mbit/s, bei GSM jedoch in Erlang angegeben wird. Ein dauernd belegter Zeitschlitz entspricht bei GSM einem Verkehrswert von einem Erlang. Für einen Full-Rate-Sprachkanal von GSM resultieren aus der Sprachcodierung jeweils alle 20 ms 260 Bits an Nutzdaten, was einer Datenrate von 13 kbit/s entspricht⁵². Pro Verkehrskanal (TCH – traffic channel) werden zudem alle 120 ms (26 TDMA-Rahmen) ein Signalisierungskanal (SACCH – slow associated control channel) und ein ungenutzter logischer Kanal übertragen, was zusätzlich eine Nutzdatenrate von etwa 1 kbit/s ergibt. Pro belegtem Zeitschlitz werden demnach etwa 13 - 14 kbit/s an Nutzdaten übertragen. Diese Zahl erlaubt es uns, die Verkehrslast von UMTS und GSM zu vergleichen. Allerdings ist der auf den Verkehr bezogene Leistungsbedarf sehr stark von der Auslastung der Zelle abhängig (vgl. Kapitel 8.1), was den Vergleich zusätzlich erschwert. Im Zeitraum der Messungen waren die UMTS-Stationen noch schwach ausgelastet. Eine wirklich fundierte Aussage, welche Technologie aus energetischer Sicht zu bevorzugen ist, ist mit den vorliegenden Daten nicht möglich. Der Verdacht, dass UMTS im Vergleich zu GSM einen höheren Leistungsbedarf aufweist, müsste in einem zukünftigen Forschungsprojekte bestätigt oder widerlegt werden.

Tiefere Frequenzen sind aus energetischer Sicht grundsätzlich vorteilhafter. Dies liegt einerseits an der geringeren Freiraumdämpfung, der höheren Eindringtiefe in Bauten und den daraus folgenden grösseren Zellen. Andererseits nimmt der Wirkungsgrad von HF-Endverstärkern mit der Frequenz generell ab. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass in den USA zur Zeit das 700 MHz-Band, welches für analoge Fernsehübertragung eingesetzt wurde, für Mobilfunkdienste versteigert wird. Die zukünftigen Betreiber erhoffen sich dadurch eine deutlich verringerte Anzahl an Zellen, sowie markant niedrigere Kosten für Aufbau und Betrieb. Ferner soll auch die Zeit zum Aufbau drastisch verkürzt sein. Selbstverständlich kommen die Vorteile der tieferen Frequenzen vor allem in einer ruralen Umgebung zur Geltung.

9.6. VERMEHRTE VERWENDUNG VON MIKROZELLEN

Um die zunehmenden Verkehrslast bewältigen zu können, muss die Kapazität der Netze kontinuierlich ausgebaut werden. Insbesondere im urbanen Bereich besteht die Möglichkeit, grössere Basisstationen durch den Einsatz von so genannten Mikrozellen zu entlasten. Dadurch kann unter Umständen der Ausbau einer bestehenden Anlage oder sogar das Erstellen einer Anlage an einem neuen Standort verhindert werden.

Als Mikrozellen werden GSM- oder UMTS-Sendeanlagen mit geringer äquivalent abgestrahlter Leistung (weniger als 6 W ERP) bezeichnet, die nur einen vergleichsweise kleinen Abdeckungsradius (100 bis 750 m) besitzen. Aus diesem Grund dürften Mikrozellen hauptsächlich in Gebieten mit größerer Besiedlungsdichte eingesetzt werden. Mikrozellen sind vom Geltungsbereich von Anhang 1 der NISV ausgenommen. Der Anlageperimeter beträgt je nach Frequenzband zwischen 2 m und 5 m.

Mikrozellen haben je nach Sendeleistung und Frequenzbereich einen Leistungsbedarf bis zu einigen hundert Watt. Für den NodeB NB-341 (UMTS, FDD) der Firma Siemens wird bei einer Sendeleistung von 0.5 W beispielsweise eine Speiseleistung von 370 W angegeben. Vergleicht man dies mit dem Leistungsbedarf einer Outdooranlage, der bei etwa 1 kW liegt, wird evident, dass der Einsatz von Mikrozellen energetisch dann Sinn macht, wenn dadurch eine neue, zusätzliche Anlage verhindert werden kann.

⁵² Aufgrund der Kanalcodierung ergeben sich insgesamt 22.8 kbit/s, die übertragen werden müssen.

Im Indoor-Bereich können noch kleinere Zellen gebildet werden. Eine „pico-BTS“ braucht bei +20 dBm (0.1 W) Sendeleistung typischerweise 20 Watt und kann einen Radius von etwa 45 m abdecken. Damit kann ein einzelner Haushalt versorgt werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass für die Anbindung ans Kernnetz zusätzlich Leistung benötigt wird.

	Größenordnung Sendeleistung	Größenordnung Reichweite	Größenordnung Leistungsbedarf
Picozellen	0.1 W	10 m	10 W
Mikrozellen	1 W	100 m	100 W
Outdoor-BTS	10 W	1 km	1 kW

Tabelle 29: Vergleich von Pico- und Mikrozellen mit einer Outdoor-BTS

9.7. GEMEINSAMES UMTS-NETZ

Im Jahr 2002 wurde von avenir suisse im Rahmen einer Studie⁵³ untersucht, welche wirtschaftlichen, juristischen und technischen Folgen ein von allen Konzessionären gemeinsam betriebenes UMTS-Netz haben würde. Die Gutachten ergaben, dass es „keine rechtlichen Einwände gegen die Schaffung eines gemeinsamen Funknetzes und einer Netzgesellschaft“ gibt und dass „ein gemeinsames UMTS-Funknetz für alle Beteiligten grosse Vorteile bringt“. Aus technischer Sicht resultierte die nachstehende Schlussfolgerung:

„Das technische Gutachten (Prof. Peter Leuthold und Dr. Jürgen Kemper, ethz) weist allerdings nach, dass sich mit einem gemeinsamen und damit qualitativ besseren Funknetz vorerst kaum eine massive Reduktion der Strahlenbelastung erzielen lässt. Die Verordnung über nichtionisierende Strahlung (NIS-Verordnung) schränkt die technische Umsetzung eines gemeinsamen Funknetzes ein. Die NIS-Verordnung setzt Parameter, die insgesamt zum paradoxen Ergebnis führen, dass vor allem in dicht besiedelten Gebieten noch mehr Antennenstandorte nötig sind. Um den grösstmöglichen Effekt eines einheitlichen Funknetzes zu erzielen, sollten deshalb – dies ein nicht voraussehbares, aber wichtiges Resultat des technischen Gutachtens – die NIS-Verordnung und/oder die Messvorschriften möglichst rasch angepasst werden. Damit könnte die Zahl der Antennenstandorte reduziert werden.“

Aus technischen Gründen wäre ein CSN (Common Shared Network) die beste Lösung. Bei dieser Variante werden das Funknetz (Radio Access Network) mit Antennenanlagen, Basisstationen und RNCs sowie ein Teil des Kernnetzes gemeinsam betrieben. Aufgrund der gemeinsam genutzten Frequenzen würden entscheidende übertragungstechnische Vorteile resultieren. Die Anzahl Zellen und Antennenstandorte wäre bei dieser Lösung am geringsten.

Im technischen Gutachten⁵⁴ wird eine hybride Lösung vorgeschlagen. Dabei wird das zu versorgende Gebiet mit grösseren Zellen lückenlos abgedeckt. In Gebieten mit hohem Verkehrsaufkommen (und meist auch sehr dichter Population) werden zusätzlich Cluster von Picozellen eingesetzt. Insbesondere für die grösseren Zellen würde sich ein gemeinsames Netz anbieten. Es ist jedoch zu beachten, dass dies nur an Standorten Sinn macht, an denen andere Funkdienste (z.B. GSM) keine Reduktion der NIS-Grenzwerte bewirken. In Stadtzentren, Bahnhofshallen, Flughäfen, Geschäftsgebäuden, Kaufhäusern, usw. wird dieses gemeinsame Netz durch Picozellen ergänzt, die mit sehr geringen Sendeleistungen (20 – 100 mW) betrieben werden. Für diese Picozellencluster ist ein gemeinsamer Betrieb kaum sinnvoll. Diesbezüglich ergeben sich jedoch Probleme mit der

⁵³ Dr. U. Wagschal: „Ein gemeinsames Funknetz für UMTS in der Schweiz“, avenir suisse, März 2002.

⁵⁴ Prof. P. E. Leuthold, Dr. J. Kemper: „Ein gemeinsames Funknetz für UMTS in der Schweiz – technische Aspekte“, avenir suisse, März 2002.

Strahlungsbelastung, da Grenzwerte der NIS-Verordnung unabhängig vom Sharing-Prinzip meist erreicht werden.

„Grundsätzlich ergeben sich Probleme hinsichtlich der gemäss NIS-Verordnung maximal erlaubten Strahlungsleistungsdichte vor allem in Zonen mit grossem Verkehrsaufkommen, wo auch die Population am dichtesten ist. Hier wird auf jeden Fall – auch bei Einzelnetzen – die durch die NIS-Verordnung gesetzte Limite erreicht, zumal die bereits bestehende Mobilfunkstrahlungsbelastung zu berücksichtigen ist.“

Wie erwähnt kommt ein Common Shared Network im Vergleich zu einer Lösung mit separat betriebenen Netzen mit einer geringeren Zellenzahl und damit Zahl der Antennenstandorte aus. Bei einem Szenario mit $n = 3$ Operatoren, $v = 2$ Frequenzen pro Zelle und einem Reduktionsfaktor von $q = 1/6$ ergibt sich eine um den Faktor

$$\frac{10.4}{3.46} = 3$$

reduzierte Anzahl Zellen⁵⁵.

Zusätzlich senkt Network Sharing die mittlere Gesamtsendeleistung im betrachteten Versorgungsgebiet. Da der Energieverbrauch erheblich von der Anzahl Zellen und (in weniger starkem Masse) von der Sendeleistung abhängt, ist durch ein Common Shared Network auch einer wesentliche Verringerung des Energieverbrauchs zu erwarten. Dabei ist der Energiebedarf der Picozellen bei einer hybriden Lösung jedoch nicht berücksichtigt.

9.8. ANPASSUNG DER NISV

Die Immissionsgrenzwerte der Schweiz entsprechen – wie in den meisten europäischen Ländern – den von der ICNIRP (Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierenden Strahlen) empfohlenen Grenzwerten. In der Schweiz müssen die Anlagen so betrieben werden, dass sie die im Anhang 1 der NIS-Verordnung genannten Anlagegrenzwerte einhalten. Wie die Tabelle 30 zeigt, beinhalten diese hohe Sicherheitsfaktoren und sind um den Faktor zehn strenger (bezogen auf die Feldstärke) als die Immissionsgrenzwerte.

Frequenz	Immissionsgrenzwert	Anlagegrenzwert
900 MHz	41 V/m	4 V/m
1800 MHz	58 V/m	6 V/m
2100 MHz	61 V/m	6 V/m

Tabelle 30: Immissions- und Anlagegrenzwerte für die Schweiz

Mehrere Anlagen werden als Gesamtanlage behandelt, wenn sie innerhalb des Anlageperimeters liegen. Gemäss den Empfehlungen des BUWALS⁵⁶ (heute BAFU) handelt sich dabei nicht um einen fixen Abstand, vielmehr hängt dieser von der Frequenz, Strahlungsstärke und -richtung der Antenne ab (Anlageperimeter-Modell). Die Rechtmässigkeit dieser Definition wurde jedoch vom Bundesgericht kürzlich angezweifelt⁵⁷: „Genau wie das Isolinien-Modell bedürfte dieses Modell deshalb einer

⁵⁵ Vgl. Tabelle 4.II, aus Prof. P. E. Leuthold, Dr. J. Kemper: „Ein gemeinsames Funknetz für UMTS in der Schweiz - technische Aspekte“, avenir suisse, März 2002.

⁵⁶ „Mobilfunk- und WLL-Basisstationen. Vollzugsempfehlung zur NISV.“ Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern, 2002

⁵⁷ Urteil des Bundesgerichts 1C.40/2007 vom 6. November 2007.

vorherigen Änderung der NISV, die bislang nicht erfolgt ist.“ Vorgeschlagen wird im Urteil: „Diese Widersprüche werden vermieden, wenn auf einen fixen Abstand abgestellt wird.“

Keine Rolle spielen bei der Anlagedefinition die Besitzverhältnisse der Antennen⁵⁸. Auch Sendeantennen verschiedener Mobilfunk- oder WLL-Betreiber bilden zusammen eine Anlage, sofern sie sich auf dem gleichen Mast oder Dach oder innerhalb des Anlageperimeters befinden.

Wird ausschliesslich der Energieverbrauch berücksichtigt, so muss festgestellt werden, dass die Grenzwerte der NIS-Verordnung gewisse Massnahmen erschweren oder gar verunmöglichen, die zu einer Energieeinsparung führen würden. Eine Lockerung oder Anpassung der NIS-Verordnung würde beispielsweise das Site-Sharing insofern interessanter machen, als die gemeinsame Nutzung der Infrastruktur nicht notwendigerweise zu einer Reduktion der Sendeleistungen und damit einer Verkleinerung der Zellen führen würde. Die Anzahl Standorte könnte dadurch verringert und Energie eingespart werden.

Vor allem im Zusammenhang mit UMTS ist es ungünstig, dass die NIS-Verordnung Grenzen für die Maximalleistung vorschreibt. Aufgrund der bei CDMA-Netzen zwingend notwendigen Leistungsregelung ist die über längere Zeit gemittelte Leistung bei UMTS in der Regel deutlich kleiner als die maximal geplante Leistung bei hohem Verkehrsaufkommen. Bei der Planung der Netze kann diese an sich vorteilhafte Eigenschaft jedoch nicht ausgenutzt werden, da die Grenzwerte für die maximalen Werte der Sendeleistung berechnet werden.

Voraussichtlich ebenfalls ungünstig wäre es, den Anlageperimeter als konstanten Wert, unabhängig von Sendeleistung und Antennenstrahlrichtung zu definieren, wie dies vom Bundesgericht angeregt wurde. Dies könnte insbesondere den Einsatz von Picozellen, die mit sehr bescheidenen Sendeleistungen von unter 100 mW senden, erschweren.

Selbstverständlich ist zu berücksichtigen, dass die NIS-Verordnung dem politischen Wunsch entspricht, die Bevölkerung vor eventuellen gesundheitlichen Risiken der elektromagnetischen Strahlung zu schützen. Es ist deshalb fraglich, ob die Verordnung nur deshalb abgeändert werden soll um Energie zu sparen.

⁵⁸ vgl. Urteil des Bundesgerichts 1A.10/2001 vom 8. April 2002.

10. AUSBLICK UND OFFENE FRAGEN

Im Rahmen des Projekts wurde eine Vielzahl von interessanten Messungen, Daten und Resultaten erarbeitet. Allerdings muss auch festgestellt werden, dass das Thema „Energieverbrauch der mobilen Kommunikation“ nicht im entferntesten abschliessend behandelt werden konnte. Dazu war die Fragestellung zu umfangreich, zu komplex und das Problem zu vielschichtig. Gewisse erste Erkenntnisse und Schlussfolgerungen sind zwar durchaus möglich, viele Fragen bleiben jedoch noch ungeklärt.

Die Anzahl gemessener Netzelemente war vergleichsweise klein. Ob die aus den Messungen gezogenen Verallgemeinerungen tatsächlich zutreffen ist deshalb ungewiss. Dazu müssten umfangreichere und detailliertere Messungen, unter Umständen auch bei anderen Betreibern, durchgeführt werden. Zudem ist UMTS immer noch in der Startphase. Ob die diesbezüglichen Messungen repräsentativ sind, müsste gründlicher abgeklärt werden. Schliesslich könnten zusätzliche Erkenntnisse (insbesondere Einfluss der Jahreszeit) durch längerfristige Messungen gewonnen werden. Zusammenfassend muss gesagt werden, dass die Basis der Messdaten noch relativ klein ist und weitere Messungen sinnvoll wären.

Ein grosser und wesentlicher Komplex, der im Rahmen des Projekts nur sehr oberflächlich behandelt werden konnte, ist die Frage der Klimatisierung. Es war nicht das Ziel des Projekts, den Energiebedarf der Klimatisierung im Detail zu untersuchen. Wie erwartet, zeigen die durchgeführten Messungen, dass dieser Energiebedarf einen wesentlichen Anteil darstellt und dass dessen Optimierung erfolgversprechend ist. Detailliertere Untersuchungen hinsichtlich der Klimatisierung wären deshalb wünschenswert.

Der Schwerpunkt der Messungen betraf den Energieverbrauch der Netzelemente auf den Basisstationen. Messungen der Netzelemente im Kernnetz (core) wurden nur punktuell durchgeführt, so dass auch hier noch ein Nachholbedarf besteht. Insbesondere ist unklar, wie sich die neuen Technologien im Rahmen des Next Generation Networks auf den Gesamtenergieverbrauch auswirken werden. Beim NGN sollen sämtliche Dienste miteinander verheiratet werden, was es sehr schwierig macht, den Anteil der mobilen Kommunikation zu identifizieren. Die Untersuchung des Energiebedarfs des Kernnetzes ist folglich ein vielschichtiges Problem, das in einem gesonderten Forschungsprojekt behandelt werden müsste. Die Beschränkung auf mobile Dienste dürfte in diesem Zusammenhang nicht zweckmässig sein.

In den kommenden Jahren wird eine Verschiebung von GSM auf UMTS zu beobachten sein. Interessant in diesem Zusammenhang ist die Frage, welche Ablösungsszenarien energetisch vorteilhaft sind. Durch den Einsatz von UMTS900 kann die Migration von GSM nach UMTS bei praktisch unveränderten Ausbreitungsbedingungen erfolgen. Insbesondere die im Vergleich zu 2.1 GHz kleinere Freiraumdämpfung und die bessere Eindringung in Gebäude dürfte hierbei von Interesse sein. Gleichzeitig sollte darauf geachtet werden, dass auch während der Umstellung die Basisstationen möglichst gut ausgelastet sind. Es ist anzunehmen, dass für die Planung der Ablösungsszenarien die energetischen Aspekte von untergeordneter Bedeutung sind. Dennoch wäre es aufschlussreich, verschiedene Ablösungsszenarien auch auf ihre energetischen Folgen zu untersuchen.

Der Vergleich der unterschiedlichen Technologien (GSM, UMTS, zukünftige Technologien) erwies sich als heikel. Die Eigenschaften hinsichtlich Ausbreitungsbedingungen, Verkehrsaufkommen, Datenrate, Sendeleistung, Zellengrösse, Effizienz der Basisstationen, usw. sind sehr unterschiedlich und erschweren einen fairen Vergleich in Bezug auf den Energieverbrauch. Auch diese Fragestellung wäre ein lohnendes Gebiet für detailliertere Forschungen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Problemstellung des vorliegenden Projekts sehr weit gefasst war. Dementsprechend konnten zwar einige interessante Ergebnisse erarbeitet werden, die diverse Schlussfolgerungen und Vermutungen zulassen. Allerdings blieben sehr viele interessante Fragen ungeklärt oder wurden sogar neu aufgeworfen. Für deren detaillierte Analyse müssten Forschungsprojekte mit deutlich engerer Fragestellung durchgeführt werden.

Anhang A: GRUNDBEGRIFFE DER DRAHTLOSEN KOMMUNIKATION

Thema des Projekts war die Untersuchung des Energiebedarfs der mobilen Kommunikation. Der Bericht setzt deshalb Grundkenntnisse hinsichtlich der drahtlosen Datenübertragung voraus. Um dem Leser ohne diesbezügliches Expertenwissen das Verständnis zu erleichtern, werden in diesem Kapitel einige Grundlagen der drahtlosen Datenübertragung in geraffter Form dargestellt. Neben einigen zentralen Begriffen sollen insbesondere die Ausbreitungsbedingungen, die wichtigsten Modulations- und Mehrfachzugriffsverfahren erläutert werden. Dabei beschränken wir uns auf den interessierenden Frequenzbereich zwischen 900 MHz und 2 GHz.

Ausbreitungsphänomene

Im Jahr 1864 veröffentlichte der schottische Physiker James Clark Maxwell unter dem Titel „A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field“ einen Artikel, in dem er das Verhalten von elektromagnetischen Feldern beschrieb. Er gab dazu ein System von zwanzig Gleichungen an, die wir heute, dank verbesserter Notation, auf vier Gleichungen reduzieren können. Seine Erkenntnisse sind jedoch auch heute noch uneingeschränkt gültig. Aufgrund von theoretischen Überlegungen sagte Maxwell schon damals die Existenz von elektromagnetischen Wellen voraus, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Einige Jahre später gelang es dem deutschen Physiker Heinrich Hertz, die vorhergesagten Wellen experimentell nachzuweisen. Er schuf so die Grundlage für die drahtlose Kommunikation, die vor allem durch Guglielmo Marconi bis zur kommerziellen Anwendung weiterentwickelt wurde.

Aus den Maxwell-Gleichungen folgt, dass jede Stromänderung, d.h. jede Beschleunigung einer elektrischen Ladung ein elektromagnetisches Feld bewirkt. Diese Felder breiten sich mit einer Geschwindigkeit aus, die vom Ausbreitungsmedium abhängt. Im Vakuum (und näherungsweise in der Luft) ist sie mit 300'000 km/s am grössten. Die elektromagnetischen Wellen transportieren Energie durch den leeren Raum und können deshalb zur Übertragung von Information genutzt werden, was die Grundlage der drahtlosen Kommunikation darstellt.

ERP, Freiraumdämpfung

Die Leistungsdichte $S(r)$ einer elektromagnetischen Welle, die sich völlig ungehindert ausbreiten kann, nimmt mit zunehmenden Abstand r vom Sender gemäss der Beziehung

$$S(r) = G_{TX} \cdot \frac{P_{TX}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{EIRP}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

ab. Dabei bezeichnet P_{TX} die Sendeleistung und G_{TX} den Antennengewinn der Sendeantenne in Bezug auf einen isotropen Strahler⁵⁹. Aus der obigen Beziehung geht hervor, dass die Wirkung am Empfangsort offensichtlich vom Produkt aus Sendeleistung und Antennengewinn abhängt. Dieses Produkt wird als Equivalent Isotropic Radiated Power (EIRP) bezeichnet. Wird als Bezugsantenne nicht der isotrope Strahler sondern ein Halbwellendipol gewählt, so wird das Produkt als Equivalent Radiated Power (ERP) bezeichnet. Da ein Halbwellendipol im Vergleich zum isotropen Strahler einen um den Faktor 1.64 höheren Gewinn aufweist, unterscheiden sich EIRP und ERP nur durch diesen konstanten Faktor.

Eine Empfangsantenne kann dem Feld eine Leistung entnehmen, die proportional zur Leistungsdichte der Welle am Empfangsort ist. Besitzt die Empfangsantenne den Gewinn G_{RX} , so resultiert für die Empfangsleistung

⁵⁹ Ein isotroper Strahler ist eine fiktive Antenne, die in alle Raumrichtungen gleichmässig abstrahlt.

$$P_{RX} = G_{RX} \cdot \frac{f^2}{4 \cdot \pi \cdot c^2} \cdot G_{TX} \cdot \frac{P_{TX}}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

Als Freiraumdämpfung wird das Dämpfungsmass zwischen Sende- und Empfangssignal im hindernisfreien Raum, ausgedrückt in dB, bezeichnet. Dieses errechnet sich demnach wie folgt:

$$10 \cdot \log\left(\frac{P_{TX}}{P_{RX}}\right) = -147.6 \text{ dB} + 20 \cdot \log\left(\frac{r}{1 \text{ m}}\right) + 20 \cdot \log\left(\frac{f}{1 \text{ Hz}}\right) - 10 \cdot \log(G_{TX}) - 10 \cdot \log(G_{RX}) .$$

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass die Freiraumdämpfung bei einer Verzehnfachung der Frequenz f um 20 dB zunimmt. Daraus folgt, dass die Freiraumdämpfung für UMTS auf 2.1 GHz etwa 7.3 dB höher ist im Vergleich zu UMTS 900.

Mehrwegeausbreitung

Das Vorhandensein einer direkten Sichtverbindung (LOS – line of sight) kann bei der Mobilkommunikation meist nicht vorausgesetzt werden. Das vom Sender ausgestrahlte Signal wird vielmehr an Gebäuden, Fahrzeugen, und an Bodenerhebung reflektiert oder gestreut, was dazu führt, dass der Empfänger mehrere, unterschiedlich verzögerte und abgeschwächte Kopien des Sendesignals empfängt. Typische Auswirkungen dieser Mehrwegeausbreitung sind frequenzabhängige Verzerrungen des Empfangsspektrums (frequenzselektiver Schwund) und zeitliche Verschmierung der gesendeten Einzelsymbole (Intersymbolinterferenz).

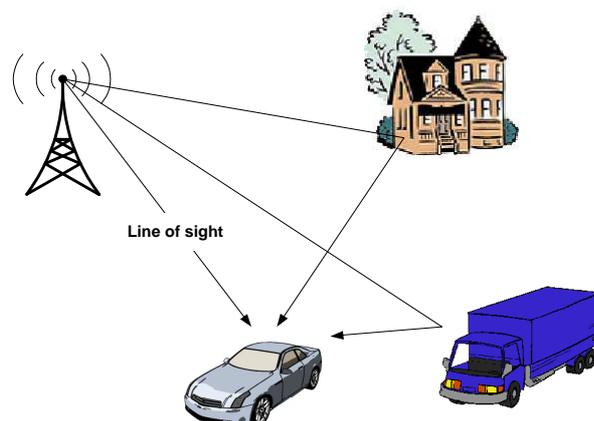


Abbildung 37: Mehrwegeausbreitung

Bei der Mobilkommunikation hängen die tatsächlichen Reflexionsverhältnisse sowohl vom Ort als auch von der Zeit ab. Deshalb muss ein Empfänger mit dauernd wechselnden, frequenzabhängigen Amplitudenverzerrungen zu recht kommen. Diese Eigenschaft des Übertragungskanal wird als frequenzselektiver Schwund bezeichnet und ist eine direkte Folge der Mehrwegeausbreitung.

Ein weiterer Effekt der Mehrwegeausbreitung ist die Verschmierung des Sendepuls. Bei der digitalen Übertragung strahlt der Sender während jeweils einer Symboldauer ein bestimmtes Signal aus, welches das zu übertragende Symbol repräsentiert. Das vom Sender ausgestrahlte Signal trifft aufgrund der Mehrwegeausbreitung mehrfach und zu unterschiedlichen Zeiten beim Empfänger ein. Das resultierende Empfangssignal dauert somit länger als eine Symbolperiode. Es kommt zu einer Störung der nachfolgenden Signale, was als Intersymbolinterferenz bezeichnet wird.

Weitere Ausbreitungseffekte

Weitere Ausbreitungseffekte, die bei der mobilen Kommunikation eine Rolle spielen können sind:

- Brechung:
Richtungsänderungen der elektromagnetischen Welle aufgrund inhomogener Ausbreitungsmedien und daraus resultierenden Änderungen der Ausbreitungsgeschwindigkeit.

- **Beugung:**
Ablenkung von elektromagnetischen Wellen an einem (scharfkantigen) Hindernis. Aufgrund der Beugung werden im geometrischen Schattenraum eines Hindernisses elektromagnetische Wellen beobachtet, die bei rein geradliniger (optischer) Ausbreitung nicht vorhanden wären.
- **Streuung:**
Ablenkung einer elektromagnetischen Welle durch Wechselwirkung mit Objekten, die einen im Vergleich zur Wellenlänge kleinen Durchmesser besitzen.
- **Dopplereffekt:**
Der nach dem österreichischen Physiker und Mathematiker Christian Doppler (1803 – 1853) benannte Effekt bewirkt, dass sich die Frequenz der vom Sender ausgestrahlten Welle von der beim Empfänger beobachteten Frequenz unterscheidet.

Mehrfachzugriffsverfahren

Der gleichzeitige Gebrauch eines Übertragungsmediums durch verschiedene Benutzer wird als Mehrfachzugriff (Multiple Access) bezeichnet. Entsprechende Verfahren regeln den Zugriff auf das gemeinsame Medium. Dabei wird vor allem auf Effizienz und Fairness Wert gelegt. In der drahtlosen Kommunikation unterscheidet man zwischen Raum-, Zeit-, Frequenz- und Codemultiplex.

Space Division Multiple Access

Beim Mehrfachzugriff mit Raummultiplex werden die Teilnehmer örtlich getrennt und können so die gleichen Frequenzen zur gleichen Zeit benutzen. Damit es nicht zu Störungen kommt, muss jeweils ein gewisser Schutzabstand eingehalten werden.

SDMA wird beispielsweise in den landesweiten Mobilfunknetzen praktiziert. Das Gebiet wird dazu in Zellen unterteilt, welche jeweils durch eine Basisstation versorgt werden. Die einer Zelle zugeordneten Frequenzen dürfen in den direkt benachbarten Zellen nicht verwendet werden. In Zellen mit genügendem Abstand dürfen jedoch wiederum die gleichen Frequenzen verwendet werden. Durch die Aufteilung in Zellen resultieren die folgenden Vorteile:

- Je kleiner die Zellen gewählt werden, desto öfter kann die gleiche Frequenz wiederverwendet werden. Daraus ergibt sich eine höhere Gesamtkapazität.
- Die kleineren Distanzen zwischen Basisstation und Mobiltelefon erlauben vergleichsweise geringe Sendeleistungen. Ein Vorteil, der insbesondere in der Mobilfunktechnik entscheidend ist.
- Fällt eine Basisstation aus, so ist nicht das ganze Netz sondern nur eine Zelle betroffen.
- Störungen sind in kleinen Zellen mit wenigen Teilnehmern weniger wahrscheinlich.

Als Nachteil muss erwähnt werden, dass die Unterteilung in Zellen natürlich eine umfangreiche Infrastruktur bedingt. Zudem muss das Problem gelöst werden, dass ein Teilnehmer beim Wechsel von einer Zelle in die nächste unterbrechungsfrei weiter telefonieren kann, was als „Handover“ bezeichnet wird. Schliesslich erfordert die Frequenzplanung sehr viel Know-How. Die Zellen sind in der Realität keineswegs regelmässig. Ihre Ausdehnung wird durch die Topologie und die Bebauung des Geländes sowie durch die Richtcharakteristik der Antenne und die Sendeleistung beeinflusst.

In GSM-Netzen beträgt der Zellradius zwischen wenigen Hundert Metern und maximal 35 km.

TDMA – Time Division Multiple Access

Eine Möglichkeit, wie sich verschiedene Benutzer die gleiche Frequenz teilen können, ist die Aufteilung der Gesamtübertragungsdauer in nicht überlappende Zeitschlitz. Jedem Benutzer stehen dann jeweils gewisse Zeitschlitz zur Verfügung, während derer er Senden darf. Da sich die Abfolge der Zeitschlitz meist periodisch wiederholt, werden sie in der Regel in Zeitrahmen zusammengefasst.

Bei GSM ist der TDMA-Rahmen (Wiederholungsdauer: 4.6154 ms) in acht Zeitschlitz aufgeteilt. Pro Kanal stehen also acht logische Kanäle mit einer Bruttodatenrate von je 24.7 kbit/s zur Verfügung. Zur

Übertragung eines (komprimierten) Sprachsignals werden, inklusive Fehlerkorrektur, 22.8 kbit/s benötigt. Der Rest wird für einen langsamen, assoziierten Signalisierungskanal (SACCH) benötigt. Mindestens ein Zeitschlitz pro Basisstation wird für Signalisierungs- und Steuerungsaufgaben beansprucht.

FDMA – Frequency Division Multiple Access

FDMA ist ein Mehrfachzugriffsverfahren unter Verwendung von Frequenzmultiplex. Dabei wird die verfügbare Gesamtbandbreite in Kanäle unterteilt, die jeweils durch einen Schutzabstand voneinander getrennt sind. Der Mehrfachzugriff wird dadurch ermöglicht, dass die Benutzer unterschiedliche Kanäle belegen. Typisches Beispiel für die Anwendung von FDMA sind die Rundfunkstationen, die in einem bestimmten Gebiet durch unterschiedliche Sendefrequenzen getrennt werden.

Bei GSM stehen in der Regel pro Zelle mehrere Frequenzkanäle von je 200 kHz Bandbreite zur Verfügung. Um Störungen zu vermeiden, verwenden benachbarte Zellen nicht die gleichen Frequenzen. Jeder Kanal wird überdies in acht Zeitschlitzte aufgeteilt und kann so mit bis zu acht Benutzern belegt werden. Im Gegensatz zum Rundfunk besteht bei GSM die Möglichkeit, die Frequenz, welche ein Benutzer benutzt, nach jedem Zeitschlitz zu wechseln. Dies wird als langsames Frequenzhüpfen (Slow Frequency Hopping) bezeichnet und verbessert das Systemverhalten bei Vorhandensein von frequenzselektivem Schwund.

CDMA – Code Division Multiple Access

Bei UMTS wird als Mehrfachzugriffsverfahren CDMA eingesetzt. Dabei werden die Benutzer durch individuelle Codes voneinander unterschieden.

Das gebräuchlichste CDMA-Verfahren ist die Direct Sequence Spreiztechnik (DSSS), bei welcher das zu übertragende Nutzsignal mit einer Spreizsequenz multipliziert wird. Die Spreizsequenz ist eine Folge von pseudozufälligen binären Symbolen, so genannten Chips. Da die Dauer eines Chips in der Regel deutlich kürzer als die Symboldauer ist, wird durch die Multiplikation mit der Spreizsequenz das Spektrum des Nutzsignals gespreizt. Eine Trennung der Benutzer ist dann durch Zuordnung unterschiedlicher Spreizsequenzen und Anwendung von Korrelationsverfahren im Empfänger möglich. Allerdings ist es schwierig, Mengen von vollständig orthogonalen Spreizsequenzen zu finden, weshalb zwischen den einzelnen Benutzern Mehrfachzugriffsinterferenzen entstehen. Aufgrund des pseudozufälligen Charakters der Spreizsequenz empfindet ein Benutzer die Signale der anderen Teilnehmer als zusätzliches Rauschen. Die Übertragungsqualität in der Zelle verschlechtert sich mit zunehmender Anzahl der Teilnehmer allmählich.

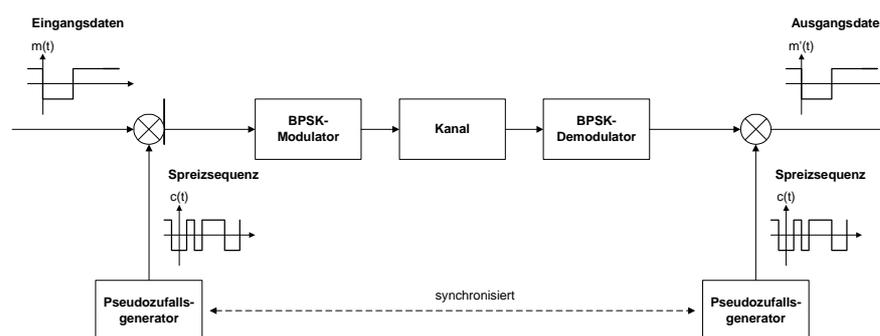


Abbildung 38: Prinzip der DSSS-Technik

UMTS verwendet zwei Klassen von Spreizcodes. Im Downlink, also von der Basisstation zum Mobilteilnehmer, ist es einfach die Spreizsequenzen für die einzelnen Teilnehmer miteinander zu synchronisieren, da die Signale ja alle von der Basisstation erzeugt werden. Es ist deshalb auch möglich, im Downlink die Unterscheidung der Teilnehmer durch vollständig orthogonale Sequenzen zu realisieren. Dazu werden die so genannten Channelizationcodes eingesetzt. Diese versagen jedoch völlig, falls die Signale nicht untereinander synchronisiert werden können. Da im Uplink eine Synchronisation kaum möglich ist, muss zur Trennung der Teilnehmer ein weiterer Trick angewandt werden. Die Signale werden zwar mit den Channelizationcodes gespreizt, zusätzlich aber auch mit einem benutzerabhängigen Scramblingcode „verwürfelt“. Letztere dient im Uplink zur Unterscheidung der Signale.

Ein wesentlicher Vorteil von CDMA ist, dass die Benutzer weder zeitlich, noch örtlich noch frequenzmässig voneinander getrennt werden müssen. Daher kann auf eine Frequenzplanung verzichtet werden und es werden auch nur vergleichsweise wenige Frequenzkanäle benötigt (In der Schweiz insgesamt 12 Kanäle für UMTS). Allerdings belegt ein Kanal aufgrund der Spreizung des Spektrums eine deutlich grösser Bandbreite als das schmalbandige Nutzsignal. Beispielsweise beträgt die Chiprate bei UMTS, unabhängig von der genutzten Datenrate, 3.84 Mchips/s, woraus eine Bandbreite von ca. 5 MHz folgt.

Bei CDMA ist das so genannte Near-Far-Problem zu beachten. Damit die Basisstation die Signale der einzelnen Mobilteilnehmer einwandfrei trennen kann, dürfen sich die Signalstärken nicht allzu stark unterscheiden. Es ist deshalb unumgänglich, mit Hilfe einer Leistungsregelung dafür zu sorgen, dass die Basisstation alle Signale, unabhängig von der Entfernung, gleich stark empfängt.

Verkehrstheorie

Erlang

Das Erlang (Erl) wurde 1946 international als Einheit für den Verkehrswert definiert und nach dem dänischen Ingenieur Agner Karup Erlang (1878 – 1929), einem Begründer der Verkehrstheorie, benannt. Der Verkehrswert ist die mittlere Anzahl gleichzeitig bestehender Belegungen und kann als Quotient aus Verkehrsmenge und Beobachtungsdauer berechnet werden. Unter Belegung versteht man in diesem Zusammenhang die Inanspruchnahme eines vermittlungstechnischen Betriebsmittels, also beispielsweise einer leitungsvermittelten Verbindung oder einer anderen Ressource.

Werden über eine Vermittlungsstelle beispielsweise in einer Stunde 500 Gespräche vermittelt, die jeweils 2 Minuten dauern, so ergibt sich ein Verkehrswert von

$$y = \frac{500 \text{ Gespräche/Stunde} \cdot 2 \text{ Minuten / Gespräch}}{60 \text{ Minuten/Stunde}} = 16.67 \text{ Erlang .}$$

Etwas was salopp ausgedrückt entspricht ein Erlang dem Verkehr, der einen Nachrichtenkanal im Mittel komplett auslastet.

Legt man für die statistische Verteilung der Verbindungswünsche der Nutzer ein statistisches Modell zugrunde, so kann aus der Kenntnis des Verkehrswerts die Blockierungswahrscheinlichkeit des Betriebsmittels berechnet werden.

Anhang B: ABDECKUNGSGRAD VON AD-HOC NETZEN

Im Nachfolgenden soll erläutert werden, wie der Abdeckungsgrad von ad-hoc Netzen abgeschätzt wurde. Wir gehen dabei von den folgenden Vereinfachungen aus.

- Das von einem Router versorgte Gebiet ist immer gleich gross.
- Die Standorte der Router werden zufällig gewählt.
- Ein Gebiet gilt als versorgt, wenn es sich im Versorgungsgebiet von mindestens einem Router befindet.

Die Gesamtfläche wird in N gleich grosse Teilflächen unterteilt. Jeder WLAN-Router versorgt n Teilflächen, wobei sich die versorgten Teilflächen der einzelnen Router durchaus überlappen können. Wir wollen annehmen, dass nach dem zufälligen Setzen von k Routern $M(k)$ Teilflächen versorgt sind.

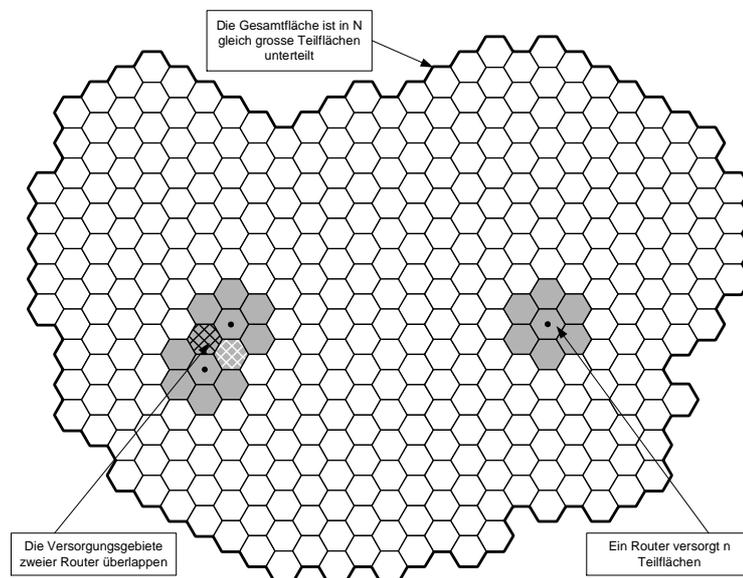


Abbildung 39: Mögliche Abdeckung einer Gesamtfläche mit WLAN-Routern

Die Menge der N Teilflächen, welche die Gesamtfläche bilden, kann als dichotom (zweigeteilt) betrachtet werden, da eine Teilfläche entweder versorgt oder nicht versorgt ist. Beim Setzen des $k + 1$ -ten Routers werden aus dieser Menge n neue Teilflächen (ohne Zurücklegen) ausgewählt. Die Wahrscheinlichkeit, dass davon x Teilflächen schon versorgt sind, ist durch die hypergeometrische Verteilung

$$P(X = x) = \begin{cases} \frac{\binom{M(k)}{x} \cdot \binom{N - M(k)}{n - x}}{\binom{N}{n}} & \text{für } x = 1, 2, \dots, n \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

gegeben. Durchschnittlich werden also

$$n - E[X] = n \cdot \left(1 - \frac{M(k)}{N}\right)$$

neue Teilflächen versorgt. Es resultiert die Differenzgleichung

$$M(k+1) = M(k) + n \cdot \left(1 - \frac{M(k)}{N}\right)$$

mit der Lösung

$$M(k) = N \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{n}{N}\right)^k\right).$$

Für $n \ll N$ kann die folgende Näherung verwendet werden

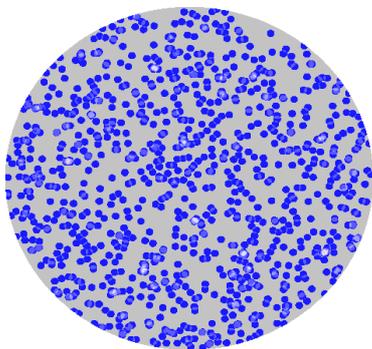
$$M(k) \approx N \cdot \left(1 - e^{-k \cdot \frac{n}{N}}\right),$$

woraus für den Abdeckungsgrad

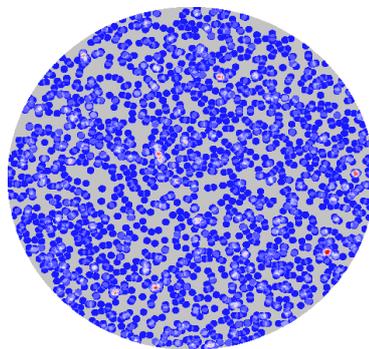
$$\eta(k) = \frac{M(k)}{N} = 1 - e^{-k \cdot \frac{n}{N}}$$

folgt.

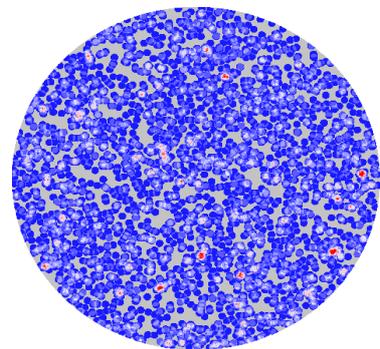
Die mit $n/N = 0.000426$ durchgeführten Simulationen (vgl. Abbildung 40) bestätigen die theoretischen Resultate sehr gut.



Abdeckung $\eta = 34.9\%$ mit
 $k = 1000$ Routern



Abdeckung $\eta = 57.6\%$ mit
 $k = 2000$ Routern



Abdeckung $\eta = 72.2\%$ mit
 $k = 3000$ Routern

Abbildung 40: Simulationen des Abdeckungsgrads für $n/N = 0.000426$.

REFERENZEN

- [1] Quelle: BFS, Neuchâtel 2003 - Eidgenössische Volkszählungen.
- [2] Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2006, Bundesamt für Energie
- [3] Amtliche Fernmeldestatistik 2005 des Bakoms, 5. 02. 2007.
- [4] Fernmeldestatistik, Entwicklung bis zum 31.12.2006 für bestimmte Indikatoren, Sammlung aus diversen Quellen, Bakom, Mai 2007.
- [5] Medienmitteilung der Eidgenössischen Kommunikationskommission (ComCom) vom 22.03.2007.
- [6] UMTS Forum Report 38: „Coverage Extension Bands for UMTS/IMT-2000 in the bands between 470-600 MHz“
- [7] ABI Research: „Femtocell Access Points: Fixed-Mobile Convergence for Residential, SMB, and Enterprise Markets“
- [8] „Picocells and Femtocells: will indoor base stations transform the telecoms industry?“, März 2007.
- [9] Bundesamtes für Gesundheit (BAG): „Risikopotential von drahtlosen Netzwerken“, Januar 2007.
- [10] Bundesamt für Umwelt (BAFU): „Hochfrequente Strahlung und Gesundheit. Bewertung von wissenschaftlichen Studien im Niedrigdosisbereich“. 2. aktualisierte Aufl. 2007.
- [11] NZZ am Sonntag: „Drahtloses Internet, gratis und überall“, S. 15, 3. 10. 2006.
- [12] Cash-Daily: „Luftangriff auf Handy- und Internet-Tarife“, 30. 04. 2007.
- [13] Tagesanzeiger: „Wald, Wiesen, WLAN – das WWW der Riederalp“, 17. 04. 2007.
- [14] Statistisches Jahrbuch der Stadt Zürich, 2003
- [15] Statistisches Jahrbuch der Stadt Zürich, 2005, S. 195.
- [16] ITU-T Recommendation Y.2001
- [17] 3GPP TS 23.228 V8.1.0 (2007-06)
- [18] RFC 3261
- [19] RFC 3588
- [20] Qualcomm, Telefónica España and Huawei Technologies Complete UMTS/HSDPA 900 MHz Field Trial (www.qualcomm.com/press/releases/2008/080211_UMTS900_field_trial.html)
- [21] Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung vom 23. Dezember 1999 (Stand am 1. Januar 2008)
- [22] Bundesgerichtsurteil 1C.40/2007 vom 6. November 2007

- [23] „Mobilfunk- und WLL-Basisstationen. Vollzugsempfehlung zur NISV.“ Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern, 2002
- [24] Dr. U. Wagschal: „Ein gemeinsames Funknetz für UMTS in der Schweiz“, avenir suisse, März 2002.
- [25] Prof. P. E. Leuthold, Dr. J. Kemper: „Ein gemeinsames Funknetz für UMTS in der Schweiz – technische Aspekte“, avenir suisse, März 2002.
- [26] Energy an Cost Savings with fresh Air Cooling Systems (swisscom Innovations comtec 06/05)