



universität
wien

MAGISTERARBEIT

Titel der Magisterarbeit

„TELEKOMMUNIKATION LITERATURSAMMLUNG“

Verfasser

Alexander Wandler, Bakk.

angestrebter akademischer Grad
Magister rerum socialium oeconomicarumque

Wien, im Februar 2008

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 066 915

Magisterrichtung lt. Studienblatt: Betriebswirtschaft

Betreuer: o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Richard F. Hartl

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung.....	1
2. Geschichte der Telekommunikation.....	2
3. Arten der Telekommunikation	4
3.1. Zellulare Mobilfunknetze (GSM-Netze).....	4
3.2. Schnurlostelefone	4
3.3. Bündelfunknetze	5
3.4. Pagensysteme.....	5
3.5. Satellitensysteme.....	5
3.6. GPRS.....	6
3.7. UMTS.....	6
4. GSM	6
4.1. Lizenzvergabe	7
5. UMTS	8
5.1. UMTS Lizenzvergabe.....	9
6. Standortentscheidungen für die Aufstellung von Basisstationen	10
6.1. Modellbeschreibung	13
6.2. Exkurs: Erlang und SIR.....	14
6.3. Exkurs: Zellengröße	16
6.4. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures	17
6.5. Tabu Search	18
6.6. Location-sensing Problem.....	21
6.7. Ergebnisse	23
7. Routing and Wavelength Assignment.....	24
7.1. Modellbeschreibung	24
7.2. Neue Heuristik für das min-RWA	25
7.3. Lösungsmethoden für große Wavelength-routed Optical Networks.....	25
7.3.1. Randomized Rounding	26
7.3.2. Graph Coloring.....	27
7.3.2.1. Sequential Algorithms.....	27
7.4. Ergebnisse	28
8. Antennen	28
8.1. Antennenwahl für die Basisstation.....	29
8.2. Leistungskriterien.....	29
8.3. Diversität	30
8.4. Installation von Antennen	31
8.5. Toleranz bei der Antennenaufstellung.....	32
8.6. dBi und dBd	33
9. Frequenzverteilung	34
9.1. Modellbeschreibung	34
9.2. Exkurs: Handover	36
9.3. Kapazitätsplanung	37
9.3.1. Optimale Lösungsmethoden.....	38
9.3.1.1. F-FAP.....	38
9.3.1.2. Max-FAP.....	39
9.3.1.3. MO-FAP	40
9.3.1.4. MS-FAP	41
9.3.1.5. MB-FAP	43
9.3.1.6. MI FAP	43

9.3.1.7. RL FAP	45
9.3.2. Heuristische Lösungsmethoden.....	45
9.3.2.1. Greedy-Verfahren	45
9.3.2.2. Local Search (LS)	46
9.3.2.3. Tabu Search (TS).....	49
9.3.2.4. Simulated Annealing (SA).....	51
9.3.2.5. Genetic Algorithm (GA)	53
9.3.2.6. Artificial Neural Networks (ANN).....	55
9.3.2.7. Ant Colony Optimization.....	56
9.3.2.8. Ad hoc.....	57
9.3.2.9. Graph Coloring Problem	57
9.3.2.10. T-Coloring.....	57
9.3.2.11. Dual Greedy.....	58
9.3.2.12. DSATUR With Costs	58
9.3.2.12. Iterated 1-OPT.....	58
9.3.2.13. Min-cost flow	58
9.3.3. Schlußbetrachtung	59
10. Lineare Programmierung von Netzwerken	59
10.1. Modellbeschreibung	60
10.2. Constant-interference case.....	60
10.3. Variable-interference case	63
10.4. Observations	65
11. Mangel an Frequenzen	66
11.1. Grundmodell.....	66
Anhang	68
Zusammenfassung	68
Lebenslauf	69
Literaturverzeichnis	70

1. Einleitung

Das Handy wurde in unserer heutigen Zeit ein wichtiger Bestandteil der modernen Telekommunikation. Jede Frau und jeder Mann auf dieser Welt nutzt diese mobile Kommunikationseinrichtung – sie ist unerlässlich geworden und die Erreichbarkeit ist dadurch weltweit gegeben. Die Erreichbarkeit ist auch dadurch gekennzeichnet, dass dies zu jeder Zeit und an jedem Ort möglich ist.

Um diese Form der Telekommunikation zu ermöglichen, wurden verschiedene Funknetzwerke aufgebaut und in Betrieb genommen. Vom A-Netz zum B-Netz und weiter zum C-Netz und zum D-Netz. Diese verschiedenen Funknetzwerke wurden später durch das heutige GSM-Netz (Global System for Mobile Communications) abgelöst – die Funktechnologie der zweiten Generation. Dieser Zweig der Kommunikation ist in unserer Welt rasant gewachsen und ständig einem technischen Wandel unterworfen. Zurzeit wird an der dritten Generation der Funktechnologie gearbeitet bzw. wurde diese schon in Betrieb genommen, nämlich das UMTS-Netzwerk (Universal Mobile Telecommunications Service).

Anfang der 80er Jahre hat sich die mobile Telekommunikation in verschiedenen Ländern der Erde entwickelt. Die erste Generation dieser neuen Form von Kommunikationsmöglichkeit basierte auf analoger Technologie, die nächste Generation basierte auf digitaler Technologie – GSM – zweite Generation.

Diese beiden Systeme versorgten bzw. versorgen die mobilen Teilnehmer bereits mit einer hohen Rate an Services und Datenvolumen.

Die dritte Generation heißt UMTS und dessen Hauptaufgabe ist es, die Kunden mit einem Breitband-Datenservice zu sorgen, als dies bisher mit dem GSM-Netz möglich war. Dies ist in einer Größenordnung von zwei Mbps möglich.¹

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Logistikproblemen der Telekommunikationsnetzwerke. Im ersten Teil werden die verschiedenen Systeme der

¹ vgl. Aretz K., Haardt M., Computer Networks, 2001, Seite 83

Funknetzwerke vorgestellt, welche in Österreich Anwendung fanden und zurzeit verwendet werden. Die Systeme GSM, GPRS und UMTS sind im Moment die gebräuchlichsten Funknetzwerke.

Es wird auch die Funktionsweise und die Architektur dieser unterschiedlichen Funknetzwerke dargestellt und inwieweit diese Technologien miteinander kooperieren.

Des Weiteren werden folgende Fragen behandelt:

- Standortprobleme der Basisstationen?
- Wie sieht die Konfiguration der Antennen aus?
- Welche Frequency Assignment Probleme (FAP) gibt es?

2. Geschichte der Telekommunikation

Im Jahre 1876 erfand der Kanadier Alexander Graham Bell (1847-1922) das Telefon. Er demonstrierte mit seiner Erfindung, dass es möglich war, sich mit zwei fix installierten Geräten bzw. Apparaten, welche mit zwei Drähten miteinander verbunden waren, zu verständigen.

Der deutsche Heinz Hertz (1857-1894) entdeckte im Jahre 1887 die Radiowellen.

In Bologna des Jahres 1896 führte Guglielmo Marconi (1874-1937) die erste Radio-Transmission mit Erfolg durch.

In Österreich begann die Ära der Mobilkommunikation Anfang Mai 1974 mit der Inbetriebnahme des "Öffentlichen beweglichen Landfunkdienstes" für Kraftfahrzeuge, dem so genannten **B-Netz**.

Das **C-Netz**, der Nachfolger des B-Netzes, wurde im November 1984 in Österreich in Betrieb genommen. Mit dem analogen Funknetz wurden die Mobiltelefone erstmals tragbar. Das Gewicht der Geräte war noch relativ hoch, es betrug noch einige Kilogramm. Das auch als "Autotelefonnetz C" bekannte Funknetz kam besonders an

Orten zum Einsatz, wo es sonst kein Telefon gab, wie z. B. im Auto oder im Wochenendhaus.

Der Hauptunterschied zum B-Netz bestand darin, dass es sich beim C-Netz um ein zelluläres System gehandelt hat. Durch die vielen Basisstationen waren geringere Sendeleistungen erforderlich, was wiederum zu einem geringeren Stromverbrauch führte. Dies bedeutete daher weniger Akkukapazität und somit gab es kleinere Geräte (Handies) für die mobilen Teilnehmer. Nun konnten auch Datenverbindungen über DATEX und Faxverbindungen hergestellt werden, jedoch nur mit einer geringeren Datenübertragungsrate von 2400 bit/s. Der Frequenzbereich war im 450 MHz-Band. Das C-Netz wurde in Österreich Ende 1997 abgeschaltet.

Die damalige Post und Telegraphenverwaltung (PTV) entschied sich 1990 (nach dem B- und C-Netz) ein weiteres analoges Mobilfunknetz in Betrieb zu nehmen - das **D-Netz**. Im Juli 1990 begann der Testbetrieb des D-Netzes in Wien und im November startete der reguläre Betrieb durch die österreichische Post- und Telegraphenverwaltung. Es wurde mit diesem Netz eine 100%ige Flächendeckung erreicht.

Das D-Netz wurde am 1. März 2002 abgeschaltet. Diese Maßnahme wurde notwendig, weil die Kunden immer mehr zum modernen GSM-Netz gewechselt waren – es war daher wirtschaftlich nicht mehr vertretbar dieses Netz weiterhin zu betreiben.

In Österreich startete das **GSM-Netz** im Dezember 1993 mit der Bezeichnung "E-Netz". 1998 wurde das erste DCS-1800 Netz von Connect Austria in Betrieb genommen. Das DCS-1800 (Digital Cellular System) ist ein GSM-Standard, der bei einer Frequenz von 1800 MHz arbeitet und eine geringere Sendeleistung verwendet. Dieses Netz ist bis zum heutigen Tage in Betrieb, aber es wird langsam durch das UMTS-Netz vertrieben.

Am 25. September 2002 hat die neue Mobilfunkgeneration **UMTS** in Europa seinen Betrieb aufgenommen. Die Mobilkom Austria startete das erste europäische UMTS-Netz und konnte von Beginn an eine Versorgung von über 25% ermöglichen.

Am 25. April 2003 eröffnete die Mobilkom Austria (A1) ihr UMTS-Netz für kommerzielle Zwecke und steht somit allen Kunden offen.²

3. Arten der Telekommunikation

3.1. Zellulare Mobilfunknetze (GSM-Netze)

Das GSM-Netz ist die 2. Generation (2G) der Funknetze. In diesem Bereich werden Funknetze verstanden, welche den Fernsprehdienst auf die mobilen Funkteilnehmer ausdehnen. Diese Ausdehnung ist flächendeckend. Das bedeutet, dass mobile Teilnehmer und Festnetzteilnehmer miteinander kommunizieren können.

„Diese Netze sind zentral organisiert. Die mobilen Teilnehmer sind nicht miteinander verbunden, sondern sind mit zentralen Funk- und Vermittlungsstationen verbunden, welche die Vermittlungstätigkeit übernehmen. „Die GSM-Technik basiert auf einer digitalen Übertragung im Zeitmultiplex mit 8 Kanälen pro Trägersignal.“³

Die GSM-Mobilfunkanlagen senden in Europa im Frequenzbereich von 900 und 1800 Megahertz (Dualband).⁴

3.2. Schnurlostelefone

Das ist die einfachste Version einer mobilen Kommunikationsform. Das Festnetztelefon ist mit einem weiteren mobilen Sprechteil verbunden. Die Reichweiten dieses Sprechteiles liegen außer Haus bei 300 Meter bzw. innerhalb des Hauses liegt es bei 50 Meter.

In Europa ist der DECT-Standard (Digital Enhanced Cordless Telecommunication) stark vertreten. Das DECT-System besitzt mehr Freiheiten als das GSM-Netz - die

² vgl UMTSlinl.at

³ Zogg, 2002, S 15

⁴ vgl. Duque-Antón 2002, S 4

erlaubten Dienste sind weniger spezifisch definiert als dies beim GSM-Netz der Fall ist.⁵

3.3. Bündelfunknetze

Es gibt neben den öffentlichen Mobilfunknetzen auch eine Reihe von Funknetzen, welche nicht der Öffentlichkeit zur Verfügung stehen. Diese Funknetze werden nur von spezifischen Anwendern genutzt. Typische Beispiele für solche Betriebsfunknetze sind Taxi-, Transport- und Flugunternehmen.

Das Bündelfunknetz ist wie das GSM-Netz ebenfalls ein zelluläres Netz.⁶

3.4. Pagingssysteme

Das Pagingssystem ist ein Funkrufsystem, welches möglich macht mittels eines Telefonanrufes über ein mobiles Endgerät (Pager), gewünschte Personen zu erreichen. Das mobile Endgerät kann nur empfangen. Beim Paging gibt es drei Möglichkeiten, wie der Empfang möglich ist:

1. Nur Alarmsignal
2. Übertragung einer 15-stelligen Ziffernfolge
3. Übertragung von alphanumerischen Zeichen – bis zu 80 Zeichen sind möglich

In Österreich wurde das Pagingssystem eingestellt, weil es von den verschiedenen Mobilfunknetzen (D-Netz und GSM-Netz) vom Markt verdrängt wurde.⁷

3.5. Satellitensysteme

⁵ vgl. Duque-Antón 2002, S 4

⁶ vgl. Duque-Antón 2002, S 6

⁷ vgl. Duque-Antón 2002, S 7

Um mit Schiffen auf hoher See zu kommunizieren, sind Satellitensysteme notwendig. Diese Satellitensysteme eignen sich auch hervorragend zur Versorgung von ländlichen Gebieten.

Satellitensysteme werden nicht nur zur Kommunikation zwischen den mobilen Teilnehmern verwendet, sondern auch zu deren Lokalisierung. Das GPS System (Global Positioning System) ist ein weltweites Ortungs- und Navigationssystem, welches bereits von der Luftfahrt, der Schifffahrt und dem Straßenverkehr genutzt wird.⁸

3.6. GPRS

Das GPRS ist ein Zwischenschritt vom GSM zum UMTS. Es zeichnet sich dadurch aus, dass es höhere Übertragungsraten als das GSM besitzt. Deshalb wird es oft als das 2,5 Generation (2,5G) bezeichnet.

3.7. UMTS

Das GSM wird bereits von der dritten Generation (3G) der Mobilfunksysteme abgelöst. Dieses dritte System heißt UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Ein wichtiges Ziel des UMTS ist es, die Unterstützung einer großen Anzahl von Sprachdiensten, Datendiensten und einer Vielzahl von Multimedia-Applikationen zu ermöglichen.

Die UMTS-Anlagen senden in Europa im Frequenzbereich zwischen 1900 und 2200 Megahertz.⁹

4. GSM

⁸ vgl. Duque-Antón 2002, S 7 - 8

⁹ vgl. Duque-Antón 2002, S 8 - 9

Im Moment ist das GSM-Netz das meistverwendete Funknetz gegenüber dem GPRS und UMTS in Österreich und in Europa. Es gibt zwei verschiedene GSM-Frequenzen, nämlich 900 MHz und 1800 MHz. Das Frequenzband 1800 MHz benötigt gegenüber dem Frequenzband 900 MHz eine geringere Sendeleistung. Durch das GSM-Netz wurde es möglich gemacht, dass EDV-Daten schneller übertragen werden können.¹⁰ „The current location management scheme, GSM Mobile Application Parts (MAP) or IS-41, is based on partitioning the cells into static registration areas, known as location areas (LAs).”¹¹

Das GSM-Netz wurde zum Zeitpunkt der Einführung des GPRS für diese leistungsfähigere Datenübertragung erweitert. Zurzeit erfolgt die Umsetzung auf das neue UMTS-Netz, weil dieses Netz, kann die Einschränkungen, welches das GSM-Netz aufweist, überwinden kann.¹²

4.1. Lizenzvergabe

Die Lizenzvergabe der Frequenz 1800 MHz erfolgte in Österreich für die Frequenzpakete im Jahre 2001. Diese Vergabe erfolgte im Rahmen eines offenen aufsteigenden simultanen Mehrundenverfahrens. Es gelangten alle Frequenzpakete gleichzeitig zur Versteigerung. Unter den Mitbietern waren damals Connect Austria (die heutige one), max.mobil (max) und die Mobilkom (A1).¹³

Das Endergebnis der Versteigerung der DSC-1800 Frequenzen:

Antragsteller	Frequenzpakete	zugeteiltes Spektrum	Betrag
Connect	3	2 x 6 MHz	€ 21.874.523,00
max.mobil.	2	2 x 3,2 MHz	€ 11.627.653,00
Mobilkom	2	2 x 10 MHz	€ 36.409.090,00

(1. Abbildung: Verteilung der Frequenzpakete GSM, Quelle: <http://umtslink.at>)

¹⁰ vgl. <http://umtslink.at>

¹¹ Chai 2005, S 2889

¹² vgl. UMTS Basics 2002, S 10

¹³ vgl. <http://umtslink.at>

5. UMTS

Mit Hilfe der 3. Generation der Funknetzwerke dem UMTS (Universale Mobile Telecommunications Service) wird den mobilen Teilnehmern eine neue Art von Endgeräten zur Verfügung gestellt, die es jetzt ermöglicht, eine breite Palette an Dienstpaketen anzubieten. Es werden gegenüber dem GSM personalisierte Dienste angeboten. Diese personalisierten Dienste können dann auch von anderen mobilen Endgeräten verwendet werden – es muss nicht immer das eigene Handy sein.

Das UMTS verwendet in der ersten Ausbaustufe existierende Strukturen des GSM/GPRS-Standards. Somit verwendet das UMTS zwei getrennte Netzwerke für CS- und PS-Dienste.¹⁴

UMTS überträgt wie das Breitband-ISDN ebenfalls gleichzeitig Sprache, Bilder, Daten und Text über eine einzige Leitung. Hier werden verschiedene Übertragungsraten angeboten:

- hohe: 384 kbits/s bis zu 2 Mbits/s
- niedrige: 16 kbit/s und weniger.

Beim UMTS wird auch wie beim GSM-Netz eine Luftschnittstelle, welche UTRA (Universal Terrestrial Radio Access) genannt wird, angeboten. Die Luftschnittstelle wird über ein Codevielfachzugriffsverfahren W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) betrieben. Durch dieses Codevielfachzugriffsverfahren kann das Frequenzspektrum wesentlich besser genutzt werden als dies zurzeit beim GSM-Netz möglich ist. Hier ist keine Frequenzplanung mehr notwendig – es erfolgt eine flexible Zuteilung der Übertragungskapazität.

Die Hauptbestandteile des UMTS-Netzes sind das Core Network (CN) und das Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN). „Weiters wird die Schnittstelle zwischen diesen beiden Komponenten mit lu bezeichnet.“¹⁵

¹⁴ vgl. http://umtslink.at/cgi-bin/reframer.cgi?../UMTS/logischer_kanl.htm

¹⁵ UMTS Basics 2002, S 50

„Seine wesentliche Bedeutung erhält der UMTS-Standard dadurch, dass die Regeln für ein weltweit einheitliches Mobilfunknetzwerk erstmals verbindlich festgelegt wurden. Globales Roaming wird somit möglich.“¹⁶

5.1. UMTS Lizenzvergabe

In Österreich erfolgte die Lizenzvergabe der UMTS Lizenzen mittels Versteigerung im November 2000. Unter den sechs Netzbewerbern (siehe Abbildung) wurden insgesamt 12 gepaarte und 5 ungepaarte Frequenzpakete versteigert.

Die gepaarten Frequenzpakete bestehen aus zwei Frequenzbändern mit jeweils 5 MHz. Eines dieser Paare dient für den Downlink (hören) und das andere für den Uplink (sprechen). Das ungepaarte Frequenzpaket hat ebenfalls 5 MHz und dieses führt den Down- und Uplink per Zeitmultiplex durch. Bei diesem Frequenzpaket erfolgt das Sprechen und Hören hintereinander. Der Teilnehmer wird aber keinen Unterschied gegenüber dem gepaarten Frequenzpaket bemerken.

Die vergebenen Lizenzen haben eine Gültigkeit von 20 Jahren.¹⁷

Bieter	gepaarte Frequenzpakete		ungepaarte Frequenzpakete	
	Pakete	Mio Euro	Pakete	Mio Euro
Connect	2	120		
Hutchison 3G	2	114	1	25
Mannesmann 3 G	2	113		
max.mobil	2	120	2	51
Mobilkom	2	121	2	50
3 G Mobile GmbH	2	118		

(2. Abbildung: Verteilung der Frequenzpakete UMTS, Quelle: <http://umtslink.at>)

¹⁶ UMTS Basics 2002, S 8

¹⁷ vgl. http://umtslink.at/cgi-bin/reframer.cgi?../UMTS/logischer_kanal.htm

6. Standortentscheidungen für die Aufstellung von Basisstationen

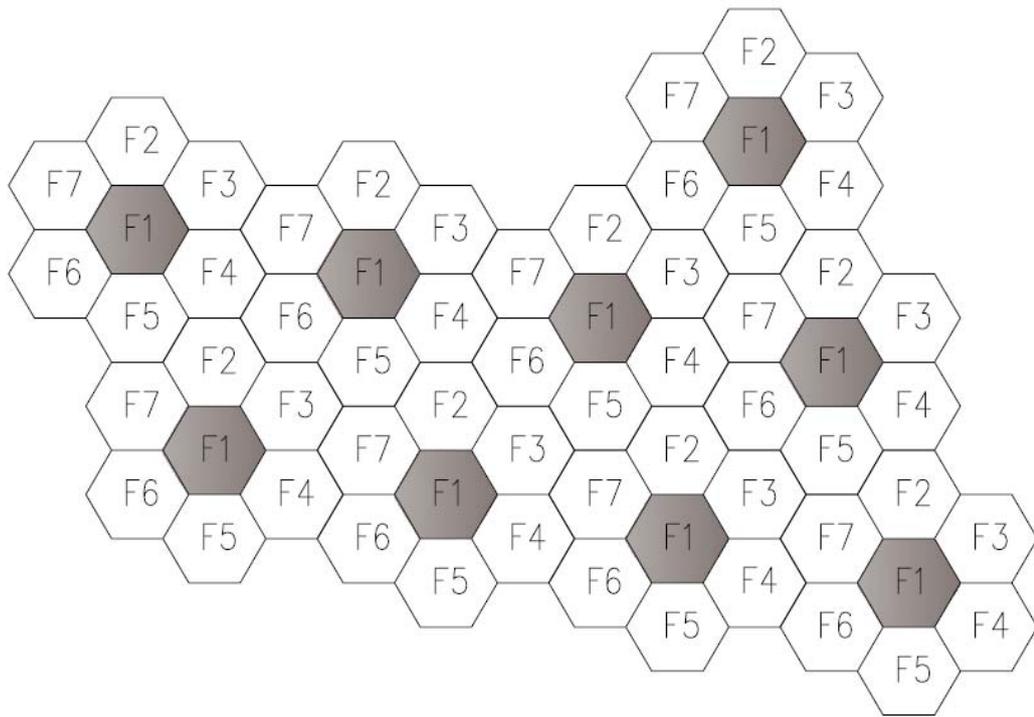
Den kleinsten Teil eines Funknetzwerkes nennt man die Funkzelle. In der Mitte dieser Funkzelle befindet sich eine Basisstation (BTS), welche mit den mobilen Endgeräten (Handies) in Verbindung steht. Die Größe einer Funkzelle hängt von der Sendeleistung, den geografischen Gegebenheiten und dem Installationspunkt der jeweiligen Basisstation ab.

Die Vermittlungskapazität innerhalb der Funkzelle ist technisch begrenzt – dies hängt von der Anzahl der gleichzeitig zu bedienenden Kommunikationskanälen ab. In den Großstädten, die eine hohe Besiedelungsdichte aufweisen, sind die Funkzellen ungefähr einige 100 m im Durchmesser, während hingegen in den dünner besiedelten ländlichen Bereichen der Durchmesser bis zu 30 km betragen kann.

Der Basisstation, die sich in einer Funkzelle befindet, wird eine bestimmte Anzahl an Frequenzkanälen zugeteilt. Keine benachbarte Funkzelle darf dieselben Frequenzkanäle verwenden. Es wären sonst Gleichkanalstörungen aus den benachbarten Funkzellen zu erwarten. Die kleinste Anzahl an Frequenzkanälen, die eine Basisstation aufweisen kann, sind sieben verschiedene Frequenzen.

Normalerweise werden die Funkzellen als regelmäßige Sechsecke dargestellt. Dies kann aber auf Grund der topographischen bzw. der umgebungsbedingten Umstände nicht immer entsprochen werden. In der Praxis werden sich die Funkzellen überlappen und daher eine unregelmäßige Form aufweisen.¹⁸

¹⁸ vgl. Duque-Antón 2002, S 43 u. 44

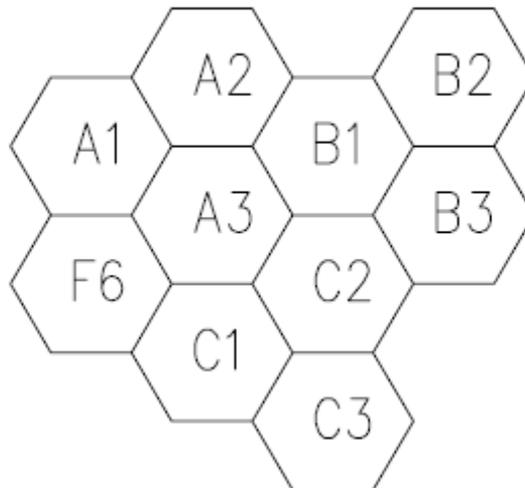


(3. Abbildung: Frequenzplan für Funkzellen (7er-Cluster), Quelle: Zogg 2002)

Ein weiteres Zellenkonzept von Tisal: Ein Zellenmodell in einem GSM-Netzwerk definiert sich aus neun Zellen. Die Basisstation wird normalerweise in der Mitte der jeweiligen Zellen aufgestellt. Jede einzelne Zelle ist ein Grundelement, das eine Gruppe von unterschiedlichen Frequenzen verwendet. Wenn in zwei verschiedenen Zellen einige Frequenzen identisch sind, sollten diese getrennt voneinander aufgestellt werden, damit es zu keinen Interferenzen zwischen den Zellen kommen kann.

In der unten angeführten Zeichnung sind die Zellen A1, A2 und A3 mit einer Basisstation verbunden – diese befindet sich in der Mitte dieser drei Zellen.¹⁹

¹⁹ vgl. Tisal J. 2001, Seite 18 und 19



(4. Abbildung: Modell eines Zellenmodells, Quelle: Tisal 2001)

Die Aufstellung der Basisstationen ist von immenser Wichtigkeit für das gesamte Funknetzwerk. Deshalb wird für die Auffindung dieser Standorte ein großer Wert gelegt und daher existieren sehr viele wissenschaftliche Abhandlungen darüber und dementsprechend viele Berechnungsmethoden.

Das UMTS basiert gegenüber dem GSM (FDD – Frequency Division Duplex) auf dem W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access). Im W-CDMA existieren zwei Phasen:

1. Phase: Die Bandbreite wird auf alle Verbindungen aufgeteilt.
2. Phase: Das Gebiet, das von der Basisstation abgedeckt wird, wird durch das Verkehrsaufkommen beeinflusst.²⁰

Weiters gibt es zwei Arten von Modellen, die für die Bestimmung der Standorte für die Basisstationen Verwendung finden.

- Standortprobleme mit uplink Nebenbedingungen
- Standortprobleme mit downlink Nebenbedingungen

²⁰ vgl. Amaldi 2001, S 1

6.1. Modellbeschreibung

Hier wird ein Gebiet betrachtet, das durch ein UMTS-Netzwerk abgedeckt werden soll.

Die möglichen Kandidaten für den Standort (Aufstellung) der Basisstationen werden als $S = \{1, \dots, m\}$ bezeichnet. Die Installationskosten werden als c_j in Verbindung mit den einzelnen Kandidaten $j - j \in S$. Weiters sind auch Testpunkte (TP) in diesem Modell gegeben $I = \{1, \dots, n\}$.

Bei jedem Testpunkt wird ein gegebener Wert vom Verkehrsaufkommen d_i angefordert, der in Erlang (siehe Kapitel 6.2. Exkurs: Erlang und SIR) gemessen wird und ein bestimmter Level an Service muss garantiert sein, der wiederum in *SIR* (Signal-to-Interference Ratio) gemessen wird.

Bevor das Grundmodell für den uplink aufgestellt werden kann, müssen noch die folgenden Entscheidungsvariablen definiert werden:

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{if a BS is installed in } j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

for $j \in S$ and

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{test point } i \text{ is assigned to BS } j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

for $i \in I$ and $j \in S$ ²¹

Das klassische Standortproblem ohne Kapazitätsbeschränkung hat daher nun folgendes Aussehen:

$$(1) \quad \min \sum_{j=1}^m c_j y_j + \lambda \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u_i \frac{1}{g_{ij}} x_{ij}$$

$$(2) \quad \text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1 \quad i \in I$$

²¹ Amaldi 2003, S 8

$$(3) \quad x_{ij} \leq y_j \quad i \in I, j \in S$$

$$(4) \quad x_{ij}, y_j \in \{0,1\} \quad i \in I, j \in S \text{ „}^{22}$$

Der erste Term entspricht den gesamten Installationskosten. Weiters versucht der zweite Term eine Auslösung zu finden und festzulegen, die die kleinste Menge an Emissionen aufweist. Die dritte Nebenbedingung sichert, dass jeder Testpunkt i zu einer Basisstation zugeteilt ist und die letzte Nebenbedingung erzwingt, dass Testpunkte nur dort installiert sind, wo auch die Basisstationen stehen.

In diesem Bereich wurde das Grundmodell für die Standortbestimmung vorgestellt.

Aber um eine gute Lösung für das Standortproblem zu finden, werden andere Modelle verwendet. Diese Modelle werden nun in den nachfolgenden Unterkapiteln (6.4. – 6.6.) näher beschrieben.

6.2. Exkurs: Erlang und SIR

Erlang:

Die Nutzung der Dienste wird als Verkehr bezeichnet und dieser Verkehr wird mit Hilfe der Einheit „Equivalent Telephony Erlang (ETE)“ beschrieben.

Für die Berechnung des Equivalent Telephony Erlang (ETE) wird folgende Formel verwendet:

$$\text{„} \frac{ETE}{\text{Teilnehmer}} = T * BHCA * D * \frac{\text{Dienstbandbreite}}{\text{Telefoniebandbreite}} \text{ „}^{23}$$

Die einzelnen Komponenten der Formel sind:

²² Amaldi 2003, S 8

²³ Duque-Antón 2002, S 198

T = effektive Rufdauer – Diese besteht aus der Multiplikation der mittleren Rufdauer t mit den Nutzungsgrad G . Daher: $T = G * t$ ⁴⁵.

BHCA (Busy Hour Call Attempt) = Häufigkeit der Nutzung in der Hauptverkehrsstunde, dies entspricht der Anzahl der aktiven Gespräche und der Anzahl der eingewählten Teilnehmer ins Netz.

D = Durchdringung: Die Werte für D hängen von den verschiedenen Einsatzbedingungen und den konkreten Diensten ab. Mögliche Einsatzbedingungen sind: private oder dienstliche Nutzung, ob in einem Wohngebiet oder in einer Innenstadt, der Art der Bewegung – Fußgänger oder Fahrzeug und weiteren Aspekten.

Für die private Nutzung wird ein Wert für die Sprachtelefonie ($D = 0,3$) und für die Videotelefonie ($D = 0,08$) angenommen. Für den Bereich dienstliche Nutzung für die Sprachtelefonie ($D = 0,5$) und für die Videotelefonie ($D = 0,13$) angenommen.²⁴

SIR (Signal-to-Interference Ratio):

Das Verhältnis zwischen erhaltener Energie und den Interferenzen wird als *SIR* (Signal-to-Interference Ratio) bezeichnet. Um ein gleichbleibendes Verhältnis zwischen diesen beiden Komponenten zu erhalten, müssen die einzelnen Funkkanäle der einzelnen Basisstationen sorgfältig geplant werden.

Das *SIR* ist gegeben durch folgende Formel:

$$SIR = SF P_{received} / \alpha I_{in} + I_{out} + \eta$$

Diese Formel setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

SF = Verbreitungsfaktor

$P_{received}$ = Die Stärke des erhaltenen Signals

I_{in} = Ist die Interferenz vom erhaltenen Signal von derselben Basisstation.

I_{out} = Dies sind die Signale, die von den anderen Basisstationen erhalten werden.

²⁴ vgl. Duque-Antón 2002, S 198

α = Ist der Verlustfaktor $0 \leq \alpha \leq 1$

η = thermal noise power

Der SIR Level hängt von jeder einzelnen Verbindung, vom erhaltenen Signal und von den Interferenzen ab.²⁵

6.3. Exkurs: Zellengröße

Innerhalb eines Funknetzwerkes werden unterschiedliche Zellengrößen verwendet, die sich nicht nur in der Zellengröße sondern auch in der Leistung unterscheiden. Weiters werden diese unterschiedlichen Zellen auch in verschiedenen Bereichen eingesetzt. In diesen Zellen befinden sich die Basisstationen, die der Kontrolle der Funkteilnehmer dienen.

Die Arten und die Einsatzbereiche der Zellen werden in folgender Tabelle wiedergegeben:

Cell type	Range (m)	Transmission Power (W)	Antenna Height (m)	Comments
Macrocell	> 1.000	1 - 10	> 30	Macrocells are used in conventional cellular radio systems. The coverage is maximized to reduce the system's infrastructure cost. Macrocells will be used to provide coverage for areas with low terminal density in UMTS.
Microcell	< 1.000	0,1 - 1	< 10	Microcells will be widely deployed in UMTS to provide ubiquitous coverage, mainly in urban areas. Compact base station units will be mounted on lamp posts and surrounding buildings.
Picocell	5 - 30	0,01 – 0,1	Ceiling	Picocells are used to provide services for areas with high terminal density and are usually deployed for indoor areas.
Umbrella cell	> 1.000	1 - 10	> 30	Umbrella cells are used to maintain continuous coverage and to assist handover for mobile terminals that traverse through microcells in high-speed.
Highway cell	100–1.000	< 1	< 10	Highway cells are used to provide coverage for sections of road using compact base stations units with directional antennae that tailor the radiation pattern for the environment.

(5. Abbildung: Tabelle: Zellengröße, Quelle: Cheung 1994)

²⁵ vgl. Resende 2006, S 919 – 920

6.4. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures

Das Greedy Randomized Adaptive Search Procedures (GRASP) ist eine Metaheuristik für kombinatorische Optimierungsprobleme, in der jeder Schritt zwei Phasen beinhaltet – Konstruktion und die lokale Suche. In der Konstruktionsphase wird eine mögliche Lösung aufgebaut. Während der lokalen Suche wird der Nahbereich der aufgebauten Lösung untersucht, bis ein lokales Minimum gefunden ist.

In jeder einzelnen Phase des Konstruktionsprozesses werden die Sätze der möglichen Lösungen durch alle Elemente geformt. Die Auswahl der nächsten Elemente wird bestimmt durch die Ausscheidung laut der Greedy Auswahlfunktion. Durch diese Auswahl bleiben nur die besten Elemente übrig und diese ergeben dann die beste Lösung für das Problem.

Der Pseudo-Code für das Greedy Randomized Adaptive Search Procedures (GRASP) befindet sich in folgender Tabelle:

```
procedure GRASP(MaxIterations,Seed)
1. Set  $f^* \leftarrow \infty$ ;
2. for  $k = 1, \dots, \text{MaxIterations}$  do
3.      $S \leftarrow \text{GreedyRandomizedAlgorithm}(\text{Seed})$ ;
4.      $S \leftarrow \text{LocalSearch}(S)$ ;
5.     if  $f(S) < f^*$  then
6.          $S^* \leftarrow S$ ;
7.          $f^* \leftarrow f(S)$ ;
8.     end_for;
10. return  $S^*$ ;
end.
```

(6. Abbildung: GRASP Heuristik, Quelle: Resende 2006)

Aber die Lösung, die durch den Konstruktionsprozess entstanden ist, muss nicht notwendigerweise die beste Lösung sein. Durch Hilfe der lokalen Suche ist es möglich, die entstandene Lösung zu verbessern. Die lokale Suche arbeitet mit einer wiederholenden Art und Weise, nämlich durch den Austausch der gefundenen Lösung durch eine bessere Lösung. Wie erfolgreich eine lokale Suche ist, hängt von folgenden Faktoren ab:

- Aufbau der benachbarten Lösungen
- Die Suchtechnik
- Die schnelle Evaluierung der Kostenfunktion
- Die Anfangslösung

Ein weiterer Punkt, der für das GRASP spricht, ist der, mit welcher Leichtigkeit es an die jeweilige Situation angepasst werden kann. Bereits durch wenige Parameter ist es bereits angepasst.

Das GRASP weist aber einen Mangel auf. Dieser ist die Unabhängigkeit eines jeden einzelnen Iterationsschrittes. Das heißt, dass man nichts von den Lösungen der vorherigen Schritte lernt.²⁶

6.5. Tabu Search

“Tabu Search (TS) is a metaheuristic that guides a local search procedure to explore the solution space of optimization beyond local optima. The idea is to use the history of the search process through an appropriate memory scheme to prevent cycling (running into feasible solutions that have already been generated) and to explore regions of the solution space that are promising in terms of the objective function.”²⁷

Das Tabu Search wird zur Lösung von Optimierungsproblemen verwendet. Es ist ein lernfähiger Prozess, der die Fähigkeit enthält, sich andere Methoden nutzbar zu machen, wie zum Beispiel linear programmierbare Algorithmen und andere spezielle Heuristiken.²⁸

²⁶ vgl. Glover 2003, S 219 - 228

²⁷ Amaldi 2003, S 14

²⁸ vgl. Glover 1989, S 190

Die nun folgende Tabelle gibt den Vorgang beim Tabu Search wieder:

```
procedure TabuSearch()
1.  Generate an initial solution  $S_0$  and set  $S \leftarrow S_0$ ;
2.   $S^* \leftarrow S$ ;
3.   $T \leftarrow 0$ ;
4.  while stopping criterion is not reached do
5.       $S' \leftarrow \text{SelectBestNeighbor}(N(S) \setminus T)$ ;
6.      if  $f(S') < f(S^*)$  then
7.           $S^* \leftarrow S'$ ;
8.      end_if;
9.      if  $|T| = \text{TabuTenure}$  then
10.         Remove from  $T$  the oldest solution;
11.     end_if;
12.      $T \leftarrow T \cup S$ ;
13.      $S \leftarrow S'$ ;
14. end_while;
15. return  $S^*$ ;
end.
```

(6. Abbildung: Tabu Search, Quelle: Resende 2006)

Erklärung der verwendeten Ausdrücke, die in der Tabelle vorkommen:

- S_0 = Anfangslösung (initial solution)
- S = Lösung (solution)
- $N(S)$ = Nachbarschaftslösung bzw. Nahbereichslösung
- *TabuTenure* = Ist eine Liste, die die Lösungen enthält, welche tabu bzw. verboten sind.
- S' = Die beste nicht verbotene Nachbarschaftslösung
- T = Wenn die *TabuTenure* voll ist, wird die älteste verbotene Lösung aus dieser Liste entfernt.

In seiner einfachen Form enthält das Tabu Search zwei von seinen Schlüsselementen.

- “Constraining the search by classifying certain of its moves as forbidden

- Freeing the search by a short term memory function that provides “strategic forgetting”.²⁹

An dieser Stelle wird ein Beispiel von Fred Glover, Tabu Search – Part I angeführt:

Hill climbing heuristic – der Hügel ist in diesem Beispiel auf den Kopf gestellt, daher ist die Richtung des Kletterns abwärts.

„HILL CLIMBING HEURISTIC FOR (P)

1. Select an initial $x \in X$.
2. Select some $s \in S(x)$ such that

$$c(s(x)) < c(x).$$

If no such s exists, x is a local optimum
and the method stops. Otherwise,

3. Let $x := s(x)$
and return to Step 2.³⁰

X ist ein Set von passenden Punkten für ein lineares Programm und $S(x)$ ist ein Satz von möglichen Bewegungen, die von x zu einem Punkt führen.

Der Vorgang des Tabu Search (TS) kann folgendermaßen beschrieben werden:

Ausgehend von einer passenden Lösung s^0 und weiters von einem Satz an benachbarten Lösungen $N(s^0)$, die durch mögliche Bewegungen zu s^0 geschaffen wurden. Die beste Lösung in der Nachbarschaft $N(s^0)$ wird gewählt und diese Lösung ist nun die nächste Lösung s^1 . Dieser Prozess wird solange wiederholt bis entsprechende Lösungen s^k für das Problem gefunden wurden.³¹

²⁹ Glover 1989, S 191

³⁰ Glover 1989, S 191

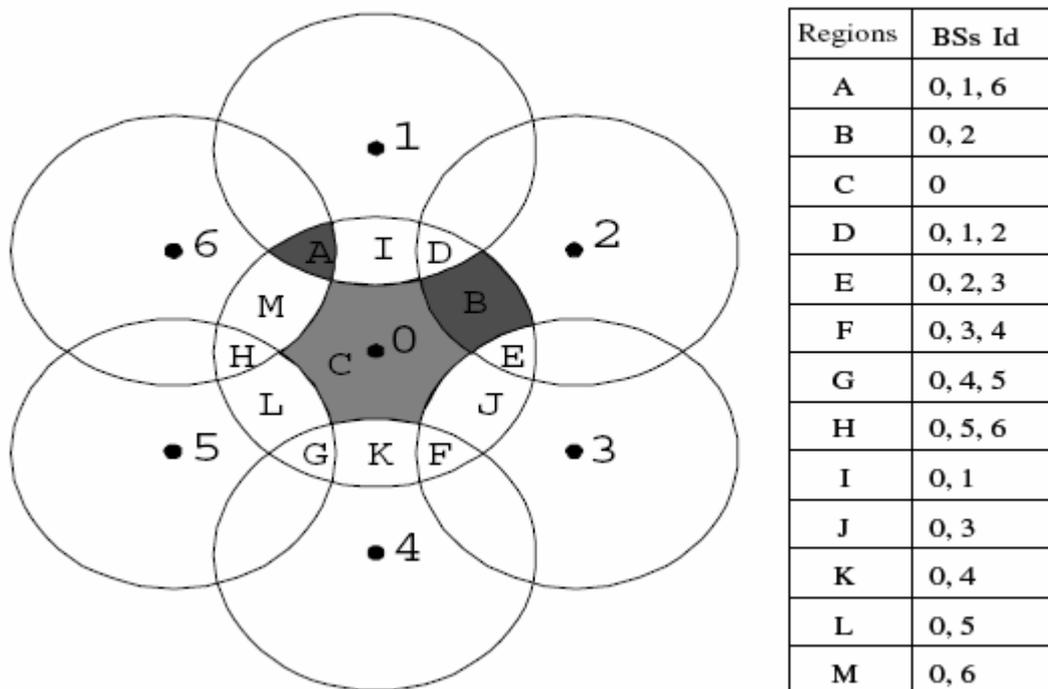
³¹ vgl. Amaldi 2003, S 14

6.6. Location-sensing Problem

In diesem Bereich wird die „cell-based positioning method“ und ihre „positioning accuracy of networks“ beschrieben. Die Lösung dieses Problems bestimmt den Standort, wo ein Knoten in einem Netzwerk platziert wird.

1. Cell-based positioning method

Betrachte die unten angeführte Abbildung und die dazugehörige Tabelle eines Funknetzwerkes. In der Mitte der jeweiligen Zellen befinden sich die Basisstationen, die sich gegenseitig überlappen.



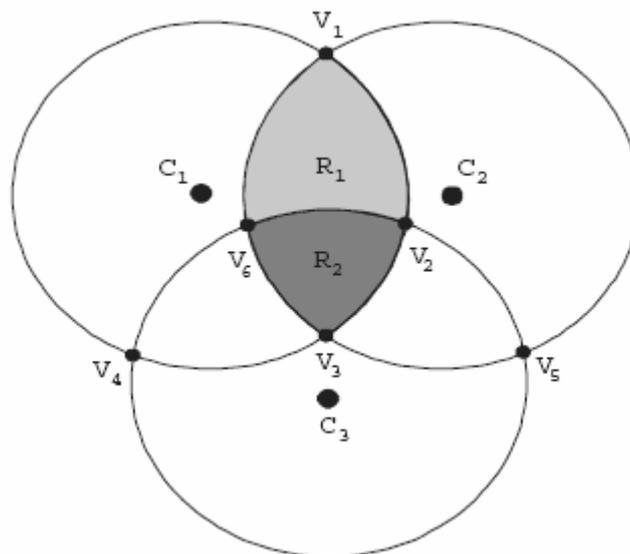
(7. Abbildung: Aufbau eines Netzwerkes mit Überlappungen, Quelle: Jan 2004)

Die angeführte Tabelle zeigt, über welche Basisstationen ein mobiler Teilnehmer geleitet wird. Als Beispiel: Der Teilnehmer befindet sich im Gebiet H, dann wird sein Anruf entweder von der Basisstation 0, 5 oder 6 zur

Weiterleitung übernommen. Diese Übernahme von den Basisstationen wird als die „cell-based positioning method“ genannt.³²

2. Positioning accuracy of networks

In diesem Bereich wird ein Netzwerk mit n Basisstationen betrachtet, wo der Standort von $BS_i (x_i, y_i)$ und deren Reichweite gegeben sind. $i = 1, 2, \dots, n$). Der Bereich von BS_i wird in einem Kreis C_i bestimmt. Wie in der Abbildung ersichtlich ist, handelt es sich um einen simplen Aufbau und deshalb können die Überschneidungen leicht gefunden werden. Daraus kann das Graphenmodell $G = (V, E)$ formuliert werden.



(8. Abbildung: Graphenmodell G , Quelle: Jan 2004)

Jeder einzelne Schnittpunkt (Vertex – V) steht für einen Überschneidungspunkt von C_i und C_j . Ein Bogen (u, v) ist in E , wenn (u, v) ein einfaches Segment im Kreis ist, welches keinen Überschneidungspunkt zwischen u und v aufweist. „We called a vertex v as a border vertex if v is not inside another circle. An arc (u, v) is called a border arc if both u and v are border vertices.“^{33, 34}

³² vgl. Jan 2004, S 819

³³ Jan 2004, S 820

³⁴ vgl. Jan 2004, S 820

6.7. Ergebnisse

Für die Standortbestimmung der Basisstationen wurden drei Modelle, die in der Praxis Anwendung finden, vorgestellt. Zuerst wurde das Greedy Randomized Adaptive Search Procedures (GRASP) in seiner Form erklärt, dann wurde das Tabu Search (TS) vorgestellt und zum Schluß das Location-sensing Problem.

Das Greedy Randomized Adaptive Search Procedures (GRASP) erfordert in seiner Grundform für die Anpassung an die Gegebenheiten nur die Änderung eines einzigen Parameters. Alle anderen Heuristiken wie z.B. Genetic Algorithms erfordern ein Vielfaches von Parametern für die erforderlichen Anpassungen. Dadurch wird die Einfachheit des GRASP deutlich hervorgehoben.³⁵

Das Tabu Search (TS) ist ein relativ starkes Instrument für die Näherung an ein Ziel. Es konnten schon sehr viele Erfolge mit kombinatorischen Optimierungsproblemen erreicht werden. Besonders hervorzuheben ist, dass die Annäherungen des Tabu Search (TS) auf dem Local Search basieren. Dadurch ist es möglich, mit komplizierten Nebenbedingungen, wie sie in lebensnahen Bereichen vorkommen, leichter umzugehen.

Das Location-sensing Problem ist einfach in seiner Anwendung. Gegenüber den vorherigen Heuristiken hat das Location-sensing Problem den Vorteil, dass hier relativ schnell eine Lösung gefunden wird. Diese gefundene Lösung hat aber den Nachteil, dass sie nicht immer optimal ist. Daher sollte diese Lösung mit anderen Heuristiken untersucht werden, ob man die gefundene Lösung noch weiter verbessern kann.

Daher ist das Tabu Search (TS) eine Heuristik, die sehr stark an die Wirklichkeit heranreicht.³⁶

³⁵ vgl. Glover 2003, S 241 - 242

³⁶ vgl. Glover 2003, S 51 - 52

7. Routing and Wavelength Assignment

Die Technologie der optischen Netzwerke ist stetig im Wachstum begriffen und erscheint in vielen Ausprägungsformen wie zum Beispiel in der Telekommunikation, in Videokonferenzen, in der Computertechnologie und vielen anderen Formen.

Die Informationen werden mittels eines Glasfaserkabels zu den jeweiligen Empfängern übertragen. Die Geschwindigkeit, die über diese Übertragungsart erreicht wird, wird in Terabits pro Sekunde gemessen und diese Geschwindigkeit übersteigt bei weitem die Übertragungsrate herkömmlicher Übertragungsmedien. Deshalb können auch größere Mengen an Daten übertragen werden.

Das Routing soll die Anzahl der benötigten Wellenlängen reduzieren helfen. Weiters besteht das Routing and Wavelength Assignment (RWA) Problem aus einem Satz an Lichtpfaden und einer Anordnung von Wellenlängen.

Es gibt verschiedene Varianten für das Routing and Wavelength Assignment (RWA), die durch verschiedene Optimierungskriterien und Verkehrsformen auftreten. In dieser Arbeit wird das win-RWA beschrieben, welches von de Noronha und Ribeiro 2004 vorgestellt wurde.³⁷

7.1. Modellbeschreibung

Für ein optisches Netzwerk soll die minimale Anzahl an Verbindungen gefunden werden. Dieses Netzwerk besteht aus den Knoten, aus den Verbindungen und den Verteilern, die mit Glasfaserkabeln verbunden werden sollen. Solche Netzwerke erfordern normalerweise eine Menge an Verbindungen (Glasfaserkabeln), Diese Anzahl an Verbindungen soll minimal gehalten werden.

Beim RWA wird von einem gegebenen Satz an Lichtwegen (Glasfaserkabeln) ausgegangen und es wird eine Strecke bzw. eine Route nötig sein, die die Wellenlänge

³⁷ vgl. de Noronha 2004, S 1 - 2

zu jedem einzelnen Lichtweg bestimmt. Dies wird als das Routing and Wavelength Assignment (RWA) Problem bezeichnet.

7.2. Neue Heuristik für das min-RWA

Für das min-RWA werden zuerst die verschiedenen Komponenten bestimmt, die notwendig sind. $N=(X, A)$ ist der Graph, der die physikalische Struktur eines optischen Netzwerks beschreibt. X ist ein Satz von Verteilern und A ist ein Satz von Verbindungen, die mit den Verteilern verbunden sind. Weiters wird T bestimmt, welche die eingerichteten Verbindungen sind. Jede einzelne Verbindung ist festgelegt durch ein Paar Endknoten, die in X münden.³⁸

In der Arbeit von de Noronha und Ribeiro (2004) wird eine zweiphasige Heuristik beschrieben.

- In der ersten Phase werden die möglichen aktiven Routen für jede einzelne Verbindung konstruiert. Weiters wird ein Konfliktgraph aufgebaut, der die Knoten mit den einzelnen Routen beschreibt.
- In der zweiten Phase löst die Tabu Search Heuristik, die in der ersten Phase aufgebauten Entfernungen zu den einzelnen Knoten.³⁹

7.3. Lösungsmethoden für große Wavelength-routed Optical Networks

In diesem beschriebenen Abschnitt werden Lösungsmethoden für große Wavelength-routed Optical Networks, die zum Beispiel von Banerjee und Mukherjee (1996) in ihren Arbeiten behandelt wurden.

Um aber einen Überblick über diese Arbeiten zu erhalten, wird zuerst ein lineares Problem formuliert. Bei diesem Problem wird ausgegangen, dass ein Set von

³⁸ vgl. de Noronha 2004, S 5

³⁹ vgl. de Noronha 2004, S 5 - 6

Glaskabeln in einer bereits vorgegebenen Topologie existiert. Hier soll die Anzahl der Wellenlängen minimiert werden. Daraus ergibt sich folgende Formulierung:

- (1) „Minimize: F_{\max}
- (2) such that $F_{\max} \geq \sum_{s,d} F_{ij}^{sd} \quad \forall ij$
- (3)
$$\sum_i F_{ij}^{sd} - \sum_k F_{jk}^{sd} = \begin{cases} -\lambda_{sd}, & \text{if } s = j \\ \lambda_{sd}, & \text{if } d = j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$
- (4) $\lambda_{sd} = 0,1$
- (5) $F_{ij}^{sd} = 0,1$ „⁴⁰

Der Term λ_{sd} bezeichnet den Verkehr von der Quelle s zu dem Bestimmungsort d . Weiters wird ein Lichtweg von der Quelle zu einem Bestimmungsort betrachtet, so dass $\lambda_{sd} = 1$, wenn ein Lichtweg von s zu d existiert, sonst ist $\lambda_{sd} = 0$.

F_{ij}^{sd} kennzeichnet den Verkehr, der von der Quelle s zum Ort d mit der Verbindung ij fließt.⁴¹

7.3.1. Randomized Rounding

“The randomized rounding technique is applicable to a class of 0-1 ILP’s.”⁴²

Der Randomized Rounding Algorithmus beinhaltet drei Phasen:

1. Nonintegral Multicommodity Flow

Hier werden die Anforderungen von einem 0-1 Fluss aufgelockert und wird in ein Intervall $[0,1]$ umgewandelt. Dieses Minimierungsproblem kann nun durch ein passendes lineares Optimierungsmodell gelöst werden.

⁴⁰ Banerjee 1996, S 904

⁴¹ vgl. Banerjee 1996, S 904

⁴² Banerjee 1996, S 904

2. Path Stripping

Das Path Stripping gibt uns eine Anzahl von möglichen Wegen, die uns den Fluss des Verkehrs in einer optimalen Weise wiedergeben können.

3. Randomization⁴³

7.3.2. Graph Coloring

In diesem Bereich wird ein Graph konstruiert, der verhindern soll, dass ein Paar von Glasfaserkabeln dieselbe Wellenlänge aufweist. Um dies bewerkstelligen zu können, werden die folgenden zwei Schritte durchgeführt:

1. Zuerst wird ein Graph $G(V,E)$ konstruiert, sodass jeder Lichtweg durch einen Knoten gekennzeichnet wird.
2. In einem zweiten Schritt werden die Knoten so eingefärbt, dass kein benachbarter Knoten dieselbe Farbe aufweisen darf. Die minimale Anzahl der Farben, die für die Einfärbung der Knoten benötigt werden, ist relativ schwierig zu bestimmen. Aus diesem Grunde gibt es verschiedene Algorithmen, die die minimale Anzahl an Farben optimal ermitteln können.

Im nachfolgenden Unterkapitel wird ein Algorithmus kurz beschrieben, der die minimale Anzahl an Farben bestimmen kann – Sequential Algorithms.⁴⁴

7.3.2.1. Sequential Algorithms

Der Sequential Algorithmus ist eine sehr effektvolle Methode um die minimale Anzahl von Farben für die Einfärbung zu bestimmen. Die Vorgangsweise für die Bestimmung der minimalen Anzahl ist nun folgendermaßen:

⁴³ vgl. Banerjee 1996, S 905

⁴⁴ vgl. Banerjee 1996, S 904 - 905

In den bereits bestehenden Graphen werden neue Eckpunkte hinzugefügt und diese werden mit neuen Farben versehen, um die neuen Eckpunkte einzufärben zu können. Nach jedem Schritt werden die Farben, die benötigt werden, minimiert.⁴⁵

7.4. Ergebnisse

In diesem Abschnitt wurde das Routing and Wavelength Assignment (RWA) Problem behandelt, für das natürlich auch verschiedene Lösungsmethoden existieren.

Für die Lösung dieses Problems wurden drei verschiedene Verfahren vorgestellt:

- Randomized Rounding
- Graph Coloring
- Sequential Algorithms

8. Antennen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den verschiedenartigen Antennen, die für die unterschiedlichen Zellen und Funknetzwerke (GSM und UMTS) Anwendung finden. In den Makro-, Mikro- oder Piko-Zellen kommen unterschiedliche Antennen zum Einsatz, die sehr wichtig für die Übertragungsraten sind.

Zurzeit gibt es zwei Arten von Antennen, die rundstrahlende und die direkt gerichtete Antenne. Die rundstrahlende Antenne wird verwendet, wenn sie ein 360° Gebiet abdecken soll, während hingegen die direkt gerichtete Antenne zur Anwendung kommt, wenn das ausgesuchte Gebiet im Wachsen begriffen ist. Die Wahl einer dieser Antennen hat einen direkten Einfluss auf die Performance einer einzelnen Zelle oder auf das ganze Netzwerk. Weiters gibt es noch aktive bzw. passive Antennen, die zum Einsatz kommen.⁴⁶

⁴⁵ vgl. Banerjee 1996, S 905

⁴⁶ vgl. Clint 2001, S 428 - 429,

8.1. Antennenwahl für die Basisstation

Welche Antenne nun für die Basisstation zum Einsatz kommt, hängt von der Art der Zelle ab. Das bedeutet, dass für Makro-, Mikro- oder Piko-Zelle unterschiedliche Antennen zur Auswahl stehen, die, wie bereits erwähnt, die Performance beeinflussen können.

Die Antennen für die Basisstation sind entweder rundstrahlende oder direkt gerichtete Antennen. Welche Antenne nun gewählt werden sollte, hängt von folgenden Faktoren ab:

- Die gewählte Antenne hat den größeren Vorteil.
- Die Antenne kann leichter montiert werden.
- Die Antenne wird nicht durch verschiedene Faktoren behindert, wie zum Beispiel durch ein hohes Gebäude, Wind oder durch mögliche Vereisung.⁴⁷

8.2. Leistungskriterien

Es gibt viele Leistungskriterien für Antennen. Die Parameter für die Performance einer Antenne werden bestimmt durch die Leistungszahlen (FOM - figures of merit).

- Antenna pattern – Die Form ist wichtig, um zu vermeiden, dass es mit anderen Antennen zu Überlappungen kommt.
- Main lobe
- Side lobe suppression – Es sollten Überlappungen vermieden werden, um seitliche Interferenzen zu verhindern.
- Input impedance
- Radiation efficiency
- Horizontal beamwidth
- Vertical beamwidth
- Directivity

⁴⁷ vgl. Clint 2001, S 429

- Gain – Das Verhältnis der Ausstrahlung in eine Richtung ist von großer Bedeutung. Das Verhältnis einer Antenne wird mit dieser Formel beschrieben:

“ $G = e \times G(D)$ If the antenna were without loss, $e = 1$, than $G = G(D)$ ”⁴⁸

- „Antenna polarization
- Antenna bandwidth – Die Bandbreite beschreibt den operativen Bereich der Frequenzen, die benutzt werden.
- Front-to-back ratio – Dies ist das Verhältnis, wie viel Energie in die entgegengesetzte Richtung der Hauptüberlappung abgestrahlt wird.
- Power dissipation – Ist die Verlustleistung einer Antenne.
- Intermodulation suppression (PIM)
- Construction
- Cost“⁴⁹

Es sollte beachtet werden, inwieweit es möglich ist Antennen eines älteren Systems wie zum Beispiel des GSM für ein neues System wie UMTS zu verwenden.⁵⁰

8.3. Diversität

Die Diversität ist eine Methode, den Signalverlust innerhalb eines Netzes zu vergleichen. Es existieren mehrere Arten von Diversität. Die Art der Antennen-Diversität, welche benutzt wird - wird oft mit anderen Arten von Diversität verwendet. Dies wird im Sendebereich ausgeführt:

- Spacial – Dies ist eine räumliche Trennung zwischen den empfangenden Antennen, um eine gleichbleibende Empfangsleistung zu garantieren. Mit der folgenden Formel kann die erforderliche horizontale Diversität bestimmt werden:

$$„n = h/d,“⁵¹$$

⁴⁸ Clint 2001, S 432

⁴⁹ Clint 2001, S 430

⁵⁰ vgl. Clint 2001, S 430 - 433

h = die Höhe und d = die Distanz zwischen den Antennen. Diese Gleichung wird hauptsächlich für Netze im Bandbereich von 800 MHz verwendet, kann aber auch für Netze mit den Bandbreiten 1800 und 1900 MHz verwendet werden.

- „Horizontal
- Vertical
- Polarization
- Frequency
- Time
- Angle“⁵²

Für das UMTS-Netzwerk gibt es zwei verschiedene Diversitätsschemas:

- STD - space transmit diversity
- OTD – orthogonal transmit diversity

Das bevorzugte Schema ist das STD.⁵³

8.4. Installation von Antennen

Um zu bestimmen, wo eine Antenne am besten montiert bzw. aufgestellt werden sollte, gibt es verschiedene Gleichungen.

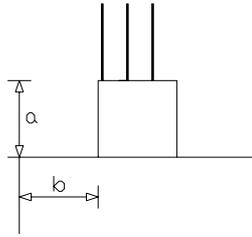
Für die Aufstellung von Antennen existiert die setback rule, welche die Beziehungen zwischen dem Punkt der Installation, ihre Höhe über der Dachspitze und die Distanz zwischen der Antenne und dem Dachrand bestimmt.

Die unten angeführte Zeichnung zeigt die Platzierung der Antenne auf einem Dach an.

⁵¹ Clint 2001, S 435

⁵² Clint 2001, S 434

⁵³ vgl. Clint 2001, S 435 - 436



(9. Abbildung: Gebäudeinstallation, Quelle: Clint 2001)

Daraus ergibt sich folgende Gleichung:

$$„a = 5 \times b“^{54}$$

Diese Gleichung zeigt, dass, je weiter die Antenne vom Dachrand installiert wird, desto höher muss sie installiert werden, um den nötigen Abstand zu erhalten.

Für die Befestigung an einer bereits existierenden Struktur, wie zum Beispiel an einem Gebäude oder an einem Mast, muss eine andere Gleichung verwendet werden, die den Abstand bestimmt.

$$„\alpha = d * \sin(\phi)“^{55}$$

Die einzelnen Teile der Gleichung sind:

- ϕ ist der Winkel von der Wand
- α ist der Abstand von der Wand
- d ist die Abtrennung der Diversität für ein Zweiarmantennen-System⁵⁶

8.5. Toleranz bei der Antennenaufstellung

Wie bereits im vorigen Kapitel aufgezeigt, gibt es verschiedene Möglichkeiten zur Installation von Antennen für Funknetzwerke. Weiters gibt es Toleranzwerte für die Aufstellung von Antennen, die beachtet werden sollten. Diese Toleranzwerte hängen

⁵⁴ Clint 2001, S 443

⁵⁵ Clint 2001, S 443

⁵⁶ vgl. Clint 2001, S 440 - 443

direkt mit der physischen und der vertikalen Ausrichtung der Antenneninstallation zusammen. Dafür gibt es zwei verschiedene Anforderungen:

- Wie genau sollte die Antenne ausgerichtet sein?
- Wie vertikal sollte die Installation sein?

Die Toleranz für die Ausrichtung der Antenne ist eine Funktion der Antennenform und ist bedeutsam für die jeweiligen Zellen.

Die folgenden Tabellen geben einen Überblick über die jeweiligen Toleranzen:⁵⁷

Type	Tolerances
Orientation	+/- 5% or antennas horizonatal pattern
Plumbness	+/- 1 degree (critical)

(10. Abbildung: Tabelle: Antennentoleranz, Quelle: Clint 2001)

Antenna Horizontal Pattern	Tolerance from Boresite
110 degrees	+/- 5.5 degrees
92 degrees	+/- 4,6 degrees
90 degrees	+/- 4,5 degrees
60 degrees	+/- 3.0 degrees
40 degrees	+/- 2.0 degrees

(11. Abbildung: Tabelle: Horizontal Antennentoleranz, Quelle: Clint 2001)

8.6. dBi und dBd

Für dBi und dBd gibt es eine Konvertierungsformel, weil die Werte oft nicht in den richtigen Größenordnungen angegeben werden. Die Gleichung für die Konvertierung von dBi in dBd lautet:

⁵⁷ vgl. Clint 2001, S 443 - 446

$$\text{„dBi} = 2,14 + \text{dBd}^{\text{„58}}$$

Des Weiteren lautet die Gleichung für die Konvertierung von dBd in dBi:

$$\text{„dBd} = \text{dBi} + 2,14^{\text{„58, 59}}$$

9. Frequenzverteilung

9.1. Modellbeschreibung

Das Hauptziel des Frequency Assignment Problems (FAP) besteht darin, die minimale Anzahl an Frequenzen für ein Funknetzwerk zu bestimmen, die die verschiedenen Basisstationen miteinander verbinden sollen, ohne die anderen Frequenzen der Basisstationen zu stören. Diese verschiedenen Frequenzen werden dafür verwendet, dass die Handygespräche mittels Handover von einer Basisstation zu einer anderen Basisstation übergeben werden können (siehe Exkurs: Handover – Kapitel 16.2.). Die Bestimmung der minimalen Anzahl an Frequenzen ist natürlich von immenser Bedeutung für die Praxis.

Die Ausgangsposition für die Frequenzverteilung wurde bereits in den vorangegangenen Kapiteln festgelegt. Der Bereich für den Standort des Netzwerkes wurde bereits bestimmt. Des Weiteren wurden die Anzahl der Basisstationen (BTS) und die Anzahl der verschiedenen Vermittlungsstellen (MSC, GMSC, OMC) zwischen den einzelnen Basisstationen festgelegt.

- „MSC - Mobile Switching Center. Dieses Center übernimmt die Lenkung, Weiterleitung und Signalisierung der Anrufe innerhalb des Netzes vom Absender bis zum Empfänger.

⁵⁸ Clint 2001, S 446

⁵⁹ vgl. Clint 2001, S 446

- GMSC - Gateway Mobile Switching Center. Das GMSC verwaltet und vermittelt alle anderen Gespräche, die aus dem Festnetz in das Netz gelangen und umgekehrt.
- OMC - Operation und Maintenance Center. Im OMC wird die Kontrolle und Wartung von MSC und der Basisstationen durchgeführt, Verwaltung der Abrechnungen und führen von Statistiken. Weiters wird hier das Netz konfiguriert und es befindet sich das Sicherheitsmanagement im OMC.
- HLR - Home Location Register. Das HLR ist eine Datenbank, die zur Auffindung der mobilen Teilnehmer und zur Vermittlung verwendet wird.
- VLR - Visitor Location Register – Das VLR hat dieselbe Funktion wie das HLR.
- AUC - Authentication Centre. Das AUC ist ebenfalls eine Datenbank, die eine Kopie von den Daten enthält, die sich auf der SIM- Karte des Teilnehmers befinden. In dieser Datenbank sind die Schlüssel für die Authentifizierung der Benutzer und die Verschlüsselung ihrer Daten gespeichert, sodass diese Daten vor dem Zugriff Fremder und damit vor Missbrauch geschützt sind.
- EIR - Equipment Identity Register – Geräte-Identitätsregister⁶⁰

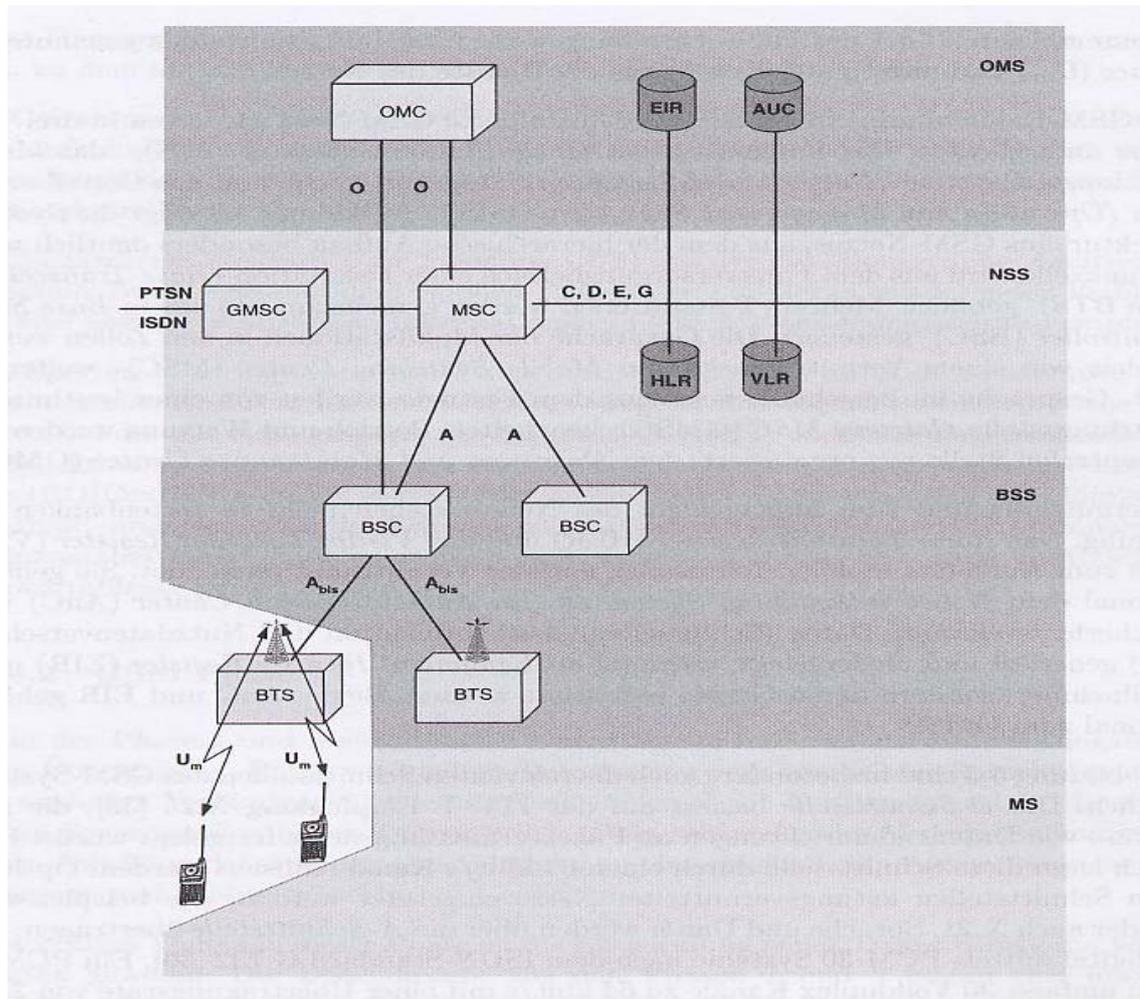
Durch das bereits gegebene Funknetzwerk und dem daraus resultierenden Funkverkehr zwischen den einzelnen Basisstationen ergeben sich für das Frequency Assignment Problem (FAP) zwei Optimierungsprobleme:

1. “The first problem consists of minimizing frequency interference with a fixed number of frequencies.
2. The second problem consists of minimizing the number of frequencies required in an interference-free assignment.”⁶¹

⁶⁰ Zogg 2002, S 29

⁶¹ Jin-Kao 1998, S 49

Die beschriebene Ausgangssituation könnte nun folgendermaßen aussehen:



(12. Abbildung: Systemarchitektur von GSM, Quelle: Duque-Antón 2002)

In folgenden Kapiteln werden die verschiedenen Frequenzen den einzelnen Basisstationen zugeteilt und zwar so, dass es zu keinen Störungen zwischen den einzelnen Basisstationen kommt.

9.2. Exkurs: Handover

Als Handover bezeichnet man den Kanalwechsel von einer Zelle zu einer anderen Zelle, um eine aktive Gesprächsverbindung aufrecht zu erhalten. Dieser Wechsel wird deshalb durchgeführt, weil die jeweiligen Feststationen eine geringe Sendeleistung haben. Die zugeordneten Frequenzen sollen nur in dem vordefinierten Bereich einer Zelle verwendet werden können. Durch diesen begrenzten Funkbereich wird gewährleistet,

dass nach einem Sicherheitsabstand auch andere Zellen ebenfalls diese Frequenzen benutzen können.

Es gibt zwei verschiedene Formen von Handovers:

„Intra-cell Handover – Dies ist die Übergabe eines laufenden Gespräches von einem Kanal zu einem anderen Kanal innerhalb derselben Zelle.

Inter-cell Handover - Das ist die Übergabe eines laufenden Gespräches von einem Kanal zu einem anderen Kanal an eine andere Zelle.“^{62, 63}

9.3. Kapazitätsplanung

Bei den GSM-Netzwerken muss nach der Bedeckungsplanung auf die Kapazitätsplanung übergegangen werden, damit genug Kapazität für den aufkommenden Telefonverkehr zur Verfügung steht. Die verfügbaren Frequenzen müssen den verschiedenen Basisstationen zugeordnet werden. Diesen Frequenzen werden Zahlen zugewiesen für das Set $F = \{1, 2, \dots, f_{\max}\}$. Um diese Frequenzen in einem Netzwerk effizient zu verwenden, werden sie innerhalb eines Netzwerkes mehrmals verwendet. Sie werden deshalb so angeordnet, dass sie sich nicht gegenseitig stören bzw. beeinflussen.⁶⁴

Die Frequenzplanung ist der letzte Schritt, nachdem die Basisstationen installiert wurden und die Konfigurationsparameter für die Antennen gesetzt wurden. Für diese Planung gibt es verschiedene Arten von Zuordnungsproblemen (Assignment Problems). Diese Lösungsmethoden werden in zwei Arten eingeteilt:

- Optimale Lösungsmethoden und
- Heuristische Lösungsmethoden.

Um diese Wiederverwendung von Frequenzen in einem Netzwerk zu verwalten, kommt das Frequency Assignment Problem (FAP) zur Anwendung, welches auch als

⁶² vgl. Duque-Antón 2002, S 44

⁶³ Tisal 2001, S 20

⁶⁴ vgl. Resende 2006, S 924

Automatic Frequency Planning (AFP) oder als Channel Assignment Problem (CAP) bekannt ist.⁶⁵ Das FAP kann in verschiedenen Formen auftreten. Dieses Auftreten hängt von der Größe der Bandbreiten ab und von der speziellen Technologie, welche zur Anwendung kommt, da es von großer praktischer Bedeutung für die verschiedenen Netzanbieter ist und auch unmittelbar zur Beziehung mit Optimierungsproblemen steht. Es kam bzw. kommt innerhalb der Operations Research Literatur zu einer großen Aufmerksamkeit für diesen Bereich.

Für dieses Frequency Assignment Problem (FAP) wurden verschiedene Modelle entwickelt bzw. werden bestehende Modelle weiterentwickelt.⁶⁶ Weiters wurden für die FAP's andere Optimierungsideen entwickelt. Wie zum Beispiel der Suchbaum (tree search) und weiters wurden für die verschiedenen Modelle sogenannte „lower bounding techniques“ entwickelt, die die unteren Grenzen bestimmen.

9.3.1. Optimale Lösungsmethoden

9.3.1.1. F-FAP

Beim F-FAP (The maximum service and minimum blocking frequency assignment problem) sind die Lösungen nicht einfach zu finden. Das F-FAP versucht so viele Frequenzen wie möglich zu erhalten – die 3. Nebenbedingung sichert die Frequenzen. Folgende Formulierung wird für diese Technik verwendet:

$$(1) \text{ „max } \sum_{v \in V} n(v)$$

$$(2) \sum_{f \in F(v)} x_{vf} = n(v) \quad \forall v \in V$$

$$(3) n(v) \leq m(v) \quad \forall v \in V$$

$$(4) x_{vf} + x_{wg} \leq 1 \quad \forall vw \in E, f \in F(v), g \in F(w): p_{vw}(f, g) > P_{\max}$$

$$(5) x_{vf} \in \{0,1\} \quad \forall v \in V, f \in F(v)$$

⁶⁵ vgl. Luna 2007, S 109

⁶⁶ vgl. Resende 2006, S 924

$$(6) \quad n(v) \in \mathbb{Z}_+ \quad \forall v \in V \text{ „67.}$$

Die Möglichkeit, dass Gespräche durch die Zelle blockiert werden, ist durch die folgende Erlang B Formel gegeben:

$$B(\lambda_v, n(v)) = \left(\sum_{k=0}^{n(v)} \frac{(\lambda_v)^k}{k!} \right)^{-1} \frac{(\lambda_v)^{n(v)}}{n(v)!} \text{ 67}$$

Die Bestandteile dieser Formel sind folgende:

- λ_v bezeichnet das Verkehrsaufkommen in Erlang
- v sind die Zellen
- $n(v)$ ist die Anzahl der angeordneten Kanäle

“This function describes the blocking probability for voice traffic with negative exponential distribution of the call inter-arrival time. Note that $B(\lambda_v, n(v))$ is strictly decreasing and convex in $n(v)$. Now, the objective function is a weighted average of the blocking probabilities of all vertices v , given by

$$\sum_{v \in V} w_v B(\lambda_v, n(v))$$

with $w_v = \lambda_v / \sum_{u \in V} \lambda_u$ being the traffic weighting factor.”^{68, 69}

9.3.1.2. Max-FAP

Das Max-FAP (Fischetti 2000) inkludiert mehrere Interferenzbedingungen:

⁶⁷ Aardal 2003, S 274

⁶⁸ Aardal 2003, S 274 u. 275

⁶⁹ vgl. Aardal 2003, S 274

$$\text{„} \sum_{w \in N(v)} I_{vf} x_{wf} + \frac{I_{vf}}{NFD} (x_{w,f-1} + x_{w,f+1}) \leq L + M(1 - x_{vf}) \quad \forall v \in V, \forall f \in F(v)\text{“}^{70}$$

In dieser Gleichung wird der Zweitkanal mit I_{vf} bestraft und auch der benachbarte Kanal wird bestraft, aber der Ausdruck $\frac{I_{vf}}{NFD}$. NFD (Net Filter Discriminator) ist ein Reduzierungsfaktor. Diese Bestrafung ist erforderlich, weil sich die beiden Kanäle gegenseitig beeinflussen würden. Weiters ist das obere Band der erlaubbaren Interferenzen L und für jedes Frequenzenpaar (v, f) fix und f ist die obere Grenze des Spektrums.

Dadurch, dass die oben angeführte Bedingung relativ schwierig zu handhaben ist wird sie auch von vielen Autoren nicht empfohlen.⁷¹

9.3.1.3. MO-FAP

Beim MO-FAP (Minimum order FAP) wird nach der günstigsten Lösung gesucht, was heißt, dass die Anzahl der möglichen Frequenzen möglichst gering gehalten werden soll. Dieses Frequency Assignment Problem basiert auf die 70er Jahre – die Frequenzen waren in dieser Zeit sehr teuer. Für die Gestaltung der Bedingungen werden zusätzliche Variablen eingesetzt, die bestimmen, ob die Frequenz benützt oder nicht benützt wird.

$$\text{„} y_f = 1 \text{ if frequency } f \in F \text{ is used and } y_f = 0 \text{ otherwise.}\text{“}^{72}$$

Daraus ergibt sich die folgende Formulierung für das MO-FAP:

- (1) „ $\min \sum_{f \in F} y_f$ “
- (2) $x_{vf} \leq y_f \quad \forall v \in V, f \in F(v)$
- (3) $\sum_{f \in F(v)} x_{vf} = m(v) \quad \forall v \in V$

⁷⁰ Aardal 2003, S 280

⁷¹ vgl. Aardal 2003, S 280 u. 286

⁷² Aardal 2003, S 275

- (4) $x_{vf} + x_{wg} \leq 1 \quad \forall vw \in E, f \in F(v), g \in F(w): p_{vw}(f, g) > p_{\max}$
- (5) $x_{vf} \in \{0,1\} \quad \forall v \in V, f \in F(v)$
- (6) $y_f \in \{0,1\} \quad \forall f \in F$ ^{73, 74}

9.3.1.4. MS-FAP

Das MS-FAP (Minimum Span Frequency Assignment Problem) ermittelt den Bereich zwischen der höchsten und der niedrigsten Frequenz, die benützt werden. Der ermittelte Bereich zwischen diesen Frequenzen bestimmt die Kosten, die entstehen und deshalb müssen diese minimiert werden. Auch bei diesem Frequency Assignment Problem werden neue Variablen eingeführt, welche die höchste Frequenz z_{\max} und die niedrigste Frequenz z_{\min} bestimmen. Daraus folgt diese Formulierung:

- (1) „min $z_{\max} - z_{\min}$
- (2) $\sum_{f \in F(v)} x_{vf} = m(v) \quad \forall v \in V$
- (3) $x_{vf} + x_{wg} \leq 1 \quad \forall vw \in E, f \in F(v), g \in F(w): p_{vw}(f, g) > p_{\max}$
- (4) $z_{\max} \geq fy_f \quad \forall f \in F$
- (5) $z_{\min} \leq fy_f + f_{\max}(1 - y_f) \quad \forall f \in F$
- (6) $x_{vf} \leq y_j \quad \forall v \in V, f \in F(v)$
- (7) $x_{vf} \in \{0,1\} \quad \forall v \in V, f \in F(v)$
- (8) $y_f \in \{0,1\} \quad \forall f \in F$
- (9) $z_{\min}, z_{\max} \in Z_+$ ⁷⁵

Erläuterungen: f_{\max} ist die größte erhältliche Frequenz. Die 4. und 5. Nebenbedingung garantieren, dass die Variablen mit den richtigen Werten versehen wurden. ⁷⁶

⁷³ Aardal 2003, S 275

⁷⁴ vgl. Aardal 2003, S 275 – 276

⁷⁵ Aardal 2003, S 276

⁷⁶ vgl. Aardal 2003, S 276

Weiters wurde noch eine andere Formulierung für das MS-FAP von Giortzis und Turner (1997) präsentiert. Sie haben die Terme z_{\max} und z_{\min} durch binäre Variablen ersetzt, welche durch weitere Nebenbedingungen mit den richtigen Werten versehen werden.

$$u_f = \begin{cases} 1 & \text{if frequency } f \in F \text{ is the highest one used} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$l_f = \begin{cases} 1 & \text{if frequency } f \in F \text{ is the lowest one used} \text{ „77} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Mit diesen neuen Variablen hat das MS-FAP nun folgendes Aussehen erhalten:

- (1) „min $\sum_{f \in F} fu_f - \sum_{f \in F} fl_f$
- (2) s.t. $\sum_{f \in F(v)} x_{vf} = m(v) \quad \forall v \in V$
- (3) $x_{vf} + x_{wg} \leq 1 \quad \forall vw \in E, f \in F(v), g \in F(w): p_{vw}(f, g) > p_{\max}$
- (4) $\sum_{f \in F} u_f = 1$
- (5) $\sum_{f \in F} l_f = 1$
- (6) $x_{vf} + u_g \leq 1 \quad \forall v \in V, f \in F(v), g \in F: f > g$
- (7) $x_{vf} + l_g \leq 1 \quad \forall v \in V, f \in F(v), g \in F: f > g$
- (8) $x_{vf} \in \{0,1\} \quad \forall v \in V, f \in F(v)$
- (9) $u_f \in \{0,1\} \quad \forall f \in F$
- (10) $l_f \in \{0,1\} \quad \forall f \in F$ „78

Die 4. und die 5. Nebenbedingung sichern, dass höchste und niedrigste Frequenz vorhanden sind. Dem gegenüber verhindert die 6. Nebenbedingung, dass die maximale

⁷⁷ Aardal S 276

⁷⁸ Aardal S 277

Anzahl an Frequenzen nicht überschritten wird und die 7. Nebenbedingung verhindert, dass die minimale Anzahl an Frequenzen nicht unterschritten wird.⁷⁹

9.3.1.5. MB-FAP

“In case all assignments contain some unacceptable interference, we can decide to find a partial assignment that minimizes the overall blocking probability. In the minimum blocking frequency assignment problem (MB-FAP), the problem is to assign frequencies in such a way that no unacceptable interference occurs and the overall blocking probability of the network is minimized.”⁸⁰

9.3.1.6. MI FAP

Die Grundversion von MI-FAP (Minimum Interference Frequency Assingment Problem) berücksichtigt nur paarweise die Interferenzen. Die Interferenzen sind messbar auf Grund der unbeantworteten Anfragen von Verbindungen.

“Specifically, if v and w are potentially interfering TRXs and f, g two available frequencies (not necessarily distinct), then we associate a penalty p_{vwfg} to represent the interference (cost) generated when v is assigned to f and w is assigned which minimizes the sum of the penalty costs.”⁸¹

Um ein 0-1 lineares Programm zu beschreiben, wird eine Variabel x_{vf} für jeden Eckpunkt und die dafür verwendete Frequenz $f \in F$ benötigt:

$$x_{vf} = \begin{cases} 1 & \text{if frequency } f \in F \text{ is assigned to vertex } v \in V \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \text{“}^{81}$$

⁷⁹ vgl. Aardal S 276 - 277

⁸⁰ <http://fap.zib.de/>

⁸¹ Resende 2006, S 927

Der Wert der Objekte von den Interferenzen zwischen v und w kann als $\sum_{f,g \in G} p_{vwfg} x_{vf} x_{wg}$ ausgedrückt werden. Dies führt zu der folgenden Funktion:

$$\text{„min} \quad \sum_{\{v,w\} \in E} \sum_{f,g \in F} p_{vwfg} x_{vf} x_{wg}$$

„In order to linearize the quadratic terms $x_{vf} x_{wg}$, we define the variables $z_{vwfg} = x_{vf} x_{wg}$ for all $v, w \in V$ and all $f, g \in F$, i.e.,

$$z_{vwfg} = \begin{cases} 1 & \text{if } x_{vf} * x_{wg} = 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

“To enforce z_{vwfg} to be one when $x_{vf} = x_{wg} = 1$, we add the following constraints to the formulation:

$$x_{vf} + x_{wg} \leq 1 + z_{vwfg} \quad \forall \{v, w\} \in E, \forall f, g \in F$$

By substitution, the quadratic form of the objective function becomes the following linear expression:

$$\text{min} \quad \sum_{\{v,w\} \in E} \sum_{f,g \in F} p_{vwfg} z_{vwfg}.$$

Finally, the requirement that $m(v)$ frequencies have to be assigned to each vertex v is modelled by the following multiplicity constraints:

$$\sum_{f \in F} x_{vf} = m(v) \quad \forall v \in V. \text{“}^{82}$$

Das MI-FAP ist schwieriger zu lösen, als all die anderen Varianten des Frequency Assignment Problems. Dies ist deshalb der Fall, weil die harten Interferenz-Nebenbedingungen in nachgebenden Nebenbedingungen gedreht werden. Für diese

⁸² Resende 2006, S 927

Drehungen werden Bestrafungen benutzt. Dies hat wiederherum bewirkt, dass es zu einer Vielfalt an Lösungsmöglichkeiten gekommen ist.⁸³

9.3.1.7. RL FAP

Beim Radio link frequency allocation problem (RL FAP) ist das Ziel so ähnlich wie beim MO FAP, aber es wird hier ein neuer Parameter eingeführt. Nämlich die exakte oder minimale Differenz zwischen den Frequenzen der verschiedenen Knoten.

9.3.2. Heuristische Lösungsmethoden

Dieser Bereich besteht aus Heuristiken, welche neue Lösungen kreieren und anderen Heuristiken, die versuchen bereits bestehende Lösungen mit kleinen Veränderungen zu verbessern. Weiters gibt es Heuristiken, die schlechte Lösungen unter bestimmten Umständen erlauben und andere beginnen bereits mit einem Satz Lösungen, die wiederherum durch Änderungen verbessert werden.

9.3.2.1. Greedy-Verfahren

Das Greedy-Verfahren (Greedy algorithms) gestaltet eine Frequenzaufteilung durch wiederholendes Selektieren von Eckpunkten der verschiedenen Antennenstandorte und durch die Anordnung von passenden Frequenzen. Bei jedem Iterationsschritt wird ein neues Element aus dem Anfangsset eingefügt, bis eine passende Lösung gefunden wurde. Ein bedeutender Punkt dieses Greedy-Verfahrens ist es, dass die Auswahl bei jedem Durchgang unumstößlich ist.⁸⁴

Der Algorithmus enthält zwei Arten von Sets. Das eine Set beinhaltet alle gewählten Gegenstände und das andere Set beinhaltet alle abgelehnten Gegenstände. Dieser Algorithmus liefert manchmal eine optimale Lösung aber meistens auch nicht. Das Greedy-Verfahren besteht aus den vier folgenden Funktionen:

⁸³ vgl. Aardal 2006, S 289

⁸⁴ vgl. Aardal 2006 S 292

1. “A function that checks whether chosen set of items provide a solution.
2. A function that checks the feasibility of a set.
3. The selection function tells which of the candidates is the most promising.
4. An objective function, which does not appear explicitly, gives the value of a solution.”⁸⁵

Die nachfolgende Vorlage zeigt das Greedy-Verfahren.

```

procedure GreedyAlgorithm()
1.   $S \leftarrow 0$ ;
2.  Evaluate the incremental cost of each element  $e \in E$  ;
3.  while  $S$  ist not a complete feasible solution do
4.      Select the element  $s \in E$  with the smallest incremental cost;
5.       $S \leftarrow S \cup \{s\}$ ;
6.      Update the incremental cost of each element  $e \in E \setminus S$ ;
7.  end_while;
8.  return  $S$ ;
end.

```

(13: Abbildung: Greedy Algorithmus, Quelle: Resende 2006)

Die Lösungen, die durch das Greedy-Verfahren gefunden wurden, sind nicht unbedingt die optimalen Lösungen. Diese gefundenen Lösungen werden daher oft als Ausgangslösungen für andere Metaheuristiken oder für das nachfolgende Local Search (LS) verwendet.

9.3.2.2. Local Search (LS)

Das Local Search wurde für kombinierte Probleme entwickelt. Es wird mit einer bereits gegebenen Lösung begonnen und diese wird mit einer besseren Lösung ersetzt. Wenn keine weiteren besseren Lösungen mehr existieren, wird das Local Search gestoppt.⁸⁶

Das Local Search basiert auf einer einfachen aber genialen Idee. In der realen Welt ist die Problemstellung entweder sehr groß oder sie ist nicht rein genug in ihrem Aufbau, was eine Problemlösung schwierig macht. Die meisten Lösungsmethoden können mit

⁸⁵ <http://www.personel.kent.edu>

⁸⁶ vgl. Aardal 2003, S 294

solchen reellen Dingen nicht umgehen und daher ist das Local Search sehr dafür geeignet, eine annehmbare oder optimale Lösung zu finden.

Für das Local Search werden nun die folgenden Parameter definiert:

- P ist das Optimierungsproblem
- s ist die derzeitige Lösung
- $N(s)$ enthält alle möglichen Lösung für P – Lösungsraum
- Neue Lösung $x - x \in N(s)$ ⁸⁷

Der Pseudocode wird in der nachfolgenden Tabelle wiedergegeben:

```
procedure LocalSearch( $S$ )
1.  while  $S$  is not locally optimal do
2.      Find  $S' \in N(S)$  with  $f(S') < f(S)$ ;
3.       $S \leftarrow S'$ ;
4.  end;
5.  return  $S$ ;
end.
```

(14. Abbildung: Local Search Algorithmus, Quelle: Resende 2006)

Für das Local Search gibt es verschiedene Grundtechniken nach Glover 2003:

- „Small Neighborhoods with Side Constraints
Die schnellen Local Search benutzen kleine Nahbereichslösungen und können daher mit kürzeren Computerleistungen rechnen.
- Exploring Large Neighborhood with CP
Hier ist der zu betrachtende Bereich sehr viel größer. Dieser Bereich wird mittels CP (Constraint Programming) untersucht.
- Constructive Algorithmus

⁸⁷ vgl. Glover 2003, S 369 - 370

Der Constructive Algorithmus tätigt Entscheidungen und macht Fehler rückgängig.

- Greedy Constructive Algorithms
Der Constructive Algorithmus wird von einer Heuristik begleitet und die Idee ist, dass der Konstruktionsprozess den Nahbereich einer Greedy Entscheidung nach jedem Schritt untersucht.
- Lookahead Algorithms
Einfache Heuristiken untersuchen nur die unmittelbaren Konsequenzen und nicht die Langzeitkonsequenzen.
- Restricted Candidate Lists
Nach jedem gewählten Punkt wird der bevorzugte Bereich genauso versorgt wie die anderen Bereiche. Dies wird durchgeführt, um die beste Lösung zu finden.
- Discrepancy-based Search
Das Restricted Candidate Lists hat einen neuen Bereich definiert und dieser kann normalerweise nicht durch GRASP oder durch andere Untersuchungen erforscht, werden, daher kommt das Discrepancy-based Search zum Einsatz. Der neue Bereich wird durch Konstruktionsbewegungen und Rückwärtsbewegungen untersucht.
- Local search over priority list
In ähnlicher Weise arbeitet die Local search über priority list wie das Discrepancy-based Search. Die regionalen Bewegungen können direkt zu der Rangliste bezogen werden.
- Improving Solutions⁸⁸
Hier werden einfach die gefundenen Lösungen mit einer lokalen Suche weiter verbessert.⁸⁹

⁸⁸ Glover 2003, S 371 - 379

⁸⁹ vgl. Glover 2003, S 371 - 379

9.3.2.3. Tabu Search (TS)

Das Tabu Search ist eine lokale Suchmethode und steht im Gegensatz zum Local Search, weil es auch das Aufzeigen von schlechten Lösungsansätzen erlaubt. Bei jedem Durchgang wird die neue beste Lösung die neue Lösung.⁹⁰

Tabu Search ist eine Nachbarschaftssuche das heißt, dass die Menge aller Lösungen, die von der aktuellen Lösung mit nur einem Zug erreicht werden können. Das Suchverfahren kann mit Restriktionen belegt werden, damit das Tabu Search abgehalten wird bestimmte Züge zu wählen, die bestimmte Attribute enthalten. Mit diesen Restriktionen lassen sich Wiederholungen vermeiden.

Die nun folgende Tabelle gibt den Vorgang beim Tabu Search wieder:

```
procedure TabuSearch()
1.  Generate an initial solution  $S_0$  and set  $S \leftarrow S_0$ ;
2.   $S^* \leftarrow S$ ;
3.   $T \leftarrow 0$ ;
4.  while stopping criterion is not reached do
5.       $S' \leftarrow \text{SelectBestNeighbor}(N(S) \setminus T)$ ;
6.      if  $f(S') < f(S^*)$  then
7.           $S^* \leftarrow S'$ ;
8.      end_if;
9.      if  $|T| = \text{TabuTenure}$  then
10.         Remove from  $T$  the oldest solution;
11.     end_if;
12.      $T \leftarrow T \cup S$ ;
13.      $S \leftarrow S'$ ;
14. end_while;
15. return  $S^*$ ;
end.
```

(15. Abbildung: Tabu Search Heuristik, Quelle: Resende 2006)

Erklärung der verwendeten Ausdrücke, die in der Tabelle vorkommen:

- S_0 = Anfangslösung (initial solution)
- S = Lösung (solution)

⁹⁰ vgl. Aardal 2003, S 297

- $N(S)$ = Nachbarschaftslösung bzw. Nahbereichslösung
- *TabuTenure* = Ist eine Liste, die die Lösungen enthält, welche tabu bzw. verboten sind.
- S' = Die beste nicht verbotene Nachbarschaftslösung
- T = Wenn die *TabuTenure* voll ist, wird die älteste verbotene Lösung aus der Liste entfernt.

Jin-Kao Hao, Raphael Dorne und Philippe Galinier haben in ihrer Arbeit ein Tabu Search vorgestellt, welches in der Lage ist, für sehr große Funknetzwerke Lösungen anzubieten. Sie gehen davon aus, dass die Funknetzwerke in der Zukunft rasant wachsen werden und bis zu 2.000 Basisstationen aufweisen könnten.

Die folgende Tabelle beinhaltet den Algorithmus für das Tabu Search, das von Hao, Dorne und Galinier generiert wurde.⁹¹

```

Tabu algorithm
begin
   $T = 0$  /* to initialize tabu matrix */
   $NB = 0$  /* to initialize iteration counter */
   $s = \text{generate}()$  /* to generate an initial solution */
   $k = \alpha |V^*|$  /* to initialize tabu tenure */
   $s^* = s$  /* to record the best configuration found so far */
   $f^* = f(s^*)$ 
  while  $NB < MAX$  do
     $NB = NB + 1$ 
    choose a best neighbor  $s' = s + (i, m, new\_v) \in V^*$ 
    such that  $NB > T[i, new\_v]$  or  $f(s') < f^*$ 
     $s = s'$ 
     $T[i, old\_v] = NB + k$ ; /*  $(C_i, old\_v)$  becomes tabu */
    update  $\delta$  matrix
    update tabu tenure  $k$  ( $k = \alpha |V^*|$ )
    if  $f(s) < f^*$  then
       $s^* = s$ 
       $f^* = f(s^*)$ 
  end

```

(16. Abbildung: Tabu Algorithmus für FAP, Quelle: Hao 1998)

⁹¹ vgl. Hao 1998, S 52 - 61

„Das Tabu Search ist sicher das effektivste Verfahren zur Lösung von Optimierungsproblemen. Jedoch erfordert die Durchführung des Tabu Search eine sehr große Anzahl von Parametern, die dafür gesetzt werden müssen, um eine gute Performance für die Praxis zu erreichen.“⁹²

9.3.2.4. Simulated Annealing (SA)

Das Simulated Annealing ist ein Local Search Algorithmus und es ist einfach in der Anwendung. Genauso wie das Tabu Search akzeptiert das Simulated Annealing auch schlechte Lösungen. Jedoch mit der Ausnahme, dass die neue Lösung auch die bessere Lösung ist.⁹³

Die Hauptbestandteile des Simulated Annealing sind:

1. „initial solution,
2. neighborhood structure,
3. fitness function, and
4. cooling strategy.“⁹⁴

Das Simulated Annealing wurde nach der Analogie eines physikalischen Prozesses mit festen Körpern benannt. Bei diesem Prozess werden Kristalle erhitzt und danach langsam abgekühlt, bis diese eine entsprechende Form erhalten und keine kristalline Defekte aufweisen.

“At each iteration of a simulated annealing algorithm applied to a discrete optimization problem, the objective function generates values for two solutions (the current solution and a newly selected solution) are compared.”⁹⁵

In diesem Bereich werden zuerst Terme definiert, um mit dem Simulated Annealing Algorithmus fortfahren zu können.

⁹² Resende 2006, S 111 - 112

⁹³ vgl. Aardal 2003, S 300

⁹⁴ Aardal 2003, S 300

⁹⁵ Glover 2003, S 288

- Der Term Ω wird der Lösungsraum sein (dies ist der Raum für alle möglichen Lösungen).
- $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ ist die Zielfunktion, die an den Lösungsraum definiert wird.
- Es wird nach dem globalen Minimum ω^* gesucht. Weiters muss die Zielfunktion begrenzt werden, damit es garantiert ω^* existiert.
- $N(\omega)$ ist die Nahbereichsfunktion für $\omega \in \Omega$. Es ist deshalb notwendig, weil jede Lösung eine Nahbereichslösung ist.

Weiters kann die Nahbereichsfunktion $N(\omega)$ schon im ersten Iterationsschritt gefunden werden. Das Simulated Annealing beginnt mit einer Anfangslösung $\omega \in \Omega$ und daraus wird die nächste Lösung $\omega' \in N(\omega)$ geschaffen. Nun kann die neue geschaffene Lösung ω' akzeptiert werden, wenn folgende Wahrscheinlichkeit erfüllt ist:

$$P\{\text{Accept } \omega' \text{ as next solution}\} = \begin{cases} \exp[-(f(\omega') - f(\omega))] & \text{if } f(\omega') - f(\omega) > 0 \\ 1 & \text{if } f(\omega') - f(\omega) \leq 0 \end{cases}$$

Diese Wahrscheinlichkeit ist das Grundelement vom Simulated Annealing für den Suchprozess.

Jetzt wird der Term t_k als der Temperaturparameter definiert:

$$t_k > 0 \text{ for all } k \text{ and } \lim_{k \rightarrow +\infty} t_k = 0 \text{ } ^{96, 97}$$

Der Aufbau des Simulated Annealing Algorithmus wird nach Eglese, 1990 wiedergegeben.

“Statement of Algorithm

Simulated annealing is outlined in pseudo-code (Eglese, 1990)

Select an initial solution $\omega \in \Omega$

⁹⁶ Glover 2003, S 289

⁹⁷ vgl. Glover 2003, S 288 - 289

Select the temperature change counter $k = 0$

Select a temperature cooling schedule, t_k

Select an initial temperature $T = t_0 \geq 0$

Select a repetition schedule, M_k that defines the number of iterations executed at each temperature, t_k

Repeat

Set repetition counter $m = 0$

Repeat

Generate a solution $\omega' \in N(\omega)$

Calculate $\Delta_{\omega, \omega'} = f(\omega') - f(\omega)$

If $\Delta_{\omega, \omega'} \leq 0$, then $\omega \leftarrow \omega'$

If $\Delta_{\omega, \omega'} > 0$, then $\omega \leftarrow \omega'$ with probability $\exp(-\Delta_{\omega, \omega'} / t_k)$

$m \leftarrow m + 1$

Until $m = M_k$

$k \leftarrow k + 1$

Until stopping criterion is met⁹⁸

9.3.2.5. Genetic Algorithm (GA)

Der Genetic Algorithm ist vom natürlichen Prozess der Reproduktion inspiriert. Die Metamorphosen stehen für die geschaffenen Lösungen ein. Eine Kette von Chromosomen wird als Ausgangslösung verwendet und bei jedem neuen Durchlauf wird eine neue Lösung geschaffen, die entweder verworfen wird oder als Ausgangsposition für eine neue Lösung verwendet wird.⁹⁹

Gegenüber den anderen Metaheuristiken untersucht der Genetik Algorithmus eine Reihe von Lösungen und nicht eine einzige Lösung ausgehend von der Anfangslösung.

Die Hauptfaktoren für den Genetic Algorithm sind die nun folgenden:

⁹⁸ Glover 2003, S 290

⁹⁹ vgl. Kotrotsos 2001, S 298 - 299

- **SelectMates:** a subset of solution is selected, either randomly or using fitness information to privilege promising solutions.
- **RecombineParents:** pairs of solutions are combined and new solutions are generated (crossover operations)
- **ApplyMutations:** a few solutions are randomly selected and go through small modifications in their structure (mutation operation)
- **SelectBest:** the best solutions are selected, while the others are eliminated.¹⁰⁰

Der Pseudocode von den Grundsritten wird in folgender Tabelle beschrieben:

```

procedure GeneticAlgorithm()
1.  Generate the initial solution  $P$  of solution;
2.   $k \leftarrow 0$  ;
3.  EvaluateFitness( $P$ );
4.  while stopping criterion is not reached do
5.       $Parents \leftarrow$  SelectMates( $P$ );
6.       $Children \leftarrow$  RecombineParents( $Parents$ );
7.       $Children \leftarrow$  ApplyMutation( $Children$ );
8.      EvaluateFitness( $Children$ );
9.       $P \leftarrow$  SelectBest( $Children$ );
10.      $k \leftarrow k + 1$ ;
11. end_while
12. return the best solution in  $P$ ;
end.

```

(17. Abbildung: Genetic Algorithmus, Quelle: Resende 2006)

In den folgenden drei Möglichkeiten kann eine Lösung mit dem Genetic Algorithm gefunden werden:

1. Möglichkeit: Jedes Chromosom ist ein Vektor $s \in Z^{|V|}$ und s_j ist die Frequenz, die durch v_j bestimmt wird. Das Graphenmodell ist festgelegt, wenn mehrere Anforderungen bestimmt wurden.

¹⁰⁰ Resende 2006, S 116

2. Möglichkeit: Jedes Chromosom ist ein Teil von den Vektoren in der Familie f_{\max} und den Teilmengen $S_1, S_2, \dots, S_{f_{\max}}$, die als Gene bezeichnet werden. Weiters ist S_f die Menge der Vektoren, die die festgelegten Frequenzen beinhalten.
3. Möglichkeit: Jedes Chromosom ist die Permutation σ von den Vektoren $|V|$ und dieses wiederum repräsentiert die passende Verbindung mit σ . Auch hier ist das Graphenmodell festgelegt, wenn mehrere Anforderungen bestimmt wurden.¹⁰¹

9.3.2.6. Artificial Neural Networks (ANN)

Die Grundlage ist identisch mit dem Genetic Algorithm. Die Lösungen werden durch ein Netzwerk von Neuronen gefunden, deren Status repräsentiert die Werte der Variablen, welche sich im Modell befinden.

Diese Bestandteile befinden sich im Artificial Neural Networks:

1. "Neuron definition: The mapping between neuron states and solutions.
2. Energy function: The objective to be minimized.
3. Synapses (coupling weights). Weighted connections between two neurons
4. Local updating rule. Function of the neighbour states and the coupling weights used to update the state of a neuron."¹⁰²

Auf folgende Weise wird ein neurales Netzwerk gebildet:

- Man stellt eine Verbindung mit einem Neuron V_{if} und jedem Paar (i, f) her - wo $i \in V$ und $f \in V$ sind.

¹⁰¹ vgl. Aardal 2003, S 302 - 303

¹⁰² Aardal 2003, S 307

- Zwei Neuronen sind miteinander verbunden, wenn die entsprechenden Vektoren im Interferenzengraphen anliegen.
- Die Energiefunktion ist eine gewichtete Summe von mehreren Begriffen, wie zum Beispiel Beschränkungen über die Anforderungen, Beschränkungen der Interferenzen oder speziellen Erfordernissen.¹⁰³

9.3.2.7. Ant Colony Optimization

Die Ant Colony Optimization wurde durch das Verhalten von Ameisen angeregt. Sie ist ein Metaheuristik Algorithmus. Im Ameisenhügel existiert eine bestimmte Anzahl an Ameisen und jede einzelne kann eine Lösung durch Bewegung schaffen. Eine Bewegung wird von zwei Parametern kontrolliert:

- Attraktivität: Dies ist auf die Struktur des Problems gerichtet – Kosten und die Nebenbedingungen.
- Pheromonenpfad: Zählt, wie oft eine gegebene Lösung zum Erfolg führt. Der Pheromonenpfad ist beendet, wenn alle Ameisen ihre Lösungsschritte beendet haben. Ein ansteigen bzw. ein abflauen der Bewegungen führt entweder zu schlechten oder zu guten Lösungen.¹⁰⁴

“Ants can be characterized as stochastic construction procedures which build solutions moving on the construction graph $G = (C, L)$. Ants do not move arbitrarily on G , but rather follow a construction policy which is a function of the problem constraints Ω . In general, ants try to build feasible solutions, but, if necessary, they can generate infeasible solutions.”¹⁰⁵

¹⁰³ vgl. Aardal 2003, S 307

¹⁰⁴ vgl. Aardal 2003, S 308

¹⁰⁵ Glover 2003, S 256 - 257

9.3.2.8. Ad hoc

Hier wird die Strategie in zwei Phasen unterteilt:

- 1. Phase: Ein Teilproblem sollte ausgesucht und gelöst werden. Dieses ausgewählte Teilproblem sollte klein genug sein, damit die Bearbeitung erleichtert wird.
- 2. Phase: Die Lösung, die in der 1. Phase gefunden wurde, wird so erweitert, dass es für das Originalproblem verwendet werden kann.¹⁰⁶

Diese beiden Phasen werden solange wiederholt, bis eine mögliche Lösung für das Problem gefunden ist.

9.3.2.9. Graph Coloring Problem

Dieses Problem wurde von Metzger 1970 auf Grund der Ähnlichkeit mit dem FAP angepasst.

“This immediate correspondence is obtained by associating a graph $G = (V, E)$ with network R , defining V to be the set of antennas (TRXs) of R , and by letting $\{i, j\} \in E$ if and only if TRX i and TRX j interfere.”¹⁰⁷

Dieses Problem wurde auch von Costa & Hertz (1997) aufgegriffen. Es ist ein nicht gerichteter Graph $G = (N, A)$ gegeben. Das Ziel ist, eine minimale Anzahl an farbigen Verbindungen zu den einzelnen Knoten zu finden, so dass kein Paar von Verbindungen dieselbe Farbe aufweist.¹⁰⁸

9.3.2.10. T-Coloring

¹⁰⁶ vgl. Aardal 2003, S 310

¹⁰⁷ Resende 2006, S 924

¹⁰⁸ vgl. Dorigo 2004, S 166 - 167

Diese Heuristik versucht, nicht die Kosten zu senken, sondern die Anzahl der verschiedenen Frequenzen zu minimieren. Daher liefert das T-Coloring Ergebnisse von schlechter Qualität.¹⁰⁹

9.3.2.11. Dual Greedy

Die Dual Greedy Heuristik sucht nicht nach der besten Lösung, sondern nach der schlechtesten Lösung. Diese gefundene Lösung wird entfernt und nach einer neuen schlechten Lösung gesucht. Diese Schritte werden solange wiederholt, bis nur mehr eine Lösung übrig bleibt. Diese letzte Lösung ist eine mögliche Lösung.¹¹⁰

9.3.2.12. DSATUR With Costs

Das verfügbare Spektrum an Frequenzen soll so eingesetzt werden, dass die Kosten minimiert werden. Diese Heuristik liefert in kurzer Zeit gute Ergebnisse.¹¹¹

9.3.2.12. Iterated 1-OPT

Diese Heuristik versucht eine bestehende Anordnung zu verbessern. Das heißt, es wird von der bestehenden Anordnung eine Frequenz geändert. Falls diese neue Anordnung günstiger ist als die vorherige – so wird diese gewählt. Falls nicht, wird diese verworfen.¹¹²

9.3.2.13. Min-cost flow

Diese Heuristik versucht ebenfalls wie die Iterated 1-OPT eine bereits bestehende Anordnung zu verbessern. Ansonsten hat diese Heuristik keine besondere Bedeutung.¹¹³

¹⁰⁹ vgl. Borndörfer 1998, S 77 u. 89

¹¹⁰ vgl. Borndörfer 1998, S 78

¹¹¹ vgl. Borndörfer 1998, S 80

¹¹² vgl. Borndörfer 1998, S 81

¹¹³ vgl. Borndörfer 1998, S 83

9.3.3. *Schlufßbetrachtung*

Bei den verschiedenen Heuristiken werden bereits bestehende Lösungen verwendet und diese werden durch kleine Veränderungen in jeweiligen Iterationsschritten verbessert bis eine gute Lösung gefunden wurde. Weiters besteht auch die Möglichkeit schlechte Lösungen zuzulassen wie es zum Beispiel der Tabu Search zulässt.

Der Greedy Algorithmus setzt nicht auf diese Strategie der anderen Heuristiken, sondern baut sich seine eigene erste Lösung auf und versucht durch kleine Veränderungen diese zu verbessern.

Auf eine andere von Strategie setzt der Genetic Algorithms dieser beginnt mit mehreren Lösungen, die Generationen genannt werden. Weiters werden durch Iterationsschritte neue Generationen geschaffen, welche wiederherum mit den alten Generationen kombiniert werden. Das Artificial Neural Networks setzt auf eine ähnliche Methode und erreicht die Lösungen durch das Nachahmen des Verhaltens von Neuronen.¹¹⁴

Die Optimalen Lösungsmethoden liefern zwar großteils bessere Lösungen als die Heuristiken, sind aber auch komplizierter in der Anwendung. Aber hier dasselbe Problem wie bei den Heuristiken: In der Praxis können die gefundenen Lösungen angewendet werden, weil sie die tatsächlichen Gegebenheiten nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grund kann nur eine annehmbare Lösung zur Anwendung gebracht werden.

Welche nun von diesen beiden Lösungsmethoden endgültig angewendet wird, hängt sicher vielmehr von der jeweiligen Aufgabenstellung ab.

10. Lineare Programmierung von Netzwerken

In diesem Kapitel werden verschiedene lineare Programmierungen beschrieben, welche die minimale Anzahl an Basisstation bestimmen, die zur Abdeckung einer möglichst großen Anzahl von mobilen Teilnehmern nötig sind. Des Weiteren benötigen diese

¹¹⁴ vgl. Aardal 2003, S 292

linearen Programmierungen zusammengefasste Berechnungen und erfordern umfassende Kenntnisse über alle Koeffizienten.¹¹⁵

10.1. Modellbeschreibung

Dieses Modell enthält eine Anzahl von mobilen Teilnehmern M , die von einer Anzahl von Basisstationen C bedient werden. P_{mc} ist die Sendestärke von einer Basisstation n zu den mobilen Teilnehmern m . L_c ist die Beschickung von einer Basisstation c . Daraus ergibt sich folgende Formel:

$$„L_c := \sum_{m=1}^M P_{mc} “^{116}$$

Des Weiteren soll die maximale Beschickung zu den Basisstationen minimiert werden, während der SINR (Signal-to-Noise-and-Interference-Ratio) alle Anforderungen der mobilen Teilnehmer erfüllt.¹¹⁷

$$„L := \max_{c=1,\dots,C} L_c “^{116}$$

10.2. Constant-interference case

Zuerst wird die Interferenz von den mobilen Teilnehmern m geschätzt, um einem fixen Wert von I_m zu erhalten, der von der Sendekraft der Basisstationen unabhängig ist. Eine niedrige Grenze für die maximale Ladung von einer Basisstation dürfte von der folgenden linearen Programmierung abhängen:

$$\begin{array}{ll} \text{„min} & L \\ \text{subject to:} & L \geq L_c = \sum_{m=1}^M P_{mc} \quad c = 1, \dots, C \end{array}$$

¹¹⁵ vgl. Resende 2006, S 944 und 962

¹¹⁶ Resende 2006, S 944

¹¹⁷ vgl. Resende 2006, S 944

$$\sum_{c=1}^C \alpha_{mc} P_{mc} \geq \zeta_m \quad m = 1, \dots, M$$

$$P_{mc} \geq 0 \quad m = 1, \dots, M, c = 1, \dots, C$$

mit $\zeta_m := \gamma(\eta + I_m)$.¹¹⁸

Die Dual Version von der linearen Programmierung hat folgendes Aussehen:

$$\begin{aligned} & \text{“max} && \sum_{m=1}^M \zeta_m \mu_m \\ \text{subject to:} &&& \sum_{c=1}^C \lambda_c \leq 1 \\ &&& \alpha_{mc} \mu_m \leq \lambda_c \quad m = 1, \dots, M, c = 1, \dots, C \\ &&& \lambda_c, \mu_m \geq 0 \quad m = 1, \dots, M, c = 1, \dots, C \text{”}^{119} \end{aligned}$$

Die Dual Variablen werden mit λ_c und μ_m dargestellt. Das Dual Problem liefert eine endliche Lösung, wenn alle $m = 1, \dots, M$:

$$\text{“} \min_{c=1, \dots, C} \alpha_{mc} > 0 \text{”}^{119}$$

Further observe that $L^* > L_c^*$ cannot occur unless $\alpha_{mc} = 0$ for all m with $\mu_m^* > 0$. This in fact follows from the complementary slackness conditions, which imply that $L^* > L_c^*$ forces $\lambda_c^* = 0$. In particular, when $\alpha_{mc} = 0$ for all $m = 1, \dots, M, c = 1, \dots, C$, we must have $L_c^* = L$ for all $c = 1, \dots, C$.

Since optimality demands:

$$\text{”} \sum_{c=1}^C \lambda_c^* = 1 \text{ and } \mu_m^* = \min_{c=1, \dots, C} \lambda_c^* / \alpha_{mc} \text{”}^{119}$$

¹¹⁸ Resende 2006, S 945

¹¹⁹ Resende 2006, S 945

Die letzten Variablen werden entfernt und das duale Problem hat jetzt eine neue prägnante Gestalt angenommen:

$$\begin{aligned}
 & \text{“max} && \sum_{m=1}^M \zeta_m \min_{c=1,\dots,C} \lambda_c / \alpha_{mc} \\
 \text{subject to:} &&& \sum_{c=1}^C \lambda_c = 1 \\
 &&& \lambda_c \geq 0 \quad c = 1, \dots, C \text{“}^{120}
 \end{aligned}$$

Auf die vorher angeführte Minimum-Maximum Darlegung wird nun das duale Problem entsprechend dargestellt als:

$$\begin{aligned}
 & \text{„max} && V(\lambda_1, \dots, \lambda_C) \\
 \text{subject to:} &&& \sum_{c=1}^C \lambda_c = 1 \\
 &&& \lambda_c \geq 0 \quad c = 1, \dots, C
 \end{aligned}$$

where

$$V(\lambda_1, \dots, \lambda_C) := \gamma \sum_{m=1}^M (\eta + I_m) \min_{c=1,\dots,C} \lambda_c / \alpha_{mc} \text{“}^{120}$$

Die letzte Bedingung stellt den minimalen Wert der Beschickung einer Basisstation dar. Dies dürfte der optimale Wert von der folgenden linearen Programmierung sein:

$$\begin{aligned}
 & \text{“min} && \sum_{c=1}^C \lambda_c L_c \\
 \text{subject to:} &&& L_c = \sum_{m=1}^M P_{mc} \quad c = 1, \dots, C \\
 &&& \sum_{c=1}^C \alpha_{mc} P_{mc} \geq \zeta_m \quad m = 1, \dots, M \\
 &&& P_{mc} \geq 0 \quad m = 1, \dots, M, c = 1, \dots, C \text{“}^{121}
 \end{aligned}$$

¹²⁰ Resende 2006, S 946

¹²¹ Resende 2006, S 949

10.3. Variable-interference case

In diesem Abschnitt wird der Bereich behandelt, in dem die Interferenzen von den Sendestärken der Basisstationen abhängen, wenn verschiedene mobile Teilnehmer bedient werden sollen. Die maximale Beschickung ist begrenzt durch den optimalen Wert von der folgenden linearen Programmierung:

$$\begin{aligned}
 & \text{„min} && L \\
 \text{subject to:} &&& L \geq L_c = \sum_{m=1}^M P_{mc} \quad c = 1, \dots, C \\
 &&& \sum_{c=1}^C \alpha_{mc} P_{mc} \geq \gamma \left[\eta + \sum_{c=1}^C \alpha_{mc} L_c \right] \quad m = 1, \dots, M \\
 &&& P_{mc} \geq 0 \quad m = 1, \dots, M, c = 1, \dots, C \text{“}^{122}
 \end{aligned}$$

Für den späteren Gebrauch wird jetzt die duale Version von der linearen Programmierung formuliert:

$$\begin{aligned}
 & \text{“max} && \gamma \eta \sum_{m=1}^M \mu_m \\
 \text{subject to:} &&& \sum_{c=1}^C \lambda_c \leq 1 \\
 &&& \alpha_{mc} \mu_m \leq \gamma \sum_{m'=1}^M \alpha_{m'c} \mu_{m'} + \lambda_c, \quad m = 1, \dots, M, c = 1, \dots, C \\
 &&& \lambda_c, \mu_m \geq 0, \quad m = 1, \dots, M, c = 1, \dots, C
 \end{aligned}$$

with λ_c and μ_m representing the dual variables associated with the constraints

$$L \geq L_c = \sum_{m=1}^M P_{mc} \text{ und } \sum_{c=1}^C \alpha_{mc} P_{mc} \geq \gamma \left[\eta + \sum_{c=1}^C \alpha_{mc} L_c \right], \text{ respectively.} \text{“}^{122}$$

“Weil das duale Optimum $\sum_{c=1}^C \lambda_c = 1$ und

¹²² Resende 2006, S 948

$$\mu_m = \min_{c=1,\dots,C} \left[\gamma \sum_{m'=1}^M \alpha_{m'c} \mu_{m'} + \lambda_c \right] / \alpha_{mc}$$

oder gleichwertiges,

$$\max_{c=1,\dots,C} \mu_m \alpha_{mc} / \left[\sum_{m'=1}^M \alpha_{m'c} \mu_{m'} + \lambda_c / \gamma \right] = \gamma,$$

$\sum_{c=1}^C \lambda_c \leq 1$ kann mit Gleichheit verglichen werden, während die Formel

$\alpha_{mc} \mu_m \leq \gamma \sum_{m'=1}^M \alpha_{m'c} \mu_{m'} + \lambda_c$, ersetzt werden kann durch eine von den späteren

Beschränkungen.¹²³

“When the optimal solution of the dual exists and is finite we denote an optimum λ with λ^* . As in the constant-interference case, the dual problem may equivalently be phrased as:

$$\begin{aligned} \max \quad & V(\lambda_1, \dots, \lambda_C) \\ \text{subject to:} \quad & \sum_{c=1}^C \lambda_c = 1 \\ & \lambda_c \geq 0 \quad c = 1, \dots, C \end{aligned}$$

where $V(\lambda_1, \dots, \lambda_C)$ represents the optimum value of the following linear program:

$$\begin{aligned} \max \quad & \gamma \eta \sum_{m=1}^M \mu_m \\ \text{subject to:} \quad & \alpha_{mc} \mu_m \leq \gamma \sum_{m'=1}^M \alpha_{m'c} \mu_{m'} + \lambda_c, \quad m = 1, \dots, M, \quad c = 1, \dots, C \\ & \mu_m \geq 0 \quad m = 1, \dots, M \end{aligned} \quad \text{“}^{124}$$

¹²³ vgl. Resende 2006, S 948 - 949

¹²⁴ Resende 2006, S 949

Die Beschränkung $\alpha_{mc}\mu_m \leq \gamma \sum_{m'=1}^M \alpha_{m'c}\mu_{m'} + \lambda_c$ kann ersetzt werden durch

$$\mu_m = \min_{c=1,\dots,C} \left[\gamma \sum_{m'=1}^M \alpha_{m'c}\mu_{m'} + \lambda_c \right] / \alpha_{mc} \quad \text{oder} \quad \max_{c=1,\dots,C} \mu_m \alpha_{mc} / \left[\sum_{m'=1}^M \alpha_{m'c}\mu_{m'} + \lambda_c / \gamma \right] = \gamma. \quad ^{125}$$

Um zu sehen, dass $V(\lambda_1, \dots, \lambda_C)$ der minimale Wert von einer Kombination von der Beschickung der Basisstation ist, kann das obere Problem einfach als die duale Version von der folgenden linearen Programmierung gesehen werden:

$$\begin{aligned} \text{“min} \quad & \sum_{c=1}^C \lambda_c L_c \\ \text{subject to:} \quad & L_c = \sum_{m=1}^M P_{mc} \quad c = 1, \dots, C \\ & \sum_{c=1}^C \alpha_{mc} P_{mc} \geq \gamma \left[\eta + \sum_{c=1}^C \alpha_{mc} L_c \right] \quad m = 1, \dots, M \\ & P_{mc} \geq 0 \quad m = 1, \dots, M, c = 1, \dots, C \quad M \quad ^{126} \end{aligned}$$

10.4. Observations

In diesem Kapitel werden noch ein paar abschließende Bemerkungen festgehalten:

- In beiden vorangegangenen Kapiteln wurde das Problem zur Minimierung untersucht: $L = \max_{c=1,\dots,C} L_c$. Dies ist gleich zu setzen mit der Suche eines Vektors

$$\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_C) \quad \text{mit} \quad \sum_{c=1}^C \lambda_c \leq 1 \quad \text{und} \quad \text{dies maximiert die Gleichung}$$

$$V(\lambda_1, \dots, \lambda_C) = \min \sum_{c=1}^C \lambda_c L_c.$$

- $M > C$ sollte normalerweise der Fall sein und dieser Wert ist der Minimalwert von soft hand-off.

¹²⁵ vgl. Resende 2006, S 949

¹²⁶ Resende 2006, S 949

- Die Theorie der linearen Programmierung zeigt, dass jede endliche Lösung des dualen Problems eine niedrige Grenze vom Wert des primären Problems benötigt. Der Wert von $V = (\lambda_1, \dots, \lambda_c)$ wird bestimmt von einer niedrigen Grenze durch den Wert des primären Problems für einen gegebenen Wert des Vektors λ mit der Gleichung $\sum_{c=1}^c \lambda_c = 1$.¹²⁷

11. Mangel an Frequenzen

Aufgrund der immer stärker wachsenden Telekommunikation kommt es bereits zu einem Engpass bei den Frequenzen.

Für dieses auftauchende Problem gibt es zurzeit drei Typen von Beschränkungen (constraints):

- Co-channel constraint (CCC) – Hier werden dieselben Kanäle in verschiedenen Zellen in einem gesicherten Abstand zu den anderen Zellen verwendet.
- Co-site constraint (CSC) – Dieser bestimmt den minimalen Kanalabstand innerhalb der Zellen.
- Adjacent channel constraint (ACC) – Mit dieser Beschränkung wird der minimale Abstand zwischen den Zellen bestimmt.¹²⁸

11.1. Grundmodell

Das Grundmodell für die Kanalbestimmung enthält die folgenden Komponenten:

- N : Ist ein Satz von Zellen.
- d_i ($1 \leq i \leq N$): Anzahl von Kanälen, welche für die Zelle i erforderlich sind.

¹²⁷ vgl. Resende 2006, S 950

¹²⁸ vgl. Kim 2005, S 1842 - 1843

- $|N \times N|$ Kompatibilitätsmatrix $C_{ij} (1 \leq i, j \leq N)$: Dies ist die minimal erforderliche Anzahl an Kanälen, welche auf Grund eines Anrufes zwischen den Zellen i und j aufgeteilt werden.
- “Frequency (channel) $f_{ik} (1 \leq i \leq N, 1 \leq k \leq d_i)$, is assigned to a_{ik} , the k th call in the i th cell, which is an index. Each frequency (channel) is represented by a positive integer.
- Set of frequency-separation constraints defined by the compatibility matrix

$$|f_{ik} - f_{jl}| \geq C_{ij} \text{ for all } i, j, k, l (i \neq j \text{ and } k \neq l) \ 1 \leq i, j \leq N, \ 1 \leq k \leq d_i, \ 1 \leq l \leq d_j.”^{129}$$

Es existieren noch weitere Versionen für das Kanalbestimmungsproblem. Aber hier wurde der Blickpunkt auf ein minimal umspannendes Kanalbestimmungsproblem gelegt. Für diese Version erfordert die gesamte Bandbreite, dass das System minimiert ist.¹³⁰

$$\text{Min} \left[Z = \text{Max}_{i,k} f_{ik} \right] \text{ where } 1 \leq i \leq N, \ 1 \leq k \leq d_i^{129}$$

¹²⁹ Kim 2005, S 1843

¹³⁰ vgl. Kim 2005, S 1843 - 1844

Anhang

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den derzeitigen Funknetzwerken, die weltweit Anwendung finden, und deren Standortentscheidungen, Antennenwahl und der Frequenzverteilung. Das sind das GSM- und das UMTS-Netzwerk.

Das erste Kapitel gibt die Geschichte der Telekommunikation wieder, wobei der Schwerpunkt auf die Einführung und Entwicklung der Funknetzwerke in Österreich liegt.

In den beiden nachfolgenden Kapiteln werden die unterschiedlichen Arten der Telekommunikation beschrieben. Angefangen bei den Schnurlostelefonen bis hin zu Pagingssystemen und den verschiedenen Funknetzwerken. Weiters die Lizenzvergabe der Frequenzen, die zum Betrieb eines Funknetzwerkes nötig sind.

In den Kapiteln Standortentscheidungen für die Aufstellung von Basisstationen und Antennen werden verschiedene Modelle bzw. Heuristiken (Greedy Randomized Adaptive Search Procedures, Tabu Search) und das Location-sensing Problem vorgestellt, die für die Standortentscheidungen von Basisstationen angewendet werden. Weiters werden die verschiedenen Antennen vorgestellt, die für die verschiedenen Zellen (Makro-, Mikro oder Piko-Zellen) zum Einsatz kommen.

In den beiden letzten Kapiteln werden die Modelle für die Frequenzverteilung und die Möglichkeit was zu tun ist, wenn ein Mangel an Frequenzen besteht, beschrieben. Bei der Frequenzverteilung wird auf zwei Lösungsmethoden, nämlich auf optimale und heuristische Lösungsmethoden eingegangen, wobei aber das Hauptaugenmerk bei den heuristischen Lösungsmethoden liegt. Erwähnt werden zum Beispiel das Tabu Search, Local Search, Greedy Verfahren und viele weitere Heuristiken.

Für den Engpass an Frequenzen, der bereits in der Realität aufgetreten ist, wird ein Grundmodell für die Kanalbestimmung vorgestellt.

Lebenslauf

Name: Alexander Wandler

Titel: Bakkalaureus

Geboren: 25.01.1964

Geburtsort: Wien

Staatsbürgerschaft: Österreich

Stand: ledig

Wohnung: 7132 Frauenkirchen, Halbturner Strasse 30

Schulbildung: 4 Klassen Volksschule in Frauenkirchen
4 Klassen Hauptschule in Frauenkirchen
1 Klasse Polytechnischer Lehrgang in Frauenkirchen
3 Klassen Berufsschule in Eisenstadt
Studienberechtigungsprüfung in Wien
Studium der Betriebswirtschaft an der Universität Wien

Lehrzeit: 13. August 1979 bis 12. August 1982 als Bürokaufmann bei der Firma „Peter Mayer und Söhne“ in Frauenkirchen

Prüfungen: Lehrabschlussprüfung als Bürokaufmann 22. Juli 1982
Studienberechtigungsprüfung am 30. Juli 1997
Universitätsabschluss Bakkalaureat am 3. Juli 2004

Praxis: 1. Kaufmännischer Angestellter, Peter Mayer und Söhne
2. Versicherungsvertreter, Grazer Wechselseitige
3. Sachbearbeiter, Wirtschaftsabteilung – Universität Wien
4. Nebenberuflich, Gewerbeberechtigung für Kleinhandel in der Zeit von 19. Febr 1990 bis 16. Juli 1991 und 30.07.2001 bis 14.12.2005
5. Support und Tester, Zentraler Informatikdienst - Abteilung Universitätsverwaltung – Universität Wien

Präsenzdienst: 8 Monate ordentlicher Präsenzdienst im Jahre 1983 erfüllt.

Literaturverzeichnis

- [1] Aardal K. I., van Hoesel S. P.M., Koster A. M.C.A., Mannino C. and Sassano A. 2003, Models and solution techniques for frequency assignment problems, London, Springer Verlag
- [2] Ackerley Roger 2003, Telecommunications Performance Engineering, London, Institution of Electrical Engineers
- [3] Amaldi E., Capone A. und Malucelli F. 2001, Discrete models and algorithms for the capacitated location problems arising in UMTS network planning, ACM
- [4] Amaldi E., Capone A. und Malucelli F. 2003, Planning UMTS Base Station location: optimization models with power control and algorithms, IEEE
- [5] Aretz K., Haardt M., Konhäuser W. und Mohr W. 2001, The future of wireless communications beyond the third generation, Munich
- [6] Banerjee D. und Mukherjee B. 1996, A Practical Approach for Routing and Wavelength Assignment in Large Wavelength-Routed Optical Networks, IEEE
- [7] Borndörfer R., Eisenblätter A., Grötschel M. and Martin A. 1998, Frequency assignment in cellular phone networks, Berlin, Science Publisher
- [8] Chai Ning, Yeo Boon Sain, Chew Yong Huat 2005, Location management for GPRS, Singapore, ScienceDirect
- [9] Chamberland Steven 2004, An efficient heuristic for the expansion problem of cellular wireless networks, Montreal, ScienceDirect
- [10] Cheung J. C. S., Beach M. A. und McGeehan J. P. 1994, Network Planning for Third-Generation Mobile Radio Systems, IEEE

- [11] de Noranha T. F. und Ribeiro C.C. 2004, Routing and wavelength assignment by partition coloring, Rio de Janeiro, Department of Computer Science
- [12] D'Halluin Y., Forsyth P.A., Vetzal K.R. 2005, Wireless network capacity management: A real options approach, Waterloo, ScienceDirect
- [13] Dorigo M., Stützle T. 2004, Ant Colony Optimization, Cambridge, Bradford
- [14] Duque-Antón 2002, Mobilfunknetze, Braunschweig/Wiesbaden, Vieweg
- [15] Eisenblätter A., Geerdes H.-F., Koch T., Martin A., Wessäly A. 2006, UMTS radio network evaluation and optimization beyond snapshots, Berlin, Springer Verlag
- [16] Glover F. 1989, Tabu Search – Part I, Boulder, ORSA
- [17] Glover F. und Kochenberger G. A. 2003, Handbook of Metaheuristics, Bosten, Kluwer
- [18] Hao J.-K., Dorne R. and Galinier P. 1998, Tabu Search for Frequency Assignment in Mobile Radio Networks, Boston, Kluwer
- [19] Howley Kevin 2005, Community Media, Cambridge, Cambridge University Press
- [20] Jan Rong-Hong, Chu Hung-Chi, Lee Yi-Fang 2004, Improving the accuracy of cell-based positioning for wireless networks, Hsinchu, ScienceDirect
- [21] Lescuyer Pierre 2004, UMTS: Origins, Architecture and the Standard, London, Springer
- [22] Luna F., Alba E., Nebro A. J., Pedraza S. 2007, Evolutionary Algorithmus for Real-World Instances of the Automatic Frequency Planning in GSM Networks, Berlin, Springer-Verlag

- [23] Kim Sung-Soo, Smith Alice E., Lee Jong-Hyun 2005, A memetic algorithm for channel assignment in wireless FDMA systems, Seoul, ScienceDirect
- [24] Kotrostsos S., Kotsakis G, Dementichas P., Tzifa E., Dementichas V. and Anagnostou M. 2001, Formulation and Computationally Efficient Algorithms for an Interference-Oriented Version of the Frequency Assignment Problem, Kluwer
- [25] Mathar R. and Niessen T. 2000, Optimum positioning of base stations for cellular radio networks, Aachen, Baltzar
- [26] Mathar R. and Schmeink M. 2002, Optimal Base Station Positioning and Channel Assignment for 3G Mobile Networks by Integer Programming, Kluwer, Kluwer Academic Publishers
- [27] Mishra A.R. 2005, Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation, Chichester, Wiley
- [28] Molina A., Athanasiadou G.E., Nix A.R. 1999, The Automatic Location of Base-Stations for optimised Cellular Coverage: A new combinatorial approach, Bristol, Centre for Communication Research
- [29] Resende Mauricio G. C., Pardalos Panos M. 2006, Handbook of Optimization in Telecommunications, New York, Springer
- [30] Sauter Martin 2004, Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme, Wiesbaden, Vieweg
- [31] Smith Clint, Collins Daniel 2002, 3G Wireless Networks, New York, McGraw Hill
- [32] Tisal Joachim 2001, The GSM Network, Chichester, Wiley
- [33] T.O.P. BusinessInteractive GmbH 2002, UMTS Basics: Die Grundkonzepte des Universal Mobile Telecommunications System, Weil der Stadt, Schlembach

[34] Whitaker Roger M., Raisanen Larry, Hurley Steve, The infrasturcture efficiency of cellular wireless networks, Cardiff, ScienceDirect

[35] Zeng Guoping, Two Common Properties of the Erlang-B Function, Erlang-C Function, and Engset Blocking Function, Plano, Elsevier

[36] Zogg Jean-Marie 2002, Telemetrie mit GSM/SMS und GPS-Einführung, Poing, Franzis

[37] <http://de.wikipedia.org>

[38] <http://fap.zib.de/>

[39] <http://www.personal.kent.edu/>

[40] <http://umtslink.at/>