

Groene ICT: karakterisering en optimalisatie van groene femtocelnetwerken

Dieter De Vulder

Promotoren: prof. dr. ir. Wout Joseph, prof. dr. ir. Luc Martens

Begeleider: Margot Deruyck

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: computerwetenschappen

Vakgroep Informatietechnologie

Voorzitter: prof. dr. ir. Daniël De Zutter

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2010-2011



Groene ICT: karakterisering en optimalisatie van groene femtocelnetwerken

Dieter De Vulder

Promotoren: prof. dr. ir. Wout Joseph, prof. dr. ir. Luc Martens

Begeleider: Margot Deruyck

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: computerwetenschappen

Vakgroep Informatietechnologie

Voorzitter: prof. dr. ir. Daniël De Zutter

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2010-2011



Voorwoord

In het algemeen heeft de mens een milieuvriendelijk beeld van de ICT-sector. Dit is grotendeels terecht, aangezien de wereldwijde communicatie via data- en telecomnetwerken een drastische impact heeft op de gemeenschap en nieuwe deuren heeft geopend om de menselijke impact op de natuur te reduceren. Zo wordt het wereldwijde reizen en het transport van goederen (en bijhorend verbruik van brandstof en uitstoot van broeikasgasen) gereduceerd door onder andere e-commerce, teleworking en videoconferencing. Deze ICT-revolutie is slechts enkele jaren aan de gang en zal in de toekomst een nog grotere impact hebben.

Toch is het niet allemaal rozengeur en maneschijn. De globale ICT-industrie is een belangrijke en snelgroeiende factor in de CO₂-emissies en in het energieverbruik. In 2007 was de totale voetafdruk van de ICT-sector ongeveer twee procent van de globale CO₂-uitstoot van de mens. Dit percentage is vergelijkbaar met dat van de luchtvaartindustrie of met een kwart van de globale CO₂-uitstoot van auto's. Verder is ook het energieverbruik van ICT ongeveer vier procent van het jaarlijkse energieverbruik en de verwachtingen zijn dat dit percentage zal verdubbelen binnen de komende tien tot vijftien jaar.

Binnen de ICT leveren toegangsnetwerken een grote bijdrage aan de CO₂-uitstoot, waarin de basisstations een aandeel van ongeveer twee derde vertegenwoordigen. Het verbruik van de terminals (die gevoed worden door batterijen en dus al geoptimaliseerd zijn) is verwaarloosbaar ten opzichte van het verbruik van het mobiele netwerk. Daarom is het duidelijk dat de focus van het reduceren van het energieverbruik moet liggen op de basisstations in de draadloze toegangsnetwerken. Tot dusver heeft men bij het ontwerp van mobiele netwerken steeds eerder naar spectrale efficiëntie, capaciteit of throughput gekeken dan naar energie-efficiëntie. De langetermijnvisie moet zijn om zeer kleine basisstations te ontwikkelen die gevoed worden door duurzame energie.

In dit onderzoek wordt het vermogenverbruik van zo'n basisstations - meer bepaald femtocellen - gemodelleerd. Dit vermogenverbruik is rechtstreeks gerelateerd aan het bereik van een basisstation. Gebaseerd op karakteristieken van verschillende technologieën kan de energie-efficiëntie van de technologieën voor verschillende scenario's vergeleken worden. Uiteindelijk wordt ook een tool voorgesteld die onderzochte aspecten in rekening brengt en een groen femtocelnetwerk modelleert dat dan geanalyseerd wordt.

Ik zou in de eerste plaats mijn promotoren, prof. dr. ir. Wout Joseph en prof. dr. ir. Luc Martens, willen bedanken voor de geboden kans om deze masterproef te kunnen uitvoeren. Daarnaast wens ik ook mijn thesisbegeleidster, ir. Margot Deruyck, te bedanken voor de hulp die ik gekregen heb bij het voltooien van dit werk.

Tenslotte wil ik mijn ouders enorm bedanken, die mij alle kansen gegeven hebben om deze studies te voltooien en die mij hierin steeds gesteund hebben.

Dieter De Vulder, juni 2011

Toelating tot bruikleen

”De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.”

”The author gives permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use. In the case of any other use, the limitations of the copyright have to be respected, in particular with regard to the obligation to state expressly the source when quoting results from this master dissertation.”

Dieter De Vulder, 6 juni 2011

Groene ICT: karakterisering en optimalisatie van groene femtocelnetwerken

Dieter DE VULDER

Promotoren: prof. dr. ir. Wout JOSEPH, prof. dr. ir. Luc MARTENS

Begeleider: ir. Margot DERUYCK

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van

MASTER IN DE INGENIEURSWETENSCHAPPEN:

COMPUTERWETENSCHAPPEN

Vakgroep Informatietechnologie

Voorzitter: prof. dr. ir. Daniël DE ZUTTER

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Universiteit Gent

Academiejaar 2010–2011

Samenvatting

De basisstations in draadloze toegangsnetwerken hebben een groot aandeel in het energieverbruik van de ICT-sector. Geoptimaliseerde "groene" draadloze toegangsnetwerken worden dus steeds belangrijker. In het eerste deel van dit werk karakteriseren we groene femtocelnetwerken. De architectuur van een femtocelbasisstation wordt gemodelleerd en we bestuderen het bereik, het vermogenverbruik en de energie-efficiëntie van zo'n basisstation. Deze informatie wordt dan gebruikt om een tool te implementeren die een groen femtocelnetwerk ontwerpt in een klein geografisch gebied. Tenslotte wordt het resultaat van deze tool ter optimalisatie nog onderworpen aan een vermogenreducerend algoritme.

Trefwoorden

Femtocel, groene ICT, bereik, vermogenverbruik, energie-efficiëntie

Green ICT: Characterization and Optimization of Green Femtocell Networks

Dieter De Vulder

Supervisor(s): Wout Joseph, Luc Martens, Margot Deruyck

Abstract—The first part of this research characterizes green femtocell networks. The femtocell base station architecture is modeled and its range, power consumption and energy efficiency is examined. This information is used to implement a tool which develops a green femtocell network in a small geographic area.

Keywords—Femtocell, green ICT, range, power consumption, energy efficiency

I. INTRODUCTION

THE global Information and Communication Technology (ICT) industry is an important and quickly growing contributor to CO₂ emissions and energy consumption [1]. The ICT power consumption is approximately 4% of the worldwide annual energy consumption and is still growing. Within ICT, access networks are a large contributor to CO₂ emissions, and base stations are responsible for about two-thirds of the CO₂ emissions caused by access networks. Therefore, the focus in reducing the power consumption in wireless access networks must be on the base stations. A long term vision needs to be developed, in which sustainable energy powered small base stations are deployed.

This research examines a specific kind of small base stations: femtocells. A general hardware model for femtocells and its corresponding power consumption, which is directly related to the range of the femtocell, is studied. Combining power consumption and range, investigation of the energy efficiency of several wireless technologies is possible. After characterizing femtocells, a simulation tool is created in which a green femtocell network is developed. Afterwards, the power consumption of this deployed network can be optimized.

II. FEMTOCELLS

Femtocells are inexpensive home base stations with limited range and low power consumption [1]. They are generally installed by the end user to improve indoor reception of voice and data services. The femtocell communicates with the cellular network by means of a broadband connection such as DSL, cable modem or a separate RF backhaul channel.

Femtocells offer a win-win situation: the end user achieves higher data rates and improved reliability, the operator reduces the amount of traffic on its expensive macrocell network and can focus its resources on truly mobile users. Other advantages are improved capacity and coverage. Using femtocells also offers the operators cost benefits: femtocell deployment reduces infrastructure cost as well as operational costs.

III. CHARACTERIZATION

A. Path loss and range

In order to calculate the range of a femtocell base station, a link budget needs to be composed [2]. A link budget takes all of the gains and losses of the transmitter through the medium to the receiver into account. Firstly, the maximum path loss PL_{max} a transmitted signal can experience while still being detectable at the receiver is computed. Here, PL_{max} is calculated for different technologies: Mobile WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), LTE (Long Term Evolution) and HSPA (High Speed Packet Access).

Mobile WiMAX achieves the highest value for PL_{max} , the value for LTE is a little lower. The reason is that LTE experiences a higher loss, due to a higher value of the feeder loss for the base station. Compared to these technologies, HSPA has a much lower PL_{max} . The main reason is that the maximum input power of the base station occurs inside a logarithm. The higher total margin (caused by the User Interference Margin) of HSPA is compensated by a higher total gain (caused by the Processing Gain).

The use of a propagation model is necessary to calculate the range for a given maximum path loss. The ITU-R P.1238 model is appropriate for modeling indoor propagation [3]. This model predicts path loss for three possible scenarios: a residential building, a commercial building or an office. In further calculations, the office scenario is always used. Formula (1) expresses the range (in m) in function of PL_{max} (in dB), the technology-specific frequency f (in MHz), the loss factor between floors $L_f(n)$ (dimensionless) and the scenario-specific power loss exponent N (dimensionless).

$$d = 10^{\frac{PL_{max} - 20 \log_{10} f - L_f(n) + 28}{N}} \quad (1)$$

Table I shows the results of the range calculation using Formula (1) for different technologies. The maximum path loss is the dominating factor in the range calculation: technologies with a high PL_{max} achieve a high range. Because of that reason, the range of Mobile WiMAX and LTE is much higher than the range for HSPA. Also, the more floors between base station and terminal (higher $L_f(n)$), the lower the range will be.

B. Power consumption

The typical components of a femtocell are shown in Figure 1 [4]. There are three main building blocks, each of them contributing to a theoretical total femtocell power consumption of 10.2 W: the microprocessor block (2.7 W), the FPGA block (4.0 W) and the RF transceiver (3.5 W).

	Range [m]
Mobile WiMAX	34.05
HSPA	10.56
LTE	28.25

TABLE I
RANGE (IN M) FOR DIFFERENT TECHNOLOGIES.

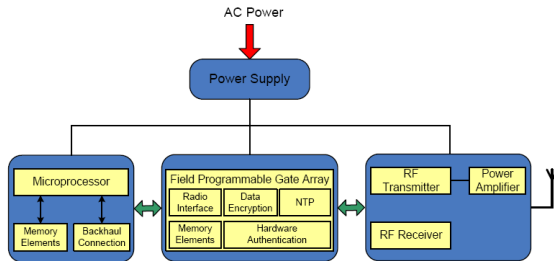


Fig. 1. General hardware model of a femtocell base station [4].

$$P_{tot} = P_{micro} + P_{FPGA} + P_{RF,Tx} + P_{RF,Rx} + P_{amp} \quad (2)$$

The actual power consumption (calculated in Formula (2)) can be lowered making use of a power reducing algorithm, in this case an algorithm that uses sleep modes controlled by the User Equipment (UE) [4]. The main idea behind the introduction of sleep modes in femtocell base stations, is creating a hardware state with low power consumption. In our algorithm the RF transmitter, power amplifier and some circuit elements are turned off in sleep mode, reducing the power consumption with 4.7 W. The femtocell wakes up to active mode by receiving a wake-up signal coming from a mobile device.

The femtocell power consumption in active mode is 10.2 W, this is reduced to 5.5 W in sleep mode. To maximize the power consumption reduction, it is desirable that the femtocell sleeps most of the time. The operation of this algorithm is simulated with a Poisson traffic model representing the wake-up signals coming from the UE [5].

The simulation shows that this algorithm achieves acceptable results for maximum eight users per femtocell. In that situation, the average power reduction is almost 30 percent (i.e. an average power saving of about 3 W). When there is only a single user in the femtocell range, the power reduction goes up to more than 44 percent.

IV. SIMULATION TOOL

A simulation tool is developed which provides femtocell coverage for a small geographic area with minimal power consumption. For the calculation of the optimal femtocell configuration, a genetic algorithm is used. A global fitness function is used, which is the sum of two other fitness functions: one for coverage, the other one for power consumption (as in [2]). In the genetic algorithm, different kinds of mutations are used to generate new (better) solutions from the current solution: (de)activating a femtocell and add or subtract 1 dBm of the input power of the antenna of an active femtocell. Which and how a femtocell is adapted, is determined at random.

Figure 2 shows the deployment of a green femtocell network in a given area, using the Mobile WiMAX technology with a bitrate of 5.7 Mbps. Assuming one single femtocell per building, a maximum of 495 femtocells can be placed in the target area. 86 locations are effectively used, which yields a 96.1 percent coverage with a total daily power consumption of 21052 W. The power consumption fitness value is 82.6 percent, leading to a global fitness value of 509.2 (with a maximum of 600). Because of the relatively great number of femtocells, the power consumption fitness value is not that high. A longer calculation time (more than one hour) could result in a better solution.



Fig. 2. Deployment of Mobile WiMAX femtocells in a given area. A bitrate of 5.7 Mbps and a bandwidth of 5 MHz is used.

The power consumption of the network can be lowered by using the power reduction algorithm with sleep modes. If minimum one and maximum eight users are assigned, at random, to each active femtocell and the power reduction algorithm is applied, a 38.4 percent saving in power consumption for the whole green femtocell network in this area is reached. Even with a minimum of four users per femtocell, a saving of 33.9 percent is still achieved.

V. CONCLUSION

The simulation tool achieves a good femtocell coverage for a specified geographic area. Using a power reduction algorithm for the active femtocells resulting from the tool, an efficient green femtocell network with 96.1% coverage and minimal power consumption can be deployed. Using sleep modes, the total power consumption can be lowered with 29.4% to 14861W (an average of 172.8W per femtocell per day) with an average of 8 users per femtocell. A higher average number of users per femtocell leads to worse results.

REFERENCES

- [1] V. Chandrasekhar, J. Andrews and A. Gatherer, *Femtocell Networks: a Survey*, IEEE Communications Magazine, 2008, pp. 59-67
- [2] M. Deruyck, E. Tanghe, W. Joseph, W. Vereecken, M. Pickavet, B. Dhoedt and L. Martens, *Towards a deployment tool for wireless access networks with minimal power consumption*, IEEE 21st International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops (PIMRC Workshops), 2010, pp. 295-300, Istanbul, Turkey, 26-29 Sep. 2010.
- [3] *ITU-R P.1238 Propagation Model*, http://en.wikipedia.org/wiki/ITU_Model_for_Indoor_Attenuation/
- [4] I. Ashraf, F. Boccardi and L. Ho, *Power Savings in Small Cell Deployments via Sleep Mode Techniques*, IEEE Full-Day Workshop on W-GREEN, 2010, pp. 306-310, Istanbul, Turkey
- [5] I. Ashraf, L. Ho and H. Claussen, *Improving Energy Efficiency of Femtocell Base Stations Via User Activity Detection*, Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2010, pp. 1-5, Sydney, Australia

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Toelating tot bruikleen	iii
Overzicht	iv
Extended abstract	v
Inhoudsopgave	vii
Gebruikte afkortingen	ix
1 Inleiding	1
1.1 Onderzoek	2
1.2 Femtocellen	2
1.2.1 Voordelen	3
1.2.2 Toegangsmethoden	4
1.2.3 Vergelijking met microcellen en picocellen	5
1.3 Technologieën	6
1.3.1 Mobile WiMAX	7
1.3.2 UMTS	8
1.3.3 HSPA	9
1.3.4 LTE	10
2 Bereik	11
2.1 Padverlies	11
2.1.1 Parameters in linkbudget	11
2.1.2 Berekeningen met macrocelparameters	14
2.1.3 Berekeningen met femtocelparameters	18
2.2 Propagatiemodellen	21
2.2.1 Okumura-Hata model	22
2.2.2 Log-distance model	22

2.2.3	ITU-R P.1238 model	23
2.3	Berekening van het bereik	25
3	Hardwaremodel en vermogenverbruik	28
3.1	Hardwaremodel	28
3.1.1	Componenten van een klassieke femtocel	28
3.1.2	De toekomst van femtocellen: miniaturisatie	30
3.2	Vermogenverbruik	31
3.2.1	Verbruik van componenten in theoretisch hardwaremodel	31
3.2.2	Case study: vermogenverbruik van een gecommmercialiseerde femtocel	32
3.2.3	Vermogenverbruik volgens andere bronnen	34
3.2.4	Optimalisatie van vermogenverbruik	35
4	Combinatie van resultaten: energie-efficiëntie	41
5	Simulatietool	43
5.1	Statische versus dynamische simulatie	43
5.2	Vermogenreducerend algoritme	44
5.2.1	Beschrijving	44
5.2.2	Prestatie	45
5.3	Femtocelbedekking van een klein gebied	50
5.3.1	Beschrijving van de tool	50
5.3.2	Toepassing	51
5.3.3	Resultaat	53
5.4	Analyse van de simulatiemodellen	55
6	Conclusie en toekomstperspectieven	57
A	Technologiespecifieke parameters	59
B	Maximaal padverlies en bereik: uitgebreide resultaten	62
	Bibliografie	65
	Lijst van figuren	69
	Lijst van tabellen	70

Gebruikte afkortingen

3G	3 rd Generation
3GPP	3 rd Generation Partnership Project
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
BS	Base Station
DSL	Digital Subscriber Line
FPGA	Field-Programmable Gate Array
GPRS	General Packet Radio Services
GSM	Global System for Mobile Communications
HSPA	High Speed Packet Access
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	International Telecommunication Union – Radiocommunications sector
ITU-T	International Telecommunication Union – Telecommunications sector
ICT	Informatie- en CommunicatieTechnologie
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MS	Mobile Station
PL	Path Loss
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service

QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAM	Random Access Memory
RF	Radio Frequency
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
XML	Extensible Markup Language

Hoofdstuk 1

Inleiding

De aanhoudende vraag naar hogere datarates in draadloze netwerken heeft geleid tot het ontwerp van nieuwe datagerichte cellulaire standaarden zoals WiMAX, HSPA en LTE. Tegelijkertijd werden ook WiFi-netwerken ontwikkeld om nomadische hogesnelheidsdata-services te voorzien op een gedistribueerde manier. Hoewel de WiFi-netwerken niet in staat zijn om eenzelfde mobiliteits- en bedekkingsniveau aan te bieden als de cellulaire standaarden, moeten deze cellulaire standaarden voorzien in een service die vergelijkbaar is met die aangeboden door WiFi-netwerken om competitief te zijn voor gebruik in binnenshuis- of kantooromgevingen.

Sinds 1957 is de draadloze capaciteit met een factor van ongeveer een miljoen gestegen. Deze stijging is te danken aan een breder spectrum (factor 25), opdelen van het spectrum in smallere delen (factor 5), betere modulatieschema's (factor 5) en gereduceerde celgroottes (factor 1600). De enorme winst door kleinere cellen te gebruiken komt door een efficiënt spaciaal hergebruik van spectrum (hogere spatiale efficiëntie). Het grootste probleem in netwerken met steeds kleiner wordende cellen is de stijgende infrastructuurkosten [1].

De steeds stijgende ecologische voetafdruk van de ICT-sector en het aandeel hierin van het toegangsnetwerk, meer bepaald de basisstations, maakt dit een interessant studieonderwerp. Optimalisatie van geavanceerde "groene" draadloze toegangsnetwerken, met de focus op het energieverbruik en de draadloze bedekking, wordt steeds belangrijker. In dit werk spitsen we ons specifiek toe op een opkomend type van binnenshuisbasisstations, namelijk femtocellen.

In dit hoofdstuk schetsen we eerst een overzicht van de structuur van dit werk (Sectie 1.1). Vervolgens worden femtocellen gedefinieerd, worden de voordelen en mogelijke toegangsmethodes ervan opgesomd en worden ze vergeleken met andere types van kleine basisstations (Sectie 1.2). We sluiten dit hoofdstuk af met een korte beschrijving van de verschillende technologieën die zullen behandeld worden bij de karakterisering van groene femtocelnetwerken (Sectie 1.3).

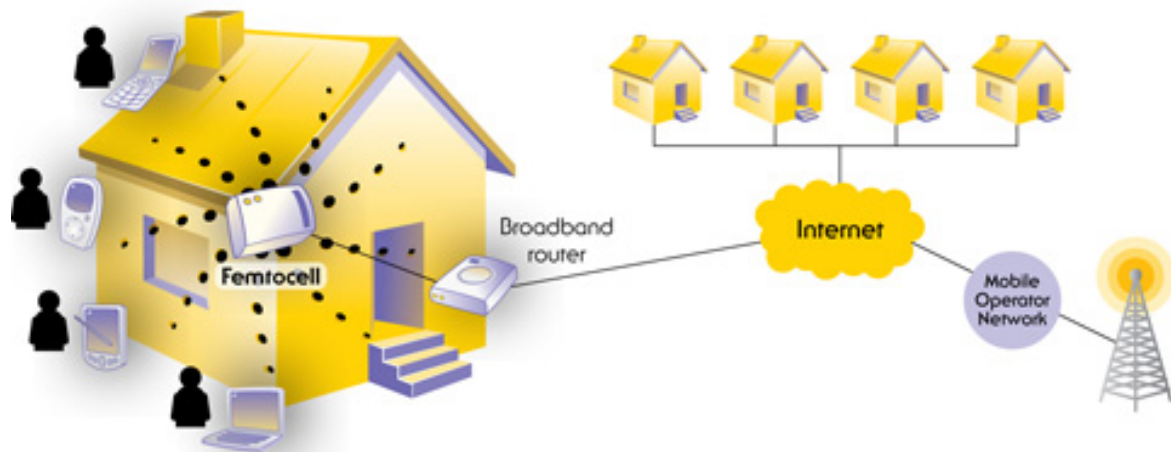
1.1 Onderzoek

Na een beschrijving te hebben gegeven van femtocellen en van de technologieën die later zullen gebruikt worden, kunnen we beginnen aan de karakterisering van femtocelnetwerken. In Hoofdstuk 2 wordt het bereik van femtocellen onderzocht voor verschillende technologieën en scenario's. Daarna wordt in Hoofdstuk 3 een overzicht gegeven van de architectuur van een femtocelbasisstation en het vermogenverbruik hiervan. Er zullen ook enkele vermogenreducerende technieken bestudeerd worden. Aan de hand van het bereik en het vermogenverbruik van femtocellen wordt in Hoofdstuk 4 de energie-efficiëntie van de besproken technologieën vergeleken. Met deze karakteriseringsinformatie wordt dan in Hoofdstuk 5 een tool ontwikkeld die een groen femtocelnetwerk ontwerpt, waarvan we de karakteristieken analyseren. Tenslotte wordt dit werk in Hoofdstuk 6 afgesloten met een algemene conclusie en enkele toekomstperspectieven voor femtocellen.

1.2 Femtocellen

Femtocellen zijn goedkope binnenshuisbasisstations met een klein bereik en laag vermogenverbruik. Ze worden gewoonlijk door de eindgebruiker geïnstalleerd met het oog op een betere binnenshuisontvangst van voice- en dataservices. De femtocel communiceert met het cellulaire netwerk over een breedbandconnectie zoals DSL, kabelmodem of gescheiden RF (Radio Frequency) backhaulkanaal. Figuur 1.1 geeft een beeld van de verbinding van de femtocel met een cellulair netwerk.

De eerste femtocellen werden in 2007 in de Verenigde Staten op de markt gebracht. In de daaropvolgende jaren werkten wereldwijd fabrikanten en operatoren aan een verdere commercialisering.



Figuur 1.1: Verbinding van femtocel met cellulair netwerk. [3]

1.2.1 Voordelen

Femtocellen bieden een win-winsituatie: de eindgebruiker is gelukkig met de hogere data-rates en betrouwbaarheid, de operator reduceert het verkeer op zijn duur macrocelnetwerk en kan zijn middelen focussen op echte mobiele gebruikers. Een macrocel is een netwerkcel, bediend door een basisstation, die bereik voorziet voor nabije gebruikers. Macrocellen verbruiken meer vermogen dan microcellen, picocellen en femtocellen en hebben een groter bereik. De sleutelargumenten in het voordeel van femtocellen zijn:

Kostvoordelen Femtocelontwikkeling reduceert zowel de infrastructuurkost als de operationele kost voor operators. Een typische macrocel kost meer dan \$1000 per maand voor leasing van een site, exclusief elektriciteits- en backhaulkost [1]. Ontwikkeling van femtocellen reduceert de behoefte aan extra macro-basisstation (BS) torens. Onderzoek toont aan dat de operationele kost schalen van \$60000 per jaar per macrocel tot slechts \$200 per jaar per femtocel [4]. Dit argument is doorslaggevend voor een operator om een femtocelaanpak te promoten bij zijn klanten.

Betere bedekking en capaciteit Door hun korte zender-ontvanger afstand kunnen femtocellen hun zendvermogen sterk verlagen, de levensduur van de handsetbatterij verlengen en een hogere Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR) bereiken. Dit leidt tot betere ontvangst (de zogenaamde *five bar* bedekking) en hogere capaciteit. Door de gereduceerde interferentie kunnen meer gebruikers in een gegeven regio in

eenzelfde spectrumgebied verzameld worden, wat de spectrale efficiëntie van de regio verhoogt.

Verhoogde betrouwbaarheid van macrocellen Omdat femtocellen slechts een laag aantal gebruikers bedienen, kunnen ze een groter deel van hun middelen (zendvermogen en bandbreedte) toewijzen aan elke gebruiker. Omdat macrocellen een veel groter bereik hebben (en dus meer gebruikers) is het in pure macrocelnetwerken veel moeilijker om Quality of Service te voorzien. Daarom wordt het verkeer dat binnenshuis ontstaat, geabsorbeerd in de femtocelnetwerken over de IP-backbone, waardoor een macrocelbasisstation zijn middelen kan toewijzen opdat echte mobiele gebruikers een betere ontvangst zouden hebben.

1.2.2 Toegangsmethoden

Soms is het bereik van een femtocel niet beperkt tot binnenin een gebouw, maar kunnen ook voorbijgangers in de buurt van dat gebouw bediend worden door die actieve femtocel. Er zijn drie verschillende toegangsmechanismen gedefinieerd voor femtocellen: open, gesloten en hybride [2].

In de *open toegangsmethode* worden alle gebruikers (reguliere abonnees en toevallige passanten) toegelaten tot de femtocel. In dat geval doet de femtocel dienst als een soort van hotspot voor draadloze toegang. In het algemeen verhoogt deze open toegangsmethode de netwerkcapaciteit: meer gebruikers zullen bediend worden door femtocellen, waardoor er bij macrocelbasisstations capaciteit vrijkomt voor nog meer gebruikers. Het nadeel van deze methode is dat er meer handovers en signalleringsboodschappen vereist zijn en dat er ook veiligheidsproblemen kunnen opduiken. Wanneer dus een mobiele gebruiker van een macrocelbedekkingsgebied in het gebied van een femtocel komt, moet het mobiele toestel automatisch met de femtocel connecteren. De open toegangsmethode is commercieel interessant voor operatoren omdat femtocellen geïnstalleerd en betaald worden door de klant, die zelf echter liever geen toevallige voorbijganger gebruik laat maken van zijn eigen femtocel.

Om het nadeel van de open toegangsmethode tegen te gaan, wordt in de *gesloten toegangsmethode* slechts een bepaalde groep gebruikers toegelaten tot een private femtocel, zoals bijvoorbeeld in een binnenshuisomgeving of in een kantoor. Het uitgestraalde vermogen naar buiten het gebouw wordt door voorbijgaande macrocelgebruikers als interferentie waargenomen waardoor hun signaalkwaliteit vermindert. Vanwege de restrictie tot een

beperkte gebruikersgroep is de prestatie van deze toegangsmethode niet zo goed als van de open toegangsmethode.

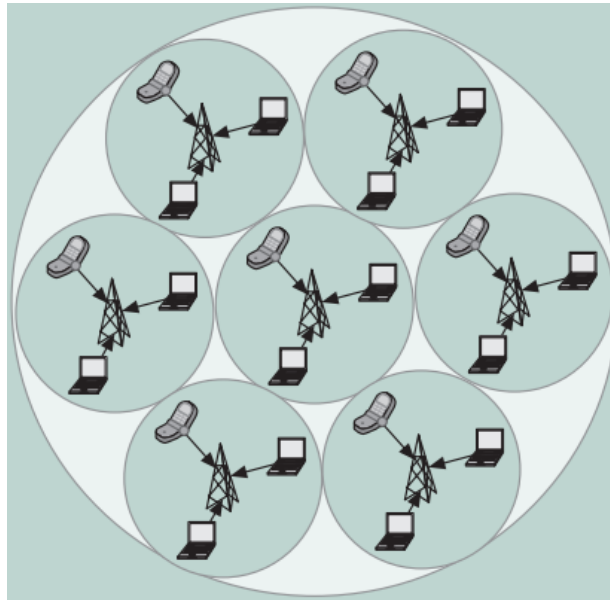
De *hybride toegangsmethode* laat voorbijgangers toe om te connecteren met de femtocel, maar reserveert hier slechts een beperkt aantal middelen voor. De reguliere gebruikers wordt een hogere datarate en een groter aantal subkanalen aangeboden. Op deze manier worden de interferentieproblemen van de gesloten toegangsmethode opgelost en is ook de netwerkcapaciteit hoger dan in de gesloten toegangsmethode (maar uiteraard nog steeds lager dan in de open toegangsmethode).

1.2.3 Vergelijking met microcellen en picocellen

Een microcel is een door de operator geïnstalleerde cel in het mobiele telefonienetwerk die een beperkt gebied bedekt (zoals een winkelcentrum of een hotel) en gecontroleerd wordt door een vermogenefficiënt cellulair basisstation. Er wordt vermogencontrole gebruikt om het bereik van het bedekkingsgebied te limiteren. Het bereik van een microcel (ongeveer 500m) is typisch groter dan dat van een picocel (ongeveer 100m) en een femtocel (orde van tientallen meters). Macrocellen zijn de traditionele, niet-vermogenefficiënte basisstations met een bereik van verschillende kilometers. Figuur 1.2 schetst een beeld van de infrastructuur van een microcelnetwerk. In Figuur 1.3 wordt het bereik van verschillende celtypes op een grafische manier voorgesteld. In Hoofdstuk 2 wordt het bereik van femtocellen expliciet berekend door het opstellen van een linkbudget en het gebruik van een gepast propagatiemodel.

Piocellen worden geïnstalleerd en onderhouden door de netwerkoperator, die ook betaalt voor huur van de site, energie en vaste netwerkconnecties naar hun switchingcentrum. Femtocellen verschillen van picocellen in die zin dat het de bedoeling is dat femtocellen veel autonomer zijn. Ze worden geïnstalleerd door de eindgebruiker in een binnenshuis- of kantooromgeving, in eerste instantie om er zelf voordeel uit te halen.

Femtocellen bepalen automatisch op welke frequenties en vermogenniveaus ze opereren, eerder dan gecontroleerd te worden door een centraal beheerplan opgesteld door de verantwoordelijke netwerkoperator. Op deze manier kan het netwerk zich automatisch aanpassen naarmate er nieuwe femtocellen toegevoegd of verwijderd worden, zonder dat het hierbij nodig is om alle frequenties te herplannen. Figuur 1.4 geeft een beeld van de typische infrastructuur van een femtocelnetwerk.

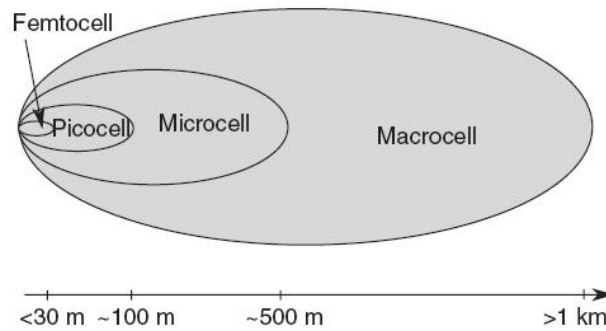


Figuur 1.2: Infrastructuur van een microcelnetwerk. [1]

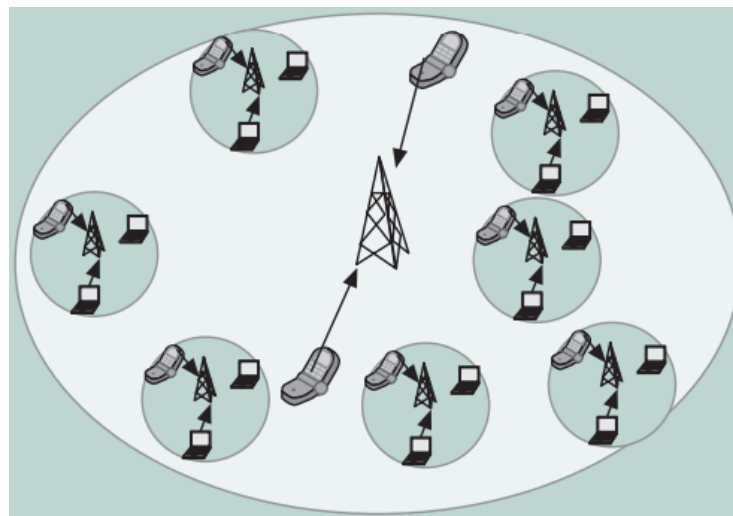
Het nadeel is dat femtocellen niet uit zichzelf een lijst van naburige cellen uitzenden. Mobile telefoons moeten dus zoveel mogelijk de connectie met de femtocel onderhouden, maar riskeren afbreking of een korte onderbreking van het gesprek als het gesprek geschakeld moet worden naar een externe macro- of microcel. Femtocelproducenten promoten het gebruik van hun producten binnen bedrijven, met de bedoeling om picocellen te vervangen. Hun argumenten zijn gebaseerd op lagere installerings- en operationele kosten (installeringsgemak en onderhoud), zoals vermeld in 1.2.1. Dit maakt dat de business case voor femtocellen in een bedrijf sterker is dan voor picocellen [6].

1.3 Technologieën

In de karakterisering en optimalisatie van groene femtocelnetwerken zullen verschillende technologieën bestudeerd en vergeleken worden. In deze sectie wordt een korte beschrijving gegeven van elk van de gebruikte technologieën ([7], [8]).



Figuur 1.3: Vergelijking van het bereik van verschillende celtypes. [5]



Figuur 1.4: Infrastructuur van een femtocelnetwerk. [1]

1.3.1 Mobile WiMAX

De WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) radiotechnologie is gebaseerd op draadloze transmissiemethodes gedefinieerd door de IEEE 802.16-standaard [9]. WiMAX is ontwikkeld om breedband kabelnetwerken zoals DSL te vervangen en om mobiele draadloze breedbandtoegang mogelijk te maken. In eerste instantie richt WiMAX zich op de (vergunninggebonden) banden rond de 2.5 en 3.5 GHz en de vergunningvrije band rond de 5.8 GHz.

Mobile WiMAX (IEEE 802.16e) is een verdere ontwikkeling van de basisstandaard IEEE 802.16. Het WiMAX Forum heeft op basis van deze standaard verschillende profielen

opgesteld voor Mobile WiMAX. De Release-1 profielen zijn gebaseerd op Time Division Duplex (TDD); kanalen met een bandbreedte van 5, 7, 8.75, en 10 MHz en werken in de frequentiebanden van 2300 tot 2690 MHz en van 3300 tot 3800 MHz. De IEEE 802.16e-2005 standaard waar Mobile WiMAX Release-1 op gebaseerd is, kent een grotere verscheidenheid aan mogelijkheden waaronder een kanaalbandbreedte variërend van 1.25 tot 20 MHz. Mobile WiMAX is in oktober 2007 door de International Telecommunication Union (ITU) toegevoegd aan de familie van standaarden voor IMT-2000 onder de naam IMT-2000 OFDMA TDD WMAN.

IMT-2000 is een bundeling van technische specificaties voor 3G-systemen. Het spectrum tussen 400 MHz en 3 GHz is technisch geschikt voor de derde generatie. IMT-2000 is historisch, in die zin dat het de eerste keer is dat de volledige telecommunicatie-industrie gezamenlijk een inspanning gedaan heeft om uniforme specificaties te bekomen en dus verdere fragmentatie, die tot dan toe inherent was aan de mobiele markt, te vermijden. IMT-2000 is het resultaat van samenwerking van verschillende organisaties binnen (ITU-R en ITU-T) en buiten (onder andere 3GPP) ITU [10].

1.3.2 UMTS

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) wordt gezien als de opvolger voor GSM/GPRS (Global System for Mobile Communications / General Packet Radio Services) en biedt net als zijn voorgangers zowel circuitgeschakelde als pakketgeschakelde communicatiediensten [11]. UMTS situeerde zich aanvankelijk in de frequentieband tussen 2.0 en 2.15 GHz, maar om de uitrol te versnellen besliste Europa in juli 2009 dat ook de 900 MHz en 1800 MHz band (vroeger exclusief voorbehouden voor GSM) mocht gebruikt worden [12]. De grootste voordelen van die beslissing zijn een betere bedekking en een kostenbesparing voor de providers die hierdoor minder masten moeten plaatsen. UMTS moet het mogelijk maken om naast spraak ook een veelheid aan datacommunicatietoepassingen, die ook op vaste manier beschikbaar zijn, mobiel toegankelijk te maken.

UMTS behoort tot de derde generatie (3G) mobiele communicatie. Deze derde generatie mobiele communicatiesystemen maken onderdeel uit van een wereldwijd concept dat onder de naam IMT-2000 binnen de ITU wordt ontwikkeld. 3G-technologie geeft mobiele gebruikers een breder bereik van diensten met geavanceerde mogelijkheden, en een grotere netwerksnelheid: minimum 384 kbps en maximum 2 Mbps (tegenover 9.6 kbps voor GSM en 52 kbps voor GPRS). De meest algemene vorm van UMTS gebruikt Wideband Code

Division Multiple Access (WCDMA) voor zijn air interface.

1.3.3 HSPA

High Speed Packet Access (HSPA) is een technologie die, als opvolger van UMTS, wordt toegepast om hogere bitsnelheden en kortere responstijden te behalen [13]. Er bestaat zowel een variant van HSPA voor de downlink (High Speed Downlink Packet Access, HSDPA) als een variant voor de uplink (High Speed Uplink Packet Access, HSUPA). HSPA ondersteunt piekdatasnelheden van 14 Mbps downlink en 5.8 Mbps uplink. Het reduceert ook latentie en voorziet tot vijf keer meer systeemcapaciteit in de downlink en tot 2 keer meer in de uplink. HSPA verhoogt de piekdatasnelheden en de capaciteit op verschillende manieren:

- Transmissie op gedeelde kanalen, resulterend in efficiënt gebruik van beschikbare code- en vermogenmiddelen in WCDMA.
- Korter transmissietijdinterval reduceert round trip time. Dit is de tijd tussen het verzenden van een signaal en het ontvangen van een bevestiging van de ontvanger van het signaal.
- Linkaanpassing maximaliseert kanaalgebruik en laat basisstation toe om dichtbij het maximum celvermogen te opereren. Linkaanpassing is een term die gebruikt wordt in draadloze communicatie om de aanpassing van het modulatieschema, de codering de andere protocolparameters aan de toestand van de radiolink weer te geven. In HSDPA kan bijvoorbeeld het QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) modulatieschema gebruikt worden op ruizige kanalen en 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) op kanalen die niet onderhevig zijn aan ruis.
- Snelle scheduling geeft gebruikers met meest gunstige kanaalcondities prioriteit.
- Snelle retransmissie verhoogt de capaciteit.
- 16-QAM en 64-QAM leveren hogere bitrates op.
- Multiple Input Multiple Output (MIMO) exploiteert antenneversiteit om de capaciteit verder te verhogen. Antenneversiteit is een naam die gebruikt wordt voor eender welk draadloos schema dat gebruik maakt van twee of meer antennes om de kwaliteit en betrouwbaarheid van een draadloze link te verhogen [8].

1.3.4 LTE

Long Term Evolution (LTE), is de nieuwste standaard in de technologiereeks waarin eerder al GSM en UMTS/HSPA werden geproduceerd [14]. Het is een project van het 3rd Generation Partnership Project (3GPP). LTE is een nieuw *high performance* dataoverdrachtsysteem en is de laatste stap in de richting van de vierde generatie (4G). LTE is volledig gebaseerd op pakketschakeling voor het datatransport van alle diensten, inclusief spraak. Het vergroot ook het efficiënt gebruik van frequenties, waardoor de systeemcapaciteit toeneemt en de kosten per gigabyte kunnen dalen. Dit alles maakt het mogelijk om een nog breder dienstenaanbod te voorzien. LTE biedt theoretische downloadsnelheden vanaf 100 Mbps in de downlink en 50 Mbps in de uplink in een radiokanaal met een bandbreedte van 20 MHz.

De belangrijkste (technische) doelen van LTE zijn:

- Significante verhoging van de datasnelheden.
- Verbeterde bitsnelheid voor de gebruiker (factor 2 voor uplink, 3 voor downlink).
- Verbeterde datasnelheid aan de rand van de cel (minimaal factor 2).
- Verhoogde doelmatigheid van het frequentiegebruik.
- Bandbreedtes van 1.25, 1.6 (alleen TDD), 2.5, 5, 10, 15 en 20 MHz worden ondersteund, afhankelijk van de datasnelheid die de gebruiker nodig heeft (schaalbare bandbreedtes van radiokanalen).
- Geoptimaliseerd voor lage snelheden van de gebruikers (maar ondersteunt beweging van de gebruiker tot snelheden van 350 km/h).
- Compatibel met UMTS/HSPA en integratie met niet-UMTS netwerken.

Hoofdstuk 2

Bereik

Als eerste stap in de karakterisering onderzoeken we het bereik van een femtocel voor een bepaalde technologie in een bepaald scenario. Hiervoor moeten we in eerste instantie het maximale padverlies berekenen (Sectie 2.1), waarna we met het gepaste propagatiemodel (Sectie 2.2) het bereik kunnen berekenen (Sectie 2.3).

2.1 Padverlies

Om het bereik van een basisstation te berekenen, moet er een linkbudget opgesteld worden. Een linkbudget brengt alle winst en verlies vanaf de zender door het medium tot aan de ontvanger in rekening. We moeten eerst het maximale padverlies PL_{max} (in dB) bepalen dat een verzonden signaal mag ondervinden om nog steeds net detecteerbaar te zijn aan de ontvanger. Het padverlies is de verhouding van het uitgestraald vermogen tot het ontvangen vermogen van het signaal [15].

2.1.1 Parameters in linkbudget

Tabel 2.1 geeft een overzicht van de belangrijkste parameters in het linkbudget, hun afkorting en een korte beschrijving.

Parameter	Afkorting	Beschrijving
Path Loss	PL	Padverlies is gedefinieerd als het zendvermogen maal de antennewinsten gedeeld door het gemiddeld ontvangen vermogen.

Input power base station antenna	P_{BTS}	Ingangsvermogen van antenne van basisstation
Adaptive Antenna System	AAS	Adaptive Antenna System of beamforming is een signaalverwerkingstechniek gebruikt voor directionele signaaltransmissie of signaalontvangst.
Fade margin	FM	De fade margin stelt de jaarlijkse beschikbaarheid van het systeem voor.
Cell interference margin	CIM	De cell interference margin stelt de hoeveelheid interferentie voor die wordt ondervonden in een cel afkomstig van andere communicerende apparaten.
Doppler margin	DM	Deze marge houdt rekening met het Dopplereffect.
User interference margin	UIM	De user interference margin stelt het verhoogde ruisniveau veroorzaakt door een hogere celbelasting voor.
Antenna gain of the base station and the mobile station	G_{BS}, G_{MS}	De antenna gain is de maat (in dB) hoeveel meer vermogen een antenne uitstraalt in een bepaalde richting in verhouding met de hoeveelheid uitgestraald door een referentieantenne.
Cyclic combining gain of the base station	cyclicGain	Deze parameter brengt de winst van het gebruiken van meerdere zend- en ontvangstantennes in rekening.
Soft handover gain of mobile station	SHG	Soft handover is een situatie waar een mobiel toestel tegelijkertijd verbonden is met twee of meer cellen (of celsectoren) tijdens een gesprek. Soft handover resulteert in een winst die de soft handover gain wordt genoemd.
Processing gain	PG	De processing gain is de verhouding van de gespreide (RF) bandbreedte tot de ongegreide (basisband) bandbreedte.

Feeder loss of the base station and the mobile station	FLBS, FLMS	Verlies door het medium van de transmitter of receiver naar de antenne.
Building penetration loss	BPL	Building penetration loss is de afzwakking van het ontvangen signaal omwille van verschillende gebouwen in de zichtlijn tussen de zender en de ontvanger.
Vehicle penetration loss	VPL	Vehicle penetration loss is de afzwakking van het ontvangen signaal omdat we ons in een voertuig bevinden dat kan bewegen.
Boltzmann constant	k	$1.380658 * 10^{-23}$ J/K.
Temperature	T_0	Omgevingstemperatuur van 290 K.
Bandwidth	BW	De bandbreedte is de breedte van de frequentieband gebruikt om data te verzenden.
Sampling factor	n	
Total subcarriers	totSubCarr	Het totaal aantal beschikbare subcarriers (i.e. data subcarriers + pilot subcarriers + null subcarriers).
Used subcarriers	usedSubCarr	Het aantal gebruikte subcarriers om data te verzenden.
Noise Figure	NF	De noise figure is een maat voor de degradatie van de signaal-ruisverhouding, veroorzaakt door componenten in de RF-signaalketting.
Implementation Loss of mobile station	IL	
Receiver SNR	RxSNR	De signaal-ruisverhouding bij de ontvanger bij een bepaalde Bit Error Rate.
Target load (DL)	TL	
Number of users	users	Aantal gebruikers.
Guard Period	GP	De guard periode wordt gebruikt om te verzekeren dat verschillende transmissies niet interfereren met elkaar.

Tabel 2.1: Gebruikte parameters in de formules voor berekening van het maximale padverlies.

Opmerkingen

- AAS = 1
- Cyclic combining gain = 0 dB (SISO) (3 dB indien MIMO)
- Fade margin = 10 dB
- Shadowing margin = 13.2 dB
- Building penetration loss = 8.1 dB
- Vehicle penetration loss = 0 dB (de mobiele stations bewegen niet)
- Doppler margin = 0 dB (de mobiele stations bewegen niet)

2.1.2 Berekeningen met macrocelparameters

Om de gedachten te vestigen berekenen we eerst het maximaal padverlies met de macrocelparameters uit Tabel 2.2. Hiervoor gebruiken we eerst een zeer eenvoudig concept en daarna een complexere en meer accurate formule.

Parameter	Mobile WiMAX	HSPA	LTE
Frequency [MHz]	2500	2100	2600
Maximum input power of base station [dBm]	35	43	43
Antenna gain of base station [dBi]	16	17.4	18
Antenna gain of mobile station [dBi]	2	0	0
Number of MIMO Tx antennas	1, 2, 4		
Number of MIMO Rx antennas	1, 2, 4		
MIMO gain [dB]	1x1: 0, 2x1: 3, 2x2: 6, 4x4: 12		
Cyclic combining gain of base station [dB]	3		
Soft handover gain [dB]	0	1.5	0
Feeder loss of base station [dB]	0.5	0	2
Feeder loss of mobile station [dB]	0		
Fade margin [dB]	10		

Cell interference margin [dB]	2		
User speed [km/h]	0		
Bandwidth [MHz]	5	5	3
Receiver SNR [dB]	15 (3/4 16-QAM)	15.6 (3/4 64-QAM)	29.4 (2/3 64-QAM)
Number of used subcarriers	360	1	151
Number of total subcarriers	512	1	256
Noise figure of mobile station [dB]	7	9	8
Implementation loss of mobile station [dB]	2	0	0
Duplexing	TDD		
Building Penetration Loss [dB]	8.1		

Tabel 2.2: Gebruikte macrocelparameters voor berekening van het maximale padverlies. [16]

Eenvoudige formule

We gebruiken de gepaste parameterwaarden uit Tabel 2.2 en volgende formule met de notaties van Tabel 2.1 in voorgaande sectie ([15], [17]):

$$PL_{max} = P_{BTS} + G_{BS} + G_{MS} - RxSNR - FLBS - FLMS \quad (2.1)$$

Voor de verschillende technologieën bekomen we dan volgende resultaten voor het maximale padverlies:

	Mobile WiMAX	HSPA	LTE
PL_{max} [dB]	37.5	44.8	29.6

Tabel 2.3: Maximaal padverlies PL_{max} met eenvoudige formule en macrocelparameters.

De hoogste waarde van het maximale padverlies wordt bekomen voor HSPA, gevolgd door Mobile WiMAX en LTE. Tussen HSPA en Mobile WiMAX wordt het verschil hoofdzakelijk bepaald door het grotere maximale zendvermogen van HSPA. De reden waarom LTE het laagste maximale padverlies heeft, hoewel het maximale zendvermogen even groot is als dat van HSPA, is de negatieve impact van de hoge ontvangersensitiviteit van LTE in vergelijking met de andere technologieën. We merken op dat deze berekening zeer simplistisch

is, en kijken nu naar een complexere berekening.

Complexe formules

Omwille van verschillende karakteristieken van technologieën, wordt het maximale padverlies op een verschillende manier berekend voor enerzijds Mobile WiMAX en LTE en anderzijds UMTS en HSPA. Zo maken Mobile WiMAX en LTE gebruik van subdragers in hun frequentieruimte. In UMTS en HSPA moet dan weer rekening gehouden worden met onder andere de processing gain, de chiprate en het aantal gebruikers.

Formules voor Mobile WiMAX en LTE

Met de notaties uit sectie 2.1.1 gelden volgende formules voor de berekening van het maximale padverlies voor Mobile WiMAX en LTE:

$$PL_{max} = P_{BTS} + G + 10 \log_{10}(n_{Tx} \cdot n_{Rx}) + 20 \log_{10}(AAS) - L - M - RxSens \quad (2.2)$$

met

$$M = FM + CIM + DM$$

$$G = G_{BS} + cyclicGain + G_{MS} + SHG$$

$$L = FLBS + FLMS + BPL + VPL$$

$$RxSens = 10 \log_{10}(k \cdot T_0 \cdot 10^9) + 10 \log_{10}(BW \cdot n \cdot \frac{usedSubCarr}{totSubCarr}) + NF + IL + RxSNR$$

De samplingfactor n is in de technologiespecificaties vastgelegd en heeft een waarde van 1.12 voor Mobile WiMAX en 1.536 voor LTE.

Formules voor UMTS en HSPA

Met de notaties uit sectie 2.1.1 gelden volgende formules voor de berekening van het maximale padverlies voor HSPA. Deze formules gelden eveneens voor UMTS, maar aangezien in [16] geen macrocelparameters vermeld staan voor UMTS en deze berekening slechts dient als inleiding voor de berekening met de gepaste femtocelparameters, laten we UMTS hier even buiten beschouwing.

$$PL_{max} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{P_{BTS}}{10}} \cdot \frac{1 - GP}{TL \cdot users} \right) + G + 10 \log_{10}(n_{Tx} \cdot n_{Rx}) \\ + 20 \log_{10}(AAS) - L - M - RxSens \quad (2.3)$$

met

$$UIM = -10 \log_{10}(1 - TL)$$

$$M = FM + CIM + DM + UIM$$

$$G = G_{BS} + cyclicGain + G_{MS} + SHG + PG$$

$$L = FLBS + FLMS + BPL + VPL$$

$$RxSens = 10 \log_{10}(k \cdot T_0 \cdot 10^9) + 10 \log_{10}(BW \cdot n) + NF + IL + RxSNR$$

Voor HSPA (en UMTS) wordt de samplingfactor n berekend als de chiprate (3.84 megachips per seconde) gedeeld door de bandbreedte (5 MHz). De waarde van n is dus 0.768.

Resultaat

Als de gepaste parameters worden ingevuld in bovenstaande formules, worden de maximale padverliezen van Tabel 2.4 bekomen. Voorbeeldberekeningen van PL_{max} worden in de volgende sectie uitgevoerd met femtocelparameters.

	Mobile WiMAX	HSPA	LTE
PL_{max} [dB]	116.423	113.652	111.133

Tabel 2.4: Maximaal padverlies PL_{max} met complexe formules en macrocelparameters.

De waarden van PL_{max} liggen voor alle besproken technologieën dicht bij elkaar. Het onderscheid tussen Mobile WiMAX en LTE (die dezelfde formule gebruiken om het maximale padverlies te berekenen) ligt vooral in de ontvangersensitiviteit die minder negatief is bij LTE, wat resulteert in een lagere PL_{max} (ondanks het hogere maximale zendvermogen van LTE). HSPA heeft – in vergelijking met Mobile WiMAX en LTE – hogere waarden voor de totale margin (dankzij de User Interference Margin) en de totale gain (dankzij de Processing Gain), maar dit wordt tenietgedaan door een alternatieve berekening van PL_{max} , waarbij het maximale zendvermogen in een logaritme staat.

Deze berekeningen met de parameters voor macrocellen tonen aan dat het aangewezen is om voor de complexe formules te opteren, daar deze veel meer factoren in rekening brengen die een invloed hebben op het maximale padverlies. Daarnaast zal na de berekening met de parameters voor femtocellen (in de volgende subsectie) blijken dat er een significant verschil is tussen de resultaten, wat op het belang van de gepaste parameters duidt.

2.1.3 Berekeningen met femtocelparameters

In Tabel 2.5 worden de parameters voor femtocellen vermeld ([18], [19], [20], [21], [22], [23], [24]). De waarden voor de ontvanger-SNR in de tabel worden weergegeven voor dezelfde modulatieschema's als in Tabel 2.2.

Parameter	Mobile WiMAX	HSPA	LTE	UMTS Voice	UMTS PS64 Data	UMTS PS384 Data
Frequency [MHz]	2500	2100	2600	2100	2100	2100
Maximum input power of base station [dBm]	23	15	21	21	21	21
Antenna gain of base station [dBi]	2					
Antenna gain of mobile station [dBi]	2	0	0	0	0	0
Cyclic combining gain of base station [dB]	0					
Soft handover gain [dB]	0	1.5	0	0	0	0
Feeder loss of base station [dB]	0.5	0	2	0	0	0
Feeder loss of mobile station [dB]	0					
Fade margin [dB]	6	7.7	4	6	6	6
Cell interference margin [dB]	2	2	2	3	3	3
User speed [km/h]	0					
Bandwidth [MHz]	5					
Receiver SNR [dB]	15	15.6	29.4	7	5.5	7
# used subcarriers	360	1	151	1	1	1
# total subcarriers	512	1	256	1	1	1
Noise figure of mobile station [dB]	7	7	5	7	7	7

Implementation loss of mobile station [dB]	2	0	0	0	0	0
Building Penetration Loss [dB]	8.1					

Tabel 2.5: Gebruikte femtocelparameters voor berekening van het maximale padverlies.

We gebruiken nu meteen de meer zinvolle complexe formules en illustreren de resultaten uit Tabel 2.6 en Tabel 2.7 met enkele voorbeeldberekeningen met de parameters uit Tabel 2.5. Om het padverlies en het bereik van de verschillende technologieën op een eerlijke manier te vergelijken, moeten we dit doen voor eenzelfde bitrate. In Bijlage A wordt per modulatieschema de corresponderende bitrate en ontvanger-SNR voor de verschillende technologieën opgelijst.

Aangezien UMTS gewoonlijk aan lagere bitrates opereert dan de andere drie bestudeerde technologieën, is een vergelijking niet echt zinvol. Daarom zullen we enerzijds de verschillende UMTS-configuraties vergelijken, en anderzijds maken we een vergelijking tussen Mobile WiMAX, LTE en HSPA. We beschouwen een 3/4 QPSK modulatieschema voor Mobile WiMAX, 2/3 QPSK voor LTE en 1/2 16-QAM voor HSPA. Dit levert telkens een bitrate op van 5.7 Mbps voor Mobile WiMAX en LTE en van 5.6 Mbps voor HSPA.

Voorbeeldberekening voor Mobile WiMAX

$$M = 6dB + 2dB + 0dB = 8dB$$

$$G = 2dBi + 0dB + 2dBi + 0dB = 4dBi$$

$$L = 0.5dB + 0dB + 8.1dB + 0dB = 8.6dB$$

$$RxSens = 10 \log_{10} (1.380658 \cdot 10^{-23} \cdot 290 \cdot 10^9) + 10 \log_{10} \left(5 \cdot 1.12 \cdot \frac{360}{512} \right) + 7dB + 2dB + 8.5dB = -90.523dB$$

dus:

$$PL_{max} = 23dBm + 4dBi + 10 \log_{10} (1 \cdot 1) + 20 \log_{10} (1) - 8.6dB - 8dB + 90.523dB = 100.923dB$$

De berekening voor LTE verloopt volledig analoog.

Voorbeeldberekening voor HSPA

$$UIM = -10 \log_{10}(1 - 0.875) = 9.031dB$$

$$M = 7.7dB + 2dB + 0dB + 9.031dB = 18.731dB$$

$$G = 2dBi + 0dB + 0dBi + 1.5dB + 12dB = 15.5dBi$$

$$L = 0dB + 0dB + 8.1dB + 0dB = 8.1dB$$

$$RxSens = 10 \log_{10}(1.380658 \cdot 10^{-23} \cdot 290 \cdot 10^9) + 10 \log_{10}(5 \cdot 0.768)$$

$$+7dB + 0dB + 6dB = -95.132dB$$

dus:

$$PL_{max} = 10 \log_{10}\left(10^{\frac{15}{10}} \cdot \frac{1 - 0.25}{0.875 \cdot 25}\right) + 15.5dBi + 10 \log_{10}(1 \cdot 1) \\ + 20 \log_{10}(1) - 8.1dB - 18.731dB + 95.132dB = 84.152dB$$

De berekening voor UMTS verloopt volledig analoog.

Resultaten

	Mobile WiMAX	HSPA	LTE
PL_{max} [dB]	100.923	84.152	98.829

Tabel 2.6: Maximaal padverlies PL_{max} met complexe formules en femtocelparameters voor Mobile WiMAX, HSPA en LTE.

Tabel 2.6 geeft een overzicht van het maximale padverlies van Mobile WiMAX, LTE en HSPA bij een bandbreedte van 5 MHz en een bitrate van ongeveer 5.7 Mbps. De hoogste waarden voor PL_{max} worden bekomen voor Mobile WiMAX en LTE, waarbij de maximale padverliezen slechts zeer weinig van elkaar verschillen. Ten opzichte van Mobile WiMAX en LTE heeft HSPA een veel lager maximaal padverlies. Dit komt vooral doordat bij HSPA het zendvermogen van het basisstation in de formule in een logaritme voorkomt, terwijl dit bij Mobile WiMAX en LTE rechtstreeks in rekening gebracht wordt. De hogere totale margin (afkomstig van de User Interference Margin) van HSPA wordt immers gecompenseerd door een hogere totale gain (afkomstig van de Processing Gain).

	UMTS Voice	UMTS PS64 Data	UMTS PS384 Data
PL_{max} [dB]	99.949	100.270	96.991

Tabel 2.7: Maximaal padverlies PL_{max} met complexe formules en femtocelparameters voor UMTS.

Tabel 2.7 geeft een overzicht van het maximale padverlies voor de verschillende UMTS-configuraties. De relatief hoge waarde van het maximale padverlies bij UMTS is vooral te danken aan de lage bitrate, de sterk negatieve ontvangersensitiviteit en de hoge waarde voor de totale gain (grotendeels dankzij de Processing Gain).

In vergelijking met de resultaten van de berekening met de macrocelparameters, merken we dat het maximale padverlies berekend met de correcte parameters voor femtocellen lager ligt. Dit komt onder andere door het lagere maximale zendvermogen van een femtocel, omdat een femtocel niet bedoeld is om zo'n groot bereik te hebben als een macrocel. Als we het verschil in resultaat zien, is het duidelijk dat het belangrijk is met de juiste parameters te werken om een zinvolle uitkomst te bekomen.

2.2 Propagatiemodellen

Eens we het maximale padverlies kennen, kunnen we het maximale bereik van een femtocel-basisstation voor een bepaalde technologie bepalen aan de hand van een propagatiemodel. Een propagatiemodel is een mathematische modellering van de signaalpropagatie in functie van enkele parameters, zoals de frequentie en de afstand. Als we in zo'n formule de gepaste technologiespecifieke parameters en maximale padverlies invullen, kan het bereik hieruit berekend worden. De meest bekende propagatiemodellen, zoals Erceg [25] en COST231-Hata [8], zijn enkel toepasbaar voor outdoor situaties en macrocellen. Hieronder worden enkele specifieke indoormodellen vermeld, waarna het meest geschikte model zal worden gekozen om mee verder te werken.

2.2.1 Okumura-Hata model

Binnenin een kamer geldt volgens het Okumura-Hata model volgende formule voor het propagatieverlies L (in dB) [26]:

$$L = K_{femto} + 20 \log_{10} D \quad (2.4)$$

$$K_{femto} = 32.4 + 20 \log_{10} f \quad (2.5)$$

waarin K_{femto} een constante is die afhangt van de technologiespecifieke frequentie f en D de afstand is (in meter) tussen de femtocel en een (mobiele) terminal.

Buiten de kamer moet verzwakking van het signaal (in dB) door muren (naar andere ruimtes, W) en tussen verdiepingen (F) in rekening gebracht worden. Bij het propagatieverlies in vrije ruimte moeten we de verliezen door verzwakking door muren en tussen verdiepingen optellen. Deze verliezen zijn evenredig met het aantal muren n en het aantal verdiepingen m waardoor het signaal propageert. De formule wordt dan:

$$L = 32.4 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} D + n \cdot W + m \cdot F \quad (2.6)$$

De verzwakking tussen twee naast elkaar liggende ruimtes is gewoonlijk slechts een paar dB, terwijl de verzwakking tussen verschillende verdiepingen veel hoger is (meer dan 20 dB) vanwege de aard van de materialen die het signaal moet doordringen. Dit heeft een voordeel voor de interferentie tussen femtocellen: de co-kanaalinterferentie tussen femtocellen op verschillende verdiepingen wordt sterk gereduceerd.

2.2.2 Log-distance model

Het log-distance padverliesmodel wordt formeel beschreven door volgende formule [8]:

$$PL = P_{Tx,dBm} - P_{Rx,dBm} = PL_0 + 10\gamma \log_{10} \frac{d}{d_0} + X_g \quad (2.7)$$

Hierin is:

- PL het totale padverlies (in dB),
- $P_{Tx,dBm}$ het verzonden vermogen (in dBm),
- $P_{Rx,dBm}$ het ontvangen vermogen (in dBm),

- PL_0 het padverlies (in dB) op een referentieafstand d_0 (gewoonlijk 1 km),
- d de lengte van het pad (in meter),
- γ de dimensieloze padverliesexponent,
- X_g een normaal (Gaussiaans) verdeelde randomvariabele met gemiddelde nul, die de verzwakking (in dB) door *flat fading* representeert. Indien er geen *fading* optreedt, is deze variabele nul. In het geval van enkel *shadow fading*, kan deze random variable een Gaussiaanse verdeling hebben met standaardafwijking σ (in dB), resulterend in een lognormale verdeling van het ontvangen vermogen in Watt.

In [27] wordt voor enkele situaties een empirische meting van de coëfficiënten γ en σ uitgevoerd. Op die manier kan voor een bepaalde situatie de gepaste waarde voor deze parameters in de formule voor het padverlies ingevuld worden.

Soorten fading

Fading wordt in draadloze communicatie gedefinieerd als afwijking van de verzwakking dat een dragergemoduleerd signaal ondervindt in een bepaald propagatiemedium [8]. Fading kan variëren in de tijd, in geografische positie en/of in frequentie en wordt meestal gemodelleerd als een randomproces. Een fadingkanaal is een communicatiekanaal dat fading ondervindt. In draadloze systemen kan fading te wijten zijn aan multipadpropagatie (*multipath induced fading*), of aan weerkaatsing tegen obstakels die de golfpropagatie beïnvloedt (*shadow fading*).

In *flat fading* ondervinden alle frequentiecomponenten van het signaal eenzelfde grootteorde van fading. In *frequentieselectieve fading* worden bepaalde frequentiecomponenten meer aangetast door fading dan andere.

2.2.3 ITU-R P.1238 model

Het ITU-R P.1238 model is een propagatiemodel dat het totale padverlies in een gesloten ruimte binnen een gebouw modelleert [22]. Dit model is enkel toepasbaar voor binnenshuisomgevingen. Typisch maken toepassingen hier gebruik van de frequentiebanden rond de 2400 MHz, al is het model voor een veel breder bereik van 900 MHz tot 5200 MHz bruikbaar.

Het model voorspelt dus padverlies tussen een indoor basisstation en een terminal, uitgaand van een gezamenlijk verlies door bemeubeling, binnenmuren en deuren. Dit verlies wordt gerepresenteerd door een dimensieloze vermogenverliesexponent N , die afhangt van het type gebouw. De types die in het model beschouwd worden zijn residentiële, commerciële of kantooromgevingen. De uitdrukking voor het padverlies (in dB) wordt gegeven door onderstaande formule:

$$L_{total} = 20 \log_{10} f + N \log_{10} d + L_f(n) - 28 \quad (2.8)$$

Hierin is:

- f de frequentie (in MHz),
- d de afstand (in meter) tussen de femtocel en de (mobiele) terminal,
- L_f de verliesfactor tussen verdiepingen (in dB),
- n het aantal verdiepingen tussen de femtocel en de (mobiele) terminal ($n \geq 1$)

In de frequentiezone die door de verschillende technologieën gebruikt wordt (rond de 2400 MHz) zijn de waarden uit Tabel 2.8 voor de parameters N en L_f van toepassing. Parameters voor andere frequentiezones worden vermeld in [28].

Scenario	N	L_f [dB]
Commercieel	22	$6 + 3(n-1)$
Residentieel	28	$4n$
Kantoor	30	$15 + 4(n-1)$

Tabel 2.8: Parameters van ITU-R P.1238 model in femtocelscenario.

Het ITU-R P.1238 model wordt gekozen als meest geschikte model om mee verder te werken omdat het in de literatuur veruit het meest gebruikt wordt als propagatiemodel voor femtocellen. Tegenover het Okumura-Hata model is het gekozen model specifiek. Het laat bijvoorbeeld toe om de range te berekenen afhankelijk van de omgeving (residentieel, kantoor of commercieel). Voor de binnenshuisomgevingen die in het vervolg beschouwd worden, zijn het kantoor- en residentieel scenario het meest geschikt. Vergeleken met het log-distance model is het ITU-R P.1238 model specifiek en minder afhankelijk van distributiegebonden variabelen: die Gaussiaans verdeelde X_g zorgt in (2.7) voor een vaagheid

die (2.8) niet heeft.

2.3 Berekening van het bereik

In de eerste sectie van dit hoofdstuk hebben we reeds het maximale padverlies berekend. Voor de berekening van het bereik rekenen we verder met het ITU-R P.1238 propagatiemodel. Als we deze formule omrekenen naar de afstand, kunnen we alle resterende parameters invullen om het bereik te berekenen. De formule wordt dan:

$$d = 10^{\frac{PL_{max} - 20 \log_{10} f - L_f(n) + 28}{N}} \quad (2.9)$$

In bovenstaande formule zijn PL_{max} en f technologiespecifieke parameters. N en $L_f(n)$ kunnen gehaald worden uit Tabel 2.8.

We berekenen als voorbeeld het bereik van een femtocel gebruik makend van LTE in een kantooromgeving met één verdieping tussen het femtocelbasisstation en de (mobiele) terminal. In die situatie moeten we dus volgende parameters invullen:

- $PL_{max} = 98.829$ dB (zie tabel 2.6)
- $f = 2600$ MHz (technologiespecifiek)
- $L_f(n) = 15$ (1 verdieping tussen basisstation en UE)
- $N = 30$ (kantoorscenario)

Het bereik is dan:

$$d = 10^{\frac{98.829 - 20 \log_{10} (2600) - 15 + 28}{30}} = 28.25m$$

In Tabel 2.9 worden alle berekende waarden van het bereik van Mobile WiMAX, HSPA en LTE voor verschillende scenario's getoond (nog steeds met $L_f(n) = 1$). Om dezelfde reden als in 2.1.3 wordt UMTS afzonderlijk beschouwd in Tabel 2.10. Van de andere drie technologieën wordt het bereik vergeleken bij een bitrate van ongeveer 5.7 Mbps.

Bereik [m]	Mobile WiMAX	HSPA	LTE
Commercieel	122.823	24.877	95.191
Residentieel	43.810	12.494	35.860
Kantoor	34.052	10.558	28.247

Tabel 2.9: Bereik van Mobile WiMAX, HSPA en LTE in functie van het scenario.

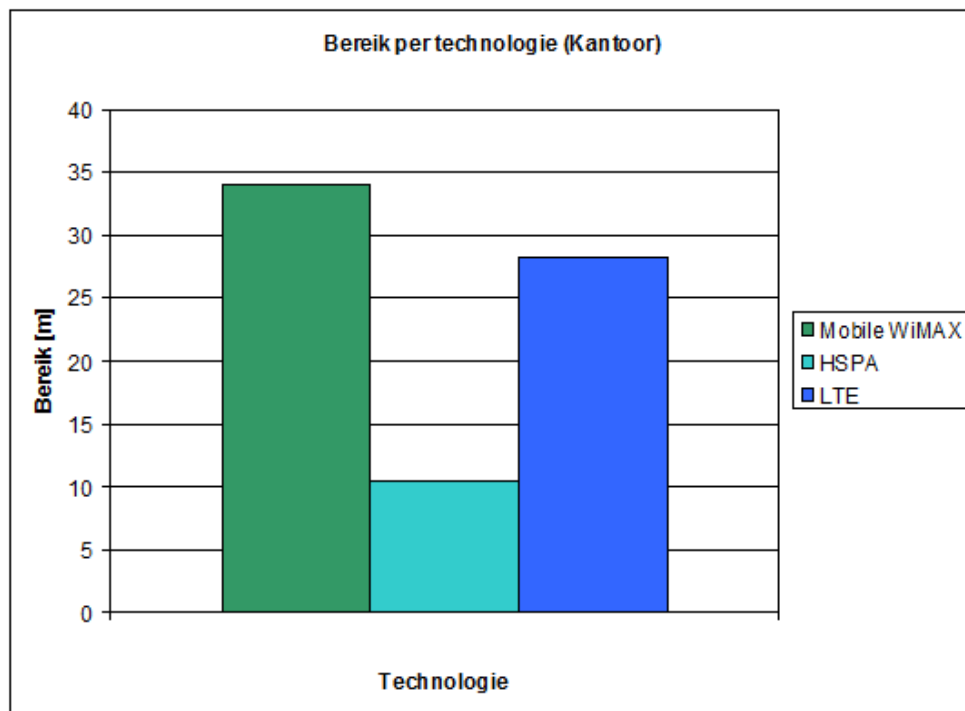
Bereik [m]	UMTS Voice	UMTS PS64 Data	UMTS PS384 Data
Commercieel	129.977	134.412	95.352
Residentieel	45.803	47.027	35.911
Kantoor	35.495	36.379	28.284

Tabel 2.10: Bereik van UMTS in functie van het scenario.

De waarden voor het bereik verschillen sterk voor de verschillende scenario's: de factor N heeft een grote impact in formule (2.9). De waarden voor de meest realistische scenario's (residentieel en kantoor) liggen in de lijn van de verwachtingen voor femtocellen. In Figuur 1.3 wordt immers gesproken van een bereik van ongeveer 30 meter. Ook in [29] spreekt men van een bereik van ongeveer 30 meter (voor de Mobile WiMAX-technologie). [8] vermeldt een bereik van tientallen meters.

De waarden voor Mobile WiMAX, HSPA en LTE in het kantoorscenario worden ter vergelijking nog eens grafisch uitgezet in Figuur 2.1. Het maximale padverlies is de doorslaggevende factor in de formule voor het bereik. De technologieën met het hoogste maximale padverlies (Mobile WiMAX en LTE) hebben een duidelijk groter bereik dan HSPA. In Figuur 2.1 wordt het bereik gegeven indien er één verdieping tussen het femtocelbasisstation en de (mobiele) terminal is. Wanneer $L_f(n)$ groter wordt (n groter dan 1), zal het bereik uiteraard kleiner worden vanwege de negatieve impact van $L_f(n)$ in de formule.

Bijlage B vermeldt gedetailleerd het maximale padverlies en het bereik in verschillende scenario's voor alle bestudeerde technologieën voor een bandbreedte van 5 MHz. We bemerken dat een femtocel omnidirectioneel is: in elke richting wordt met eenzelfde vermogensterkte uitgezonden, waardoor het bereik dus hetzelfde is in alle richtingen.



Figuur 2.1: Bereik van een femtocel per technologie (in kantooromgeving).

Hoofdstuk 3

Hardwaremodel en vermogenverbruik

Een tweede belangrijk onderdeel in de karakterisering van groene femtocelnetwerken is het vermogenverbruik van de femtocel. Hiervoor moeten we eerst weten hoe een femtocel hardwarematig in elkaar zit (Sectie 3.1), alvorens we het vermogenverbruik van de afzonderlijke componenten kunnen bepalen en optimaliseren (Sectie 3.2).

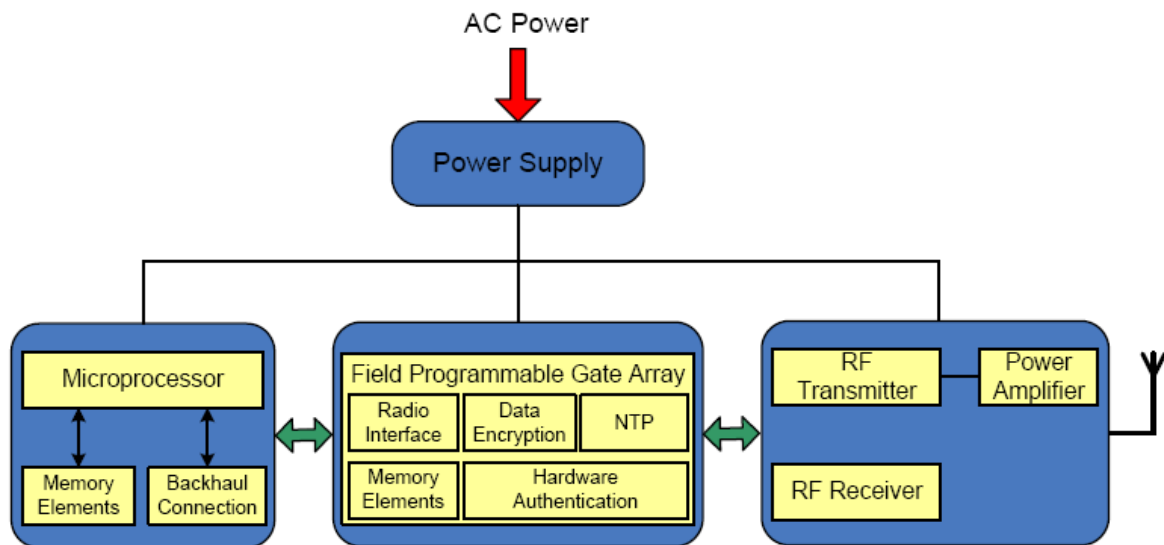
3.1 Hardwaremodel

De componenten van de klassieke femtocel worden besproken in de eerste deelparagraaf. Tegenwoordig zijn er ook geminiaturiseerde versies van femtocellen aan een opmars bezig, zoals bijvoorbeeld een femtocel geïmplementeerd op een chip of op een USB-dongle. Deze worden besproken in een tweede deelparagraaf.

3.1.1 Componenten van een klassieke femtocel

In het kader van het ontwikkelen van algoritmen die gebruik maken van een slaaptoestand, waarbij dynamisch bepaalde hardwarecomponenten uitgeschakeld worden in omstandigheden met weinig verkeer (zie Sectie 3.2), is het belangrijk om een goed beeld te hebben van de hardwarecomponenten van een femtocel. Figuur 3.1 geeft een schematisch overzicht van het hardwaremodel van een typische kleine cel, zoals een femtocel.

Het hardwaremodel van een klassieke femtocel bestaat uit drie interagerende blokken [30]. Het eerste blok bevat een microprocessor, die verantwoordelijk is voor beheer en implementatie van de gestandaardiseerde radioprotocols en de geassocieerde basisbandverwerking,



Figuur 3.1: Typisch hardwaremodel voor een femtocelbasisstation. [30]

alsook voor het beheer van de backhaulconnectie naar het core-netwerk. Deze functionaliteit wordt gewoonlijk geïmplementeerd als een multicore applicatiespecifiek geïntegreerd circuit (ASIC), wat het voordeel van een laag vermogenverbruik met zich meebrengt. Naast het geheugen op de processorchip zelf, zijn er nog één of meerdere Random Access Memory (RAM)-componenten verbonden met de microprocessor. Deze zijn nodig voor verschillende databehandelingfuncties en voor het opstarten van het systeem.

Het model bevat ook een Field-Programmable Gate Array (FPGA)-blok en andere circuits om tal van functies te implementeren, zoals bijvoorbeeld data-encryptie, hardware-authenticatie en Network Time Protocol. Hoewel een FPGA niet echt kostefficiënt is, voorziet het wel de nodige flexibiliteit om eventuele bedrijfseigen componenten te integreren in de femtocelhardware.

De radiocomponent in de FPGA doet dienst als interface tussen de microprocessor en de Radio Frequency (RF) transceiver, het derde basisblok van de femtocel. Er zijn gescheiden RF componenten voor datatransmissie en -ontvangst in het hardwaremodel. Een RF vermogenversterker wordt gebruikt om een sterk signaal door te geven aan de verzendende antenne.

3.1.2 De toekomst van femtocellen: miniaturisatie

Femtocellen zijn ontworpen als binnenshuisbasisstations en voorzien aldus een verbeterde bedekking en datadiensten voor mobiele telefoon-abonnees in randgebieden. Het merendeel van de grote maatschappijen biedt al femtocellen aan in de geselecteerde gebieden, en die trend is nog steeds aan het stijgen. Daarnaast zullen femtocellen, picocellen en microcellen ook gebruikt worden als deel van de mobiele telefooninfrastructuur met het online komen van nieuwe Long Term Evolution (LTE)-diensten. Deze kleinere basisstations kunnen een brede bedekking bewerkstelligen in bepaalde gebieden tegen een fractie van de kost van een standaard macrocelbasisstation. Voorbeelden van geminiaturiseerde femtocellen zijn onder andere de Magic Jack (USB-dongle) en de PC3*-reeks van Picochip.

Figuur 3.2 toont de PC333 *system-on-a-chip*, dit is de eerste chip die specifiek ontworpen is om de femtocel te gebruiken in de publieke toegangsinfrastructuur, eerder dan in een binnenshuisomgeving. De PC333 integreert het grootste deel van een compleet 3GPP Release 8 Local Area 42-Mbps HSPA+ basisstation op één enkele chip. De RF transceiver bevindt zich op een afzonderlijke chip.



Figuur 3.2: De Picochip PC333 femtocel-on-chip. [31]

De PC333 is ook de eerste chip die MIMO en soft handover (gedefinieerd in Tabel 2.1) ondersteunt en aangepast is aan de Local Area Basestation (LABS) standaard. De ontwikkelingskost ligt ook veel lager dan in traditionele femtocellen en de prestatie verbetert tot op picocel- of zelfs microcelniveau.

LABS Standaard

LABS is de 3GPP-definitie van systemen met betere prestatie dan binnenshuisbasisstations [32]. Dit wil zeggen: hogere capaciteit, 120 km/h mobiliteit en +24dBm uitgangsvermogen voor meer dan 2 km. *Local area* basisstations veronderstellen relatief lage Minimum Coupling Loss (MCL)¹, zoals typisch binnenshuis (bijvoorbeeld kantoren en metrostations) waar antennes op plafonds of muren geplaatst zijn (of mogelijk ingebouwd in het basisstation).

3.2 Vermogenverbruik

In deze sectie wordt eerst het verbruik van de componenten van het theoretisch hardwaremodel van Sectie 3.1 besproken. Daarna wordt dat model getoetst aan de praktijk door het verbruik van een op de markt gebrachte femtocel in detail te onderzoeken. We bekijken ook het totale vermogenverbruik van nog enkele andere gecommmercialiseerde femtocellen. Tenslotte bekijken we nog enkele optimalisatie-algoritmen die het vermogenverbruik van een femtocel kunnen reduceren.

3.2.1 Verbruik van componenten in theoretisch hardwaremodel

Tabel 3.1 toont het vermogenverbruiksprofiel van de typische hardwareconfiguratie van een kleine cel zoals op Figuur 3.1. In dit profiel wordt een statisch vermogenverbruik verondersteld onder alle verkeer. Onder deze veronderstelling verbruiken de hardwarecircuits een totaal vermogen van 10.2W in volledig actieve status. Als we een efficiëntie van 85% veronderstellen van de *Power Supply*-component, is het totaal AC-vermogen onttrokken aan de socket 12W.

In [33] wordt meer gedetailleerd besproken dat in het microprocessorblok de microprocessor zelf 1.7W verbruikt, de geheuelementen 0.5W en andere circuitelementen ook 0.5W. In het FPGA-blok verbruikt de FPGA zelf 2W, het geassocieerd geheugen 0.5W en andere circuitelementen 1.5W. Er zijn gescheiden RF componenten voor datatransmissie en -ontvangst in het hardwaremodel, die elk een zekere hoeveelheid vermogen verbruiken.

¹Minimum Coupling Loss (MCL) is gedefinieerd als het minimum afstandsverlies (antennewinst inbegrepen) gemeten tussen de antenne-aansluitingen.

Een RF vermogenversterker wordt gebruikt om een sterk signaal door te geven aan de zendantenne. Door de hoge impact op de kost in de hardware van een kleine cel, is een kostefficiënte en robuuste vermogenversterker met hoge lineariteit en gain vereist. Typisch varieert de power added efficiency (PAE, verhouding van RF vermogenwinst tot DC ingangsvermogen) van zo'n vermogenversterker van 5% tot 40%, afhankelijk van het uitgangsvermogen van de vermogenversterker.

Hardwarecomponent	Vermogenverbruik
Microprocessorblok (P_{micro})	2.7 W
FPGA-blok (P_{FPGA})	4.0 W
RF Transmitter ($P_{RF,Tx}$)	1.0 W
RF Receiver ($P_{RF,Rx}$)	0.5 W
RF Power Amplifier (P_{amp})	2.0 W

Tabel 3.1: Vermogenverbruik van componenten van theoretisch hardwaremodel. [30]

Als we dit alles in een formule willen gieten, bekomen we volgende uitdrukking voor het vermogenverbruik van de femtocel, die $P_{tot} = 10.2W$ oplevert:

$$P_{tot} = P_{micro} + P_{FPGA} + P_{RF,Tx} + P_{RF,Rx} + P_{amp} \quad (3.1)$$

waarin P_{amp} , rekening houdend met de PAE, gegeven wordt door:

$$P_{amp} = \frac{P_{Tx}}{\eta} \quad (3.2)$$

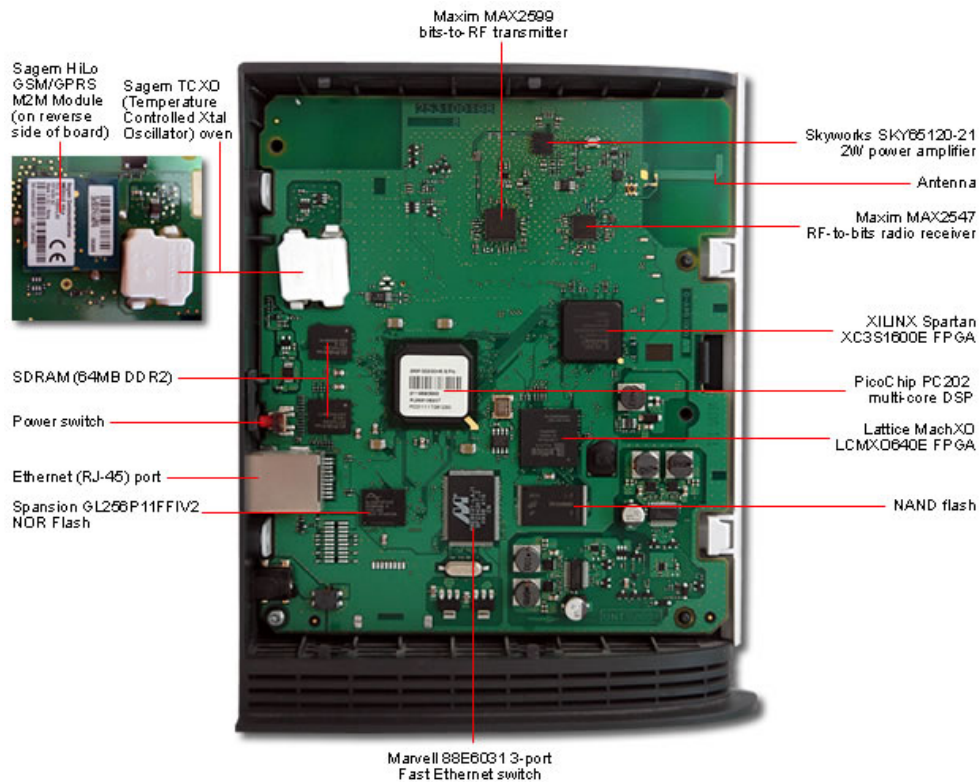
In deze formule is P_{Tx} het ingangsvermogen van de antenne (in Watt) en η de efficiëntie van de vermogenversterker: dit is de verhouding van het RF uitgangsvermogen $P_{out,amp}$ (in Watt) tot het elektrisch ingangsvermogen P_{amp} (in Watt) van de vermogenversterker. Aangezien η typische waarden tussen 5% en 40% kan aannemen, varieert P_{Tx} tussen 0.1W en 0.8W. Het RF uitgangsvermogen van de vermogenversterker correspondeert met het ingangsvermogen P_{Tx} van de antenne.

3.2.2 Case study: vermogenverbruik van een gecommmercialiseerde femtocel

De waarden voor het vermogenverbruik uit Tabel 3.1 worden grotendeels bevestigd door datasheets en publicaties van fabrikanten van componenten. Figuur 3.3 geeft bijvoorbeeld

een overzicht van de structuur van de Vodafone Sure Signal femtocel. Het vermogenverbruik van enkele componenten is:

- Skyworks vermogenversterker: 2 W (zie Figuur 3.3)
- Picochip PC202 microprocessor: tussen 1W en 1.936W [34]
- Xilinx Spartan FPGA: ongeveer 2W [35]
- Maxim RF receiver: 190mW [36]
- Sagem HILO communicatiemodule: 7mW tot 700mW (idle mode / active mode) [37]



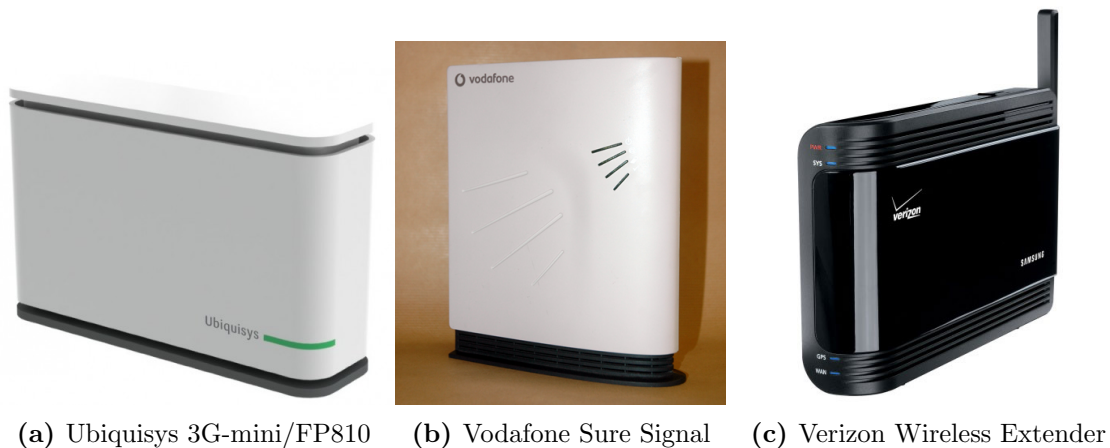
Figuur 3.3: Binnenkant van de Vodafone Sure Signal femtocel. [38]

Behalve de RF transmitter en receiver die minder vermogen verbruiken dan in het theoretische model, komen de waarden (ruwweg) overeen. Er dient wel opgemerkt te worden dat deze waarden sterk fabrikantsafhankelijk kunnen zijn. Zo is het lage vermogenverbruik van de Maxim RF chips te danken aan het feit dat Maxim dit specifieke chipdesign gekozen

heeft met als doel om het vermogenverbruik laag te houden [39], terwijl in het theoretische model met standaard (niet-geoptimaliseerde) RF apparatuur rekening gehouden wordt.

Het totale vermogenverbruik van de Vodafone Sure Signal femtocel (inclusief de niet-bovenvermelde componenten, zoals circuit- of geheugen-elementen, die in het theoretisch model samen ongeveer 3W verbruiken) ligt in dezelfde orde als de 10.2 W van het eerder besproken theoretische model.

3.2.3 Vermogenverbruik volgens andere bronnen



Figuur 3.4: Voorbeelden van gecommercialiseerde femtocellen.

[40] (minder dan 12W) en [41] (10W) vermelden een vermogenverbruik van dezelfde orde als het theoretisch hardwaremodel. [42] (ongeveer 5W), [43] (zie Figuur 3.4(a), 4.5W) en [31] (minder dan 5W) spreken van een lager vermogenverbruik. Hierin wordt echter niet gesproken van een specifiek theoretisch hardwaremodel, maar van femtocellen die op de markt gebracht worden. Deze andere bronnen komen ongeveer overeen met de theoretische cijfers van het hardwaremodel, op voorwaarde dat er één van de optimalisaties uit volgende sectie is toegepast of dat er gekozen werd voor specifieke vermogenefficiënte componenten in de ontwerpsfase. Met deze bevestigende bronnen kunnen we besluiten dat vermelde hardwaremodel en bijhorende cijfers bruikbaar zijn voor verder onderzoek.

3.2.4 Optimalisatie van vermogenverbruik

Een aandachtspunt dat verbonden is aan het gebruik van kleine cellen is de resulterende significante stijging in het vermogenverbruik van het netwerk. Hoewel elk femtocelbasisstation slechts een laag vermogenverbruik heeft, zorgt een uitrol op grote schaal (tientallen, honderden of zelfs duizenden femtocellen) voor een hoge waarde van het vermogenverbruik van het totale netwerk. Met dit achterliggende idee worden energie-efficiënte technieken ontwikkeld die de impact van een netwerk opgebouwd uit veel kleine cellen op het totale vermogenverbruik reduceren.

Technieken met een slaapmodus

Een veelbelovende aanpak bestaat erin om femtocelbasisstations te implementeren met de capaciteit om in een laag vermogen verbruikende slaaptoestand te gaan wanneer ze geen verkeer van de gebruikers te verwerken krijgen. Dit zal het geval zijn gedurende een groot deel van de dag. Omdat femtocellen een gelimiteerd bereik hebben, is deze aanpak weinig storend voor de gebruikers. Daarenboven laat slaapmodusactivatie of -deactivatie toe om op aanvraag systeemcapaciteit beschikbaar te stellen aan het netwerk. Als de implementatie van slaapmodi in femtocellen gecombineerd wordt met intelligente macrocellen die hun vermogenverbruik kunnen aanpassen naargelang de verkeerscondities, kan het totale vermogenverbruik significant gereduceerd worden ten opzichte van een netwerk met enkel macrocellen.

Het basisidee achter het invoeren van slaaptoestanden in femtocelbasisstations is het creëren van een toestand in de hardware waarin weinig vermogen verbruikt wordt. We veronderstellen dat een femtocel zich steeds in exact één van volgende twee toestanden bevindt:

Actieve toestand (RE) In deze toestand zijn alle hardwarecomponenten van de femtocel volledig aangeschakeld. De RF piloottransmissies worden uitgevoerd om een bepaald gebied van bereik te voorzien en alle toegelaten gebruikers in het bedekte gebied worden bediend.

Slaaptoestand (SL) In deze toestand worden sommige hardwarecomponenten van de femtocel gedeeltelijk of volledig uitgeschakeld zodat ze in een laagverbruikende toestand komen. De componenten die uitgeschakeld worden, hangen af van het specifieke vermogenreducerende algoritme en de hardwarearchitectuur.

In [30] worden drie technieken voorgesteld die gebruik maken van slaaptoestanden. Voor een beschrijving van de technieken die gecontroleerd worden vanuit het core netwerk en de femtocel zelf, verwijzen we naar deze publicatie. De techniek die met vermogencontrole vanuit de femtocel zelf, is gelijkaardig aan het algoritme voor detectie van gebruikersactiviteit dat we later bespreken [33]. We beschrijven nu een vermogenreducerende techniek die gecontroleerd wordt vanuit de toestellen (*User Equipment*, UE) van de gebruikers.

De UE kan wake-up signalen uitzenden om femtocelbasisstation binnen zijn bereik wakker te maken. Als de femtocel in slaaptoestand verkeert, behoudt ze de mogelijkheid om wake-up signalen van UE's op te pikken, waarop de femtocel dan overgaat naar de actieve toestand. Deze aanpak kan op verschillende manieren geïmplementeerd worden. Een eerste mogelijkheid is dat de UE periodiek wake-up signalen uitzendt zodat eender welke femtocel in slaaptoestand kan overgaan naar actieve toestand als de UE dichterbij komt. Dit betekent dat het bereik voorzien door femtocellen de bewegende UE "volgt" en verzekert van bedekking door een femtocel waar mogelijk. Het minpunt aan deze implementatie is dat de vermogenreductie van de femtocel beperkt is omdat de femtocel een relatief groot deel van de tijd in actieve toestand luistert naar wake-up signalen. Ook de levensduur van de batterij van de UE daalt vanwege het periodiek uitzenden van signalen.

Een alternatieve implementatiestrategie houdt in dat de UE op aanvraag wake-up signalen uitzendt wanneer nodig, zoals bijvoorbeeld in de afwezigheid van voldoende macrocelbedekking. In zo'n situatie kan de UE signalen uitzenden om te proberen om femtocellen binnen zijn bereik wakker te maken. De UE kan ook signalen uitzenden alvorens een connectie te bewerkstelligen met het netwerk. Dit laat de UE toe om eerst een femtocel wakker te maken om dan rechtstreeks te connecteren door de femtocel. Deze *on demand*-aanpak resulteert in betere vermogenreductie aangezien de femtocel zich vaker in slaaptoestand bevindt en enkel indien nodig naar actieve toestand gaat.

Een eerste voordeel van de UE-gecontroleerde aanpak is dat deze niet op een onderliggende macrocellaag beroep doet om femtocellen aan of uit te schakelen. Daarnaast wordt ook de signallering in het core netwerk gereduceerd omdat de UE eerst met de femtocel communiceert en pas daarna met het core netwerk.

Om snelle overgang tussen slaaptoestand en actieve toestand mogelijk te maken, kunnen de RF transmitter, de vermogenversterker en enkele circuitelementen uitgeschakeld worden in de slaaptoestand. Op deze manier kan een vermogenreductie van 4.7 W bekomen worden, dit is de som van het vermogenverbruik (zoals in Tabel 3.1) van de afgeschakelde compo-

menten: de vermogenversterker, de RF transmitter en verschillende andere niet-essentiële hardware-elementen [30]. Met deze strategie kan de femtocel onmiddellijk van toestand wisselen bij ontvangst van een UE-sigitaal.

Detectie van gebruikersactiviteit

Het vermogenverbruik van femtocellen wordt door deze techniek dynamisch aan banden gelegd door de radiotransmissies en geassocieerde verwerking volledig uit te schakelen wanneer ze niet betrokken zijn in een gesprek (IDLE-toestand). De toestand wordt opnieuw ACTIVE als deze componenten terug aangeschakeld worden. Dit mechanisme reduceert het verbruik van de femtocel significant. We beschrijven nu het algoritme en bespreken daarna de bereikte resultaten van deze techniek [33].

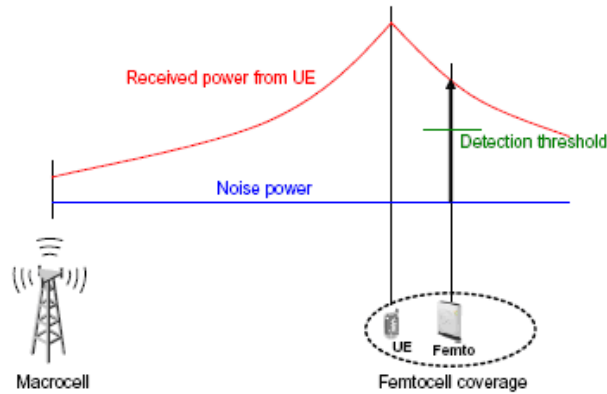
Beschrijving algoritme

Er wordt een IDLE-toestand toegevoegd aan de werking van de femtocel, waarbij zijn pilot-transmissies en bijhorende verwerking worden uitgeschakeld als de geregistreerde gebruikers niet actief zijn. Enkel de hardwarecomponenten die vereist zijn om de femtocelconnectie naar het core netwerk in stand te houden, blijven aangeschakeld. De backhaulconnectie wordt behouden om RF synchronisatie te behouden.

Onderliggende macrocellen zijn dus essentieel voor de werking van deze IDLE-mode omdat de procedure steunt op het detecteren (door de femtocel, via een vermogensniffer die weinig verbruikt) van transmissies van UE naar een macrocel. Figuur 3.5 toont hoe gebruikersactiviteit gedetecteerd wordt door de femtocel.

Als een UE in het bereik van de femtocel een gesprek opzet via de macrocel, detecteert de sniffer een stijging in het ontvangen vermogen op de uplink-frequentieband. Als dit waargenomen vermogen boven een bepaalde vooropgestelde grens (gebaseerd op het padverlies naar de macrocel zodat een UE op de grens van het femtocelbereik waargenomen wordt) ligt, wordt de gedetecteerde UE dicht genoeg bij de femtocel beschouwd om binnen het bereik te liggen. De stijging is gemakkelijk te detecteren, aangezien de UE aan hoog vermogen uitzendt om de macrocel te bereiken, terwijl de UE zich zeer dicht bij de femtocel bevindt.

Wanneer een actief gesprek van een geregistreerde UE gedetecteerd wordt, kan de femtocel de air interface en de pilot-transmissies opnieuw activeren. Bij activatie van de ACTIVE-



Figuur 3.5: Detectie van gebruikersactiviteit door de femtocel. [33]

toestand, rapporteert de UE de femtocelpilot aan de macrocel waarmee het geconnecteerd is, en de UE wordt overgedragen van de macrocel naar de femtocel (als toegang tot de femtocel toegelaten is voor de UE).

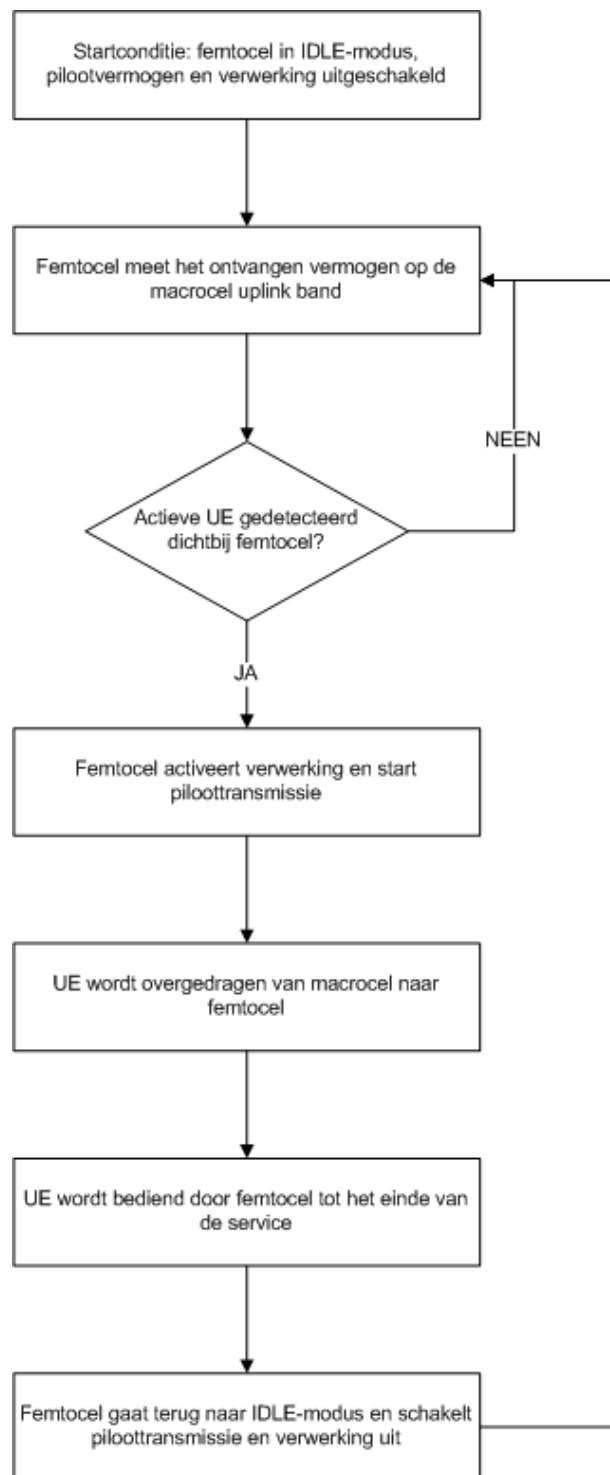
Het vooropgestelde algoritme vereist een macrocel-naar-femtocelhandover van een femtocelgeregistreerde UE wanneer de femtocel zijn pilot aanschakelt, en een femtocel-naar-macrocel herselectieprocedure wanneer de femtocel zijn pilot opnieuw uitschakelt. Echter, de voordelen van deze techniek halen de bovenhand op vermelde effecten. De werking van het algoritme wordt duidelijk geïllustreerd in de flowchart van Figuur 3.6.

Simulatiemethode

Voor deze vermogenreducerende techniek bespreken we ook kort de simulatiemethode omdat hier een interessant concept gebruikt wordt dat we later ook zullen gebruiken in onze tool (zie Hoofdstuk 5), namelijk het gebruik van een verkeersmodel.

We noemen P_{saved} het vermogen bespaard door invoering van de IDLE-toestand in het femtocelbasisstation. Het verbruik in die IDLE-toestand is dan $P_{IDLE} = P_{tot} - P_{saved}$. We definiëren ook de gemiddelde arbeidscyclus $\bar{\eta}$ als de fractie van de tijd die de femtocel in actieve toestand doorbrengt. Op die manier kunnen we de *gemiddelde reductie in het vermogenverbruik* Ω van de femtocel karakteriseren als een percentage van het totaal vermogenverbruik:

$$\Omega = \frac{P_{saved}}{P_{tot}} \cdot (1 - \bar{\eta}) \cdot 100\% \quad (3.3)$$



Figuur 3.6: Flowchart van het algoritme op basis van detectie van gebruikersactiviteit. [33]

In de IDLE-toestand worden de vermogenversterker, de RF transmitter en -receiver en verschillende hardwarecomponenten (in de formule voorgesteld door P_{misc}) die niet-essentiële functies – zoals bijvoorbeeld data-encryptie – vervullen, uitgeschakeld door het femtocelbasisstation. Daarentegen wordt wel een sniffer toegevoegd die weinig vermogen verbruikt (0.3 W). Het bespaarde vermogen *in de femtocel* is dan:

$$P_{saved} = P_{amp} + P_{RF,Tx} + P_{RF,Rx} + P_{misc} - P_{sniffer} \quad (3.4)$$

dus:

$$P_{saved} = 2.0W + 1.0W + 0.5W + 1.0W - 0.3W = 4.2W$$

De bovengrens op Ω is (met $\bar{\eta} = 0$) 41.2%, want $P_{tot} = 10.2$ W.

Om de gemiddelde arbeidscyclus $\bar{\eta}$ te berekenen, wordt gebruik gemaakt van een simulatie met verkeersmodel, dat de generatie van voice traffic in een binnenshuisomgeving uitgerust met femtocellen voorstelt. Het verkeer wordt opgedeeld in verschillende periodes van de dag met variabele belasting. De generatie van gesprekken door een gebruiker wordt gemodelleerd aan de hand van een Poissonproces, resulterend in een exponentiële interarrivaltijd met gemiddelde λ_{IA} . De duur van het gesprek wordt ook gemodelleerd als exponentieel verdeeld met gemiddelde λ_{CH} (wordt vastgelegd op 3 minuten, voor alle periodes gelijk). Tabel 3.2 geeft een overzicht van het gebruikte verkeersmodel:

Tijdsperiode	Verkeersniveau	$\lambda_{IA}[min]$	$\lambda_{CH}[min]$
22:00 - 08:00	Laag	240	3
08:00 - 18:00	Medium	60	3
18:00 - 22:00	Hoog	30	3

Tabel 3.2: Gebruikte verkeersmodel in simulaties.

De bekomen resultaten met deze simulatiemethode worden beschreven en geanalyseerd in [33]. In de simulatietool die in Hoofdstuk 5 opgesteld wordt, gebruiken we elementen uit beide vermogenreducerende algoritmes die hierboven uitgelegd werden.

Hoofdstuk 4

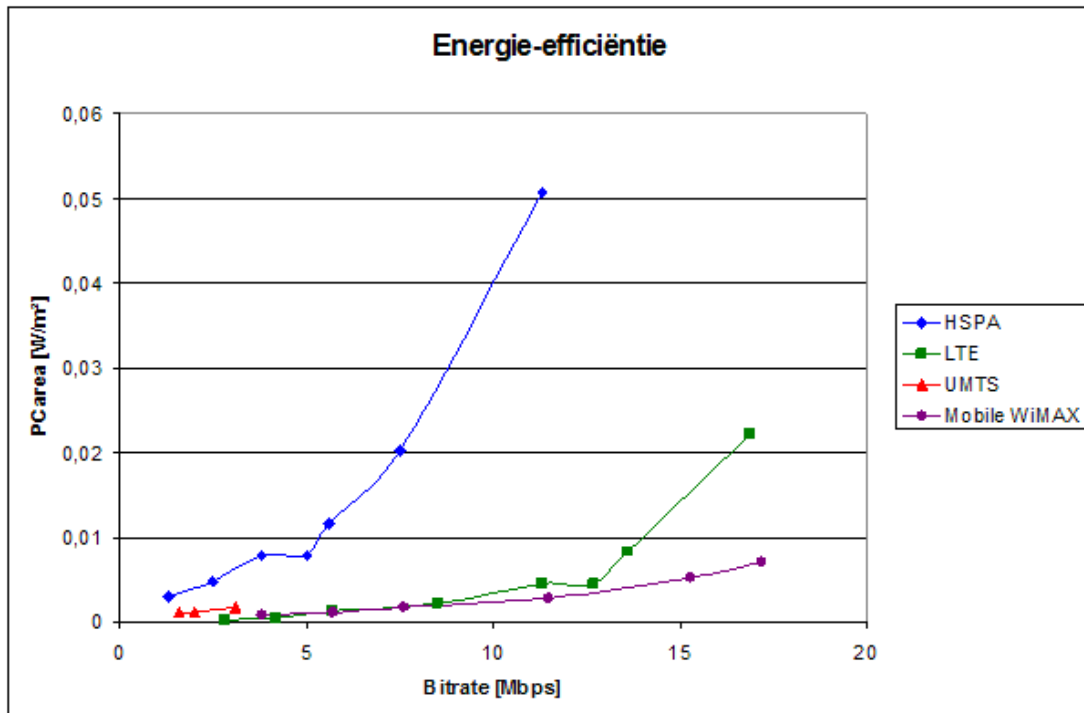
Combinatie van resultaten: energie-efficiëntie

We vergelijken nu de verschillende draadloze technologieën bij een bandbreedte van 5 MHz. We gebruiken de eerder vermelde resultaten van het onderzoek naar het bereik en het vermogenverbruik van femtocellen uit de vorige hoofdstukken. Figuur 4.1 toont het vermogenverbruik PC_{area} per bedekt gebied (in Watt per m^2) in functie van de bitrate (in Mbps). Het vermogenverbruik per bedekt gebied wordt gegeven door volgende formule [16]:

$$PC_{area} = \frac{P_{el}}{\pi \cdot R^2} \quad (4.1)$$

met P_{el} het vermogen (in Watt) onttrokken aan het elektriciteitsnet en R het bereik (in meter). De parameter PC_{area} laat ons dus toe te bepalen welke technologie het meest energie-efficiënt is, namelijk de technologie met de laagste waarde voor PC_{area} .

In het algemeen toont Figuur 4.1 dat PC_{area} stijgt met stijgende bitrates voor elke technologie en dus minder energie-efficiënt wordt als er een hogere bitrate wordt bereikt. De verklaring hiervoor ligt in het feit dat hogere bitrates corresponderen met hogere waarden voor de ontvangerssensitiviteit, die op hun beurt voor kleinere bereiken zorgen. Via de formule voor PC_{area} kan dan gemakkelijk afgeleid worden dat een kleiner bereik R voor een hogere PC_{area} zorgt bij vaste P_{el} : eenzelfde vermogenverbruik leidt dan tot een kleinere bedekte oppervlakte waardoor de energie-efficiëntie daalt.



Figuur 4.1: Energie-efficiëntie van verschillende technologieën in functie van de bitrate in een kantoorscenario.

Uit de grafiek blijkt dat HSPA over de hele lijn de minst energie-efficiënte technologie is, vanwege zijn laag bereik. Verder kunnen we zien dat tot een bitrate van iets meer dan 5 Mbps, LTE het meest energie-efficiënt is, terwijl voor hogere bitrates Mobile WiMAX een lagere waarde voor PC_{area} oplevert. Tot een bitrate van ongeveer 5 Mbps wordt er een hoge range bereikt voor LTE (resultierend in een lagere PC_{area}) vanwege een lage ontvanger-signaal-ruisverhouding (zie parameters in Bijlage A). Voor bitrates hoger dan 5 Mbps echter, heeft Mobile WiMAX lagere ontvanger-signaal-ruisverhoudingen dan LTE, wat leidt tot hogere bereiken en dus lagere PC_{area} (en dus hogere energie-efficiëntie) voor Mobile WiMAX. UMTS is vrij energie-efficiënt voor lage bitrates.

Hoofdstuk 5

Simulatietool

In de vorige hoofdstukken werden verschillende aspecten van femtocellen geanalyseerd. Nu brengen we deze karakteristieken samen in de ontwikkeling van een tool die een groen femtocelnetwerk ontwerpt in een klein geografisch gebied. Hiervoor maken we eerst een vergelijking tussen een statische of een dynamische simulatie (Sectie 5.1). Vervolgens stellen we een vermogenreducerend algoritme samen en analyseren we de prestatie ervan in een eenvoudig scenario, gebruik makend van een dynamisch verkeersmodel (Sectie 5.2). Daarna bestuderen we hoe een klein geografisch gebied kan voorzien worden van femtocelbedekking met behulp van een statische simulatietool (Sectie 5.3). Tenslotte worden de resultaten van de statische en dynamische simulatie gecombineerd en geëvalueerd (Sectie 5.4).

5.1 Statische versus dynamische simulatie

In [5] wordt een onderscheid gemaakt tussen statische en dynamische simulatie op systeemniveau. In een *statische simulatie* wordt de gemiddelde prestatie van het systeem geëvalueerd over een bepaald gebied gedurende een lange tijdsperiode. Dit soort simulatie is gewoonlijk gebaseerd op verschillende onafhankelijke Monte Carlo-snapshots, wat een veelgebruikte aanpak is in netwerkplanning en -optimalisatie. In een Monte Carlo-snapshot wordt het tijdsdomein verwaarloosd en zijn meerdere gebruikers met verschillende behoeften random verspreid over het te bestuderen gebied. Er is een groot aantal snapshots nodig om een statistisch representatieve gemiddelde prestatie van het systeem te bekomen. De prestatie van het netwerk wordt geëvalueerd in termen van bedekking en capaciteit.

In een *dynamische simulatie* is het de bedoeling om zeer gedetailleerd het functioneren van het systeem te modelleren. In dit geval wordt de evolutie van het netwerk in de tijd in rekening gebracht en worden dynamische karakteristieken geanalyseerd. Zo wordt bijvoorbeeld het verkeer gesimuleerd met een bepaald verkeersmodel. Op deze manier kan het gedrag van vermogenreducerende technieken in detail geanalyseerd worden in de tijd. Omdat er een hoog niveau van detail vereist is voor een dynamische simulatie, stijgt de rekencomplexiteit significant. Daarom is dit soort simulatie enkel toepasbaar op kleine gebieden en voor korte tijdsperiodes.

In [16] wordt een tool voorgesteld die gebruik maakt van statische simulatie voor macrocellen die een efficiënte bedekking oplevert voor een bepaald groot geografisch gebied, zoals een stad. Een gelijkaardige tool ontwerpen voor een femtocelnetwerk lijkt niet zinvol aangezien femtocellen door de gebruiker zelf geïnstalleerd worden en niet op grote schaal uitgerold worden door een operator. Het is dus weinig realistisch om de femtocelbedekking in een stad te maximaliseren omdat femtocellen maar zeer geleidelijk in omgang zullen komen. Daarom is het interessanter om een statische simulatie uit te voeren op een klein gedeelte van een stad, bijvoorbeeld een bepaalde blok aansluitende gebouwen, waarbij dan geprobeerd wordt om dat gebiedje zo goed mogelijk te bedekken met femtocellen en waarbij daarna via een dynamisch model kan gekeken worden naar het vermogenverbruik in functie van de tijd door toepassing van slaaptoestanden en een verkeersmodel.

5.2 Vermogenreducerend algoritme

5.2.1 Beschrijving

De basis van het gebruikte algoritme is om een slaaptoestand in te voeren die gecontroleerd wordt vanuit de UE zoals beschreven in subsectie 3.2.4 [30]. Enerzijds werd dit algoritme gekozen omdat het vermogenverbruik in de slaaptoestand (5.5 W) beduidend lager is dan het verbruik in de actieve toestand (10.2 W). De bedoeling is uiteraard dat de femtocel zich gedurende het grootste deel van de tijd in de slaaptoestand bevindt, om zo de vermogenreductie te maximaliseren. Anderzijds biedt deze aanpak interessante implementatiemogelijkheden met het gebruik van een verkeersmodel, zoals beschreven in de volgende deelsectie.

5.2.2 Prestatie

We analyseren de prestatie van het algoritme op dezelfde manier als het algoritme in subsectie 3.2.4 dat steunt op detectie van gebruikersactiviteit [33]. We definiëren hiervoor P_{saved} als het bespaarde vermogen door het invoeren van een slaaptoestand. Het verbruik in die slaaptoestand is dan $P_{sleep} = P_{tot} - P_{saved}$. We definiëren ook de gemiddelde arbeidscyclus $\bar{\eta}$ als de fractie van de tijd die de femtocel in actieve toestand doorbrengt. We kunnen dan opnieuw de gemiddelde reductie in het vermogenverbruik van de femtocel Ω uitdrukken als percentage van het totale verbruik:

$$\Omega = \frac{P_{saved}}{P_{tot}} \cdot (1 - \bar{\eta}) \cdot 100 \quad (5.1)$$

Ω drukt dus de gemiddelde procentuele reductie in het vermogenverbruik uit, bewerkstelligd door het algoritme. In de slaaptoestand worden de vermogenversterker (vermogenverbruik van 2.0 W), de RF transmitter (vermogenverbruik van 1.0 W) en verschillende andere niet-essentiële hardwarecomponenten (in formule (5.2) voorgesteld door P_{misc} , voor een totaal van 1.7 W) uitgeschakeld door het femtocelbasisstation [30]. Het bespaarde vermogen *in de femtocel* is dan:

$$P_{saved} = P_{amp} + P_{RF,Tx} + P_{misc} = 2.0W + 1.0W + 1.7W = 4.7W \quad (5.2)$$

Hiermee kunnen we de maximale waarde voor Ω (met een gemiddelde arbeidscyclus van nul) berekenen door de gepaste waarden in te vullen in (5.1):

$$\Omega_{max} = \frac{4.7W}{10.2W} \cdot (1 - 0) \cdot 100 = 46.078\% \quad (5.3)$$

De waarde van 46.078% voor Ω_{max} drukt uit dat de femtocel gemiddeld over een bepaalde tijdsperiode slechts 53.922% van zijn maximaal vermogen verbruikt, in dit geval dus gemiddeld 5.5 W in plaats van de maximale 10.2 W. Dit is theoretisch het laagst mogelijke verbruik van de femtocel voor dit specifieke algoritme. Dit percentage wordt enkel bereikt als de femtocel zich de hele tijd in de slaaptoestand bevindt en dus nooit actief wordt. Wanneer er wel actieve gebruikers zijn, streeft het algoritme naar waarden van Ω die Ω_{max} zo dicht mogelijk benaderen. Realistische waarden van Ω zullen dus steeds kleiner zijn dan Ω_{max} .

Om de gemiddelde arbeidscyclus $\bar{\eta}$ te berekenen, maken we gebruik van een simulatie met het eerder vernoemde verkeersmodel uit Tabel 3.2 (in subsectie 3.2.4), waarbij het

verkeer wordt opgedeeld in verschillende periodes van de dag met variabele belasting. De generatie van gesprekken door een gebruiker wordt gemodelleerd aan de hand van een Poissonproces met een exponentiële interarrivaltijd met gemiddelde λ_{IA} . Het feit dat we de gebruikerskant kunnen modelleren aan de hand van een Poissonproces, maakt een dergelijk verkeersmodel dus uitermate geschikt voor het implementeren van het vermogenreducerend algoritme zoals hierboven beschreven. De duur van een gesprek wordt ook gemodelleerd als exponentieel verdeeld met gemiddelde λ_{CH} .

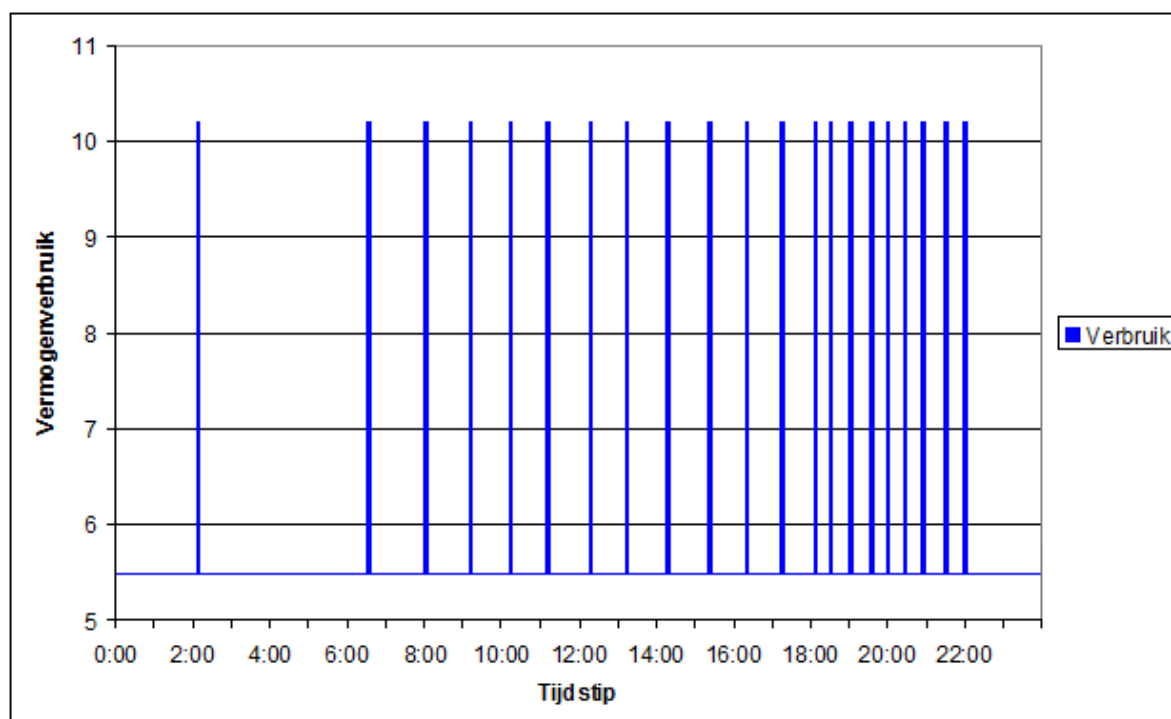
Figuur 5.1 toont een beeld van het vermogenverbruik van een femtocel met één actieve gebruiker gedurende één dag. De gebruiker genereert verkeer volgens een Poissonproces, zoals eerder beschreven. Dit verkeersmodel is ook duidelijk te zien in de figuur: 's nachts zeer weinig verkeer, overdag een middelmatige hoeveelheid verkeer en 's avonds veel verkeer. Bemerkt dat dit verkeersmodel geschikt is wanneer femtocellen in een woonomgeving gemodelleerd worden. Het verkeersmodel van femtocellen in een kantooromgeving zou uiteraard pieken vertonen tijdens de kantooruren en weinig of geen pieken daarbuiten. De grafiek maakt duidelijk dat de femtocel gedurende het grootste deel van de dag in slaaptoestand (laag vermogenverbruik) verkeert, en slechts naar de actieve toestand (hoog vermogenverbruik) overgaat als er effectief gebruikersverkeer is.

Tabel 5.1 toont de simulatieresultaten voor de gemiddelde arbeidscyclus $\bar{\eta}$ en de corresponderende procentuele reductie in vermogenverbruik Ω van de femtocel bij invoeren van een slaaptoestand zoals in het beschreven algoritme. Deze resultaten werden berekend via een opgestelde tool die een dynamische simulatie uitvoert via een verkeersmodel. Figuur 5.2 toont een flowchart van deze tool.

1 gebruiker		2 gebruikers		4 gebruikers	
$\bar{\eta}$	Ω [%]	$\bar{\eta}$	Ω [%]	$\bar{\eta}$	Ω [%]
0.042	44.14	0.082	42.29	0.163	38.54

Tabel 5.1: Gemiddelde arbeidscyclus en vermogenreductie in het geval van één femtocel met één of meerdere gebruikers volgens het opgestelde algoritme.

De resultaten tonen aan dat de femtocel met één actieve gebruiker gemiddeld gedurende iets meer dan één uur per dag verkeer te verwerken krijgt. Gedurende de rest van de dag kan de femtocel in de slaaptoestand verblijven, resulterend in een gemiddelde vermogenbesparing van 44.14%. Wanneer we het geval van vier actieve gebruikers beschouwen, is de femtocel



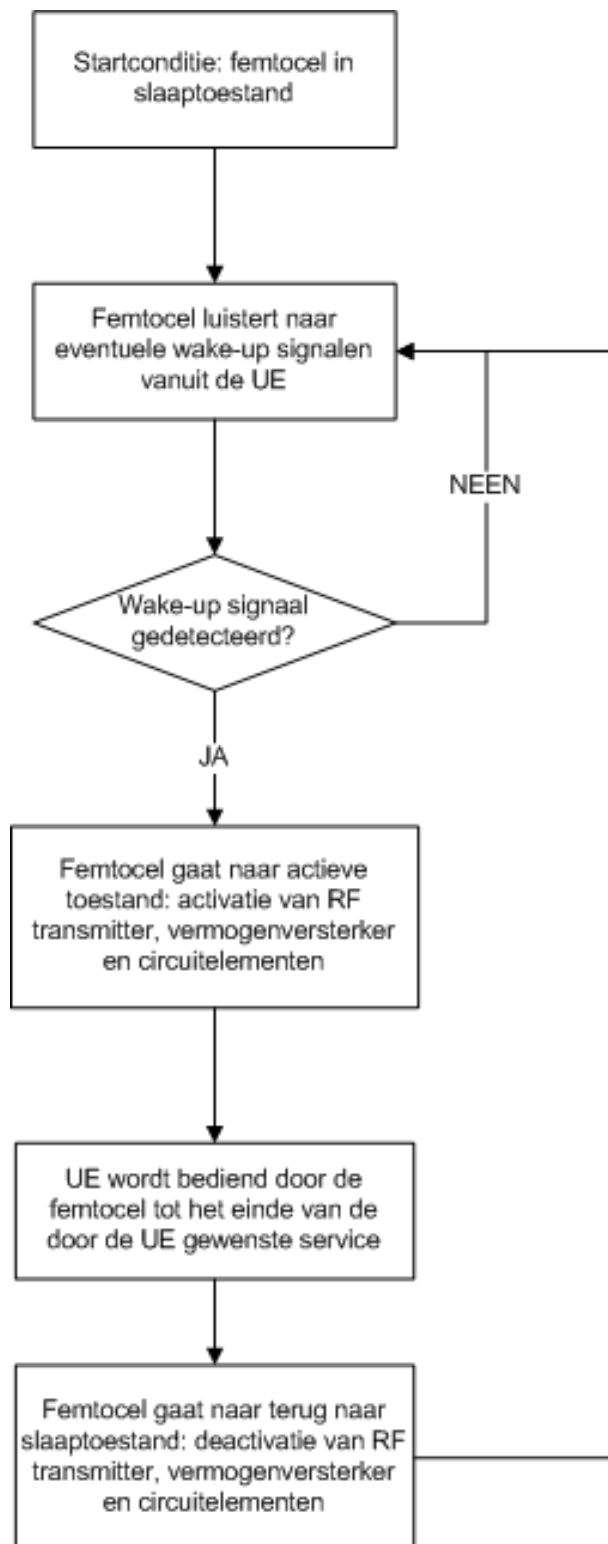
Figuur 5.1: Simulatieresultaat van vermogenverbruik (in W) van een femtocel met verkeer van één gebruiker volgens Poissonproces gedurende één dag.

operationeel voor bijna vier uur per dag, wat een lagere gemiddelde vermogenbesparing van 38.54% met zich meebrengt.

De resultaten van het gebruikte algoritme zijn beter dan de resultaten in Tabel 5.2 van het algoritme dat aan detectie van gebruikersactiviteit doet [33]. Er wordt namelijk voor elk aantal gebruikers een hogere procentuele vermogenreductie bekomen. Om een eerlijke vergelijking te maken tussen beide algoritmes, werd in het gebruikte algoritme ook gewerkt met een waarde van drie minuten voor λ_{CH} voor alle tijdsperiodes (zoals in [33]).

1 gebruiker		2 gebruikers		4 gebruikers	
$\bar{\eta}$	Ω [%]	$\bar{\eta}$	Ω [%]	$\bar{\eta}$	Ω [%]
0.042	39.47	0.076	38.07	0.147	35.13

Tabel 5.2: Gemiddelde arbeidscyclus en vermogenreductie in het geval van één femtocel met één of meerdere gebruikers volgens het algoritme gebaseerd op detectie van gebruikersactiviteit [33].



Figuur 5.2: Flowchart van de tool die het samengestelde vermogenreducerend algoritme implementeert.

Huidige femtocellen ondersteunen twee tot vier actieve gebruikers in een residentiële omgeving en acht tot zestien gebruikers in een kantooromgeving [8]. Tabel 5.3 toont de resultaten van het opgestelde algoritme voor acht en zestien gebruikers. Het is duidelijk dat de femtocel in deze gevallen vanwege het groter aantal gebruikers meer actieve periodes kent. Bijgevolg is de besparing in het vermogenverbruik vrij laag, vooral in het geval van zestien gebruikers: de femtocel is gedurende 19.5 uur per dag actief, resulterend in een gemiddeld vermogenverbruik van 9.3 W. Wetende dat het maximale gemiddelde vermogenverbruik 10.2 W is, presteert dit algoritme met deze instelling van λ_{CH} vooral goed voor acht of minder gebruikers per femtocel.

8 gebruikers		16 gebruikers	
$\bar{\eta}$	Ω [%]	$\bar{\eta}$	Ω [%]
0.362	29.41	0.812	8.68

Tabel 5.3: Gemiddelde arbeidscyclus en vermogenreductie in het geval van één femtocel met acht of zestien gebruikers volgens het gebruikte algoritme.

Wanneer we de gemiddelde gespreksduur λ_{CH} lager instellen dan drie minuten, zullen de actieve periodes korter zijn en dus de reductie in het vermogenverbruik hoger. Tabel 5.4 toont de resultaten wanneer we in het algoritme een gemiddelde gespreksduur van anderhalve minuut veronderstellen. Het algoritme presteert duidelijk beter bij een lagere waarde van λ_{CH} : voor elk aantal gebruikers wordt een aanvaardbare vermogenreductie bekomen. In het geval van één gebruiker wordt zelfs de theoretisch maximale vermogenreductie benaderd tot één procent.

1 gebruiker		2 gebruikers		4 gebruikers		8 gebruikers		16 gebruikers	
$\bar{\eta}$	Ω [%]	$\bar{\eta}$	Ω [%]	$\bar{\eta}$	Ω [%]	$\bar{\eta}$	Ω [%]	$\bar{\eta}$	Ω [%]
0.023	45.04	0.042	44.14	0.087	42.07	0.171	38.22	0.378	28.68

Tabel 5.4: Gemiddelde arbeidscyclus en vermogenreductie in het geval van één femtocel met één of meerdere gebruikers volgens het opgestelde algoritme met λ_{CH} -waarde van anderhalve minuut.

5.3 Femtocelbedekking van een klein gebied

5.3.1 Beschrijving van de tool

In deze sectie stellen we een tool op die de bedekking met femtocellen van een bepaald gebouw of een klein geografisch gebied optimaliseert, gebruik makend van een bepaalde technologie. De werking van de tool is, *mutatis mutandis*, geïnspireerd op de tool in [44] die gebruik maakt van macrocellen om een draadloos toegangsnetwerk te ontwerpen met minimaal vermogenverbruik.

We gebruiken een genetisch algoritme om de optimale configuratie van actieve femtocellen te berekenen. Er wordt een globale fitheidsfunctie gedefinieerd die twee verschillende fitheidsfuncties combineert en waarvan we de fitheidswaarde gebruiken om verschillende mogelijke oplossingen met elkaar te vergelijken en uiteindelijk de beste te selecteren. De eerste fitheidsfunctie behandelt het vermogenverbruik en is als volgt gedefinieerd:

$$f_{\text{vermogen}} = 100 - \left(\frac{P_{\text{opl}}}{P_{\text{max}}} \cdot 100 \right) \quad (5.4)$$

Hierin is P_{opl} het vermogenverbruik van de huidige oplossing en P_{max} het vermogenverbruik van het minst energie-efficiënte femtocelnetwerk voor het doelgebied. P_{max} wordt bepaald door voor elke mogelijke femtocelsite het hoogst mogelijke vermogenverbruik in rekening te brengen. Dit wordt dan gebruikt om te beslissen of de ene oplossing al dan niet beter is dan de andere: een hogere waarde van f_{vermogen} correspondeert met een lager vermogenverbruik en dus met een betere oplossing.

De andere fitheidsfunctie brengt de bedekkingsgraad van het gebied in rekening:

$$f_{\text{bedekking}} = 100 \cdot \frac{S_{\text{doel}} \cap S_{\text{opl}}}{S_{\text{doel}}} \quad (5.5)$$

Hierin is S_{doel} de oppervlakte (in km²) van het doelgebied dat van femtocelbedekking moet voorzien worden en S_{opl} het gebied bedekt door de huidige oplossing. $f_{\text{bedekking}}$ wordt uitgedrukt in procent en geeft aan hoe goed het doelgebied bedekt is door de huidige oplossing (het symbool \cap duidt op de intersectie van beide gebieden). Hoe hoger de waarde van $f_{\text{bedekking}}$, hoe beter de huidige oplossing het doelgebied bedekt.

Zoals eerder vermeld, worden Formules (5.4) en (5.5) samengebracht in de globale fitheidsfunctie f_{totaal} :

$$f_{\text{totaal}} = g(f_{\text{bedekking}}) \cdot f_{\text{vermogen}} + f_{\text{bedekking}} \quad (5.6)$$

met

$$g(f_{\text{bedekking}}) = \begin{cases} 0, & \text{als } f_{\text{bedekking}} < 90 \\ 5 \cdot \frac{f_{\text{bedekking}} - 90}{5}, & \text{als } 90 \leq f_{\text{bedekking}} < 95 \\ 5, & \text{anders} \end{cases} \quad (5.7)$$

Hoe hoger de totale fitheidswaarde f_{totaal} , hoe beter de oplossing. Uit Formule (5.6) blijkt dat de maximale fitheidswaarde 600 is, namelijk wanneer zowel f_{vermogen} als $f_{\text{bedekking}}$ hun maximale waarde van 100% bereiken. Dit soort globale fitheidsfunctie biedt een goede afweging tussen bedekking en vermogenverbruik. Van zodra een bedekking van 90% bereikt wordt, brengen we het vermogenverbruik in rekening. Op deze manier kan gemakkelijk een goede bedekkingsgraad gegarandeerd worden. In die situatie kan het vermogenverbruik geoptimaliseerd worden zonder veel aan bedekking in te leveren. We merken nog op dat de grenzen van 90 en 95 in Formule (5.7) vrij kunnen gekozen worden.

Een genetisch zoekalgoritme wordt mede gekarakteriseerd door zijn mutaties. Het doel van deze mutaties is om vanuit de huidige oplossing nieuwe – hopelijk betere – oplossingen te genereren. In deze simulatietool worden vier verschillende mutaties gedefinieerd:

- Een inactieve femtocel actief maken.
- Een actieve femtocel inactief maken.
- 1 dBm toevoegen aan het ingangsvermogen van de antenne van een actieve femtocel.
- 1 dBm aftrekken van het ingangsvermogen van de antenne van een actieve femtocel.

Welk femtocelbasisstation aangepast wordt en op welke manier dat gebeurt, wordt random bepaald. Het algoritme stopt na een vooraf gespecificeerde tijd of als het ingestelde maximum aantal generaties is bereikt. Er moet uiteraard een afweging gemaakt worden tussen de rekentijd en de kwaliteit van de oplossing: een langere rekentijd zorgt voor een betere oplossing omdat er meer alternatieven overwogen worden.

5.3.2 Toepassing

De ontwikkelde tool ontwerpt een netwerk van femtocellen op basis van een ingelezen bestand (*shapefile*) dat een gebouw of een klein geografisch gebied modelleert. Figuur 5.3 toont de modellering in een shapefile van het gebied dat we met deze tool zullen bedekken met een groen femtocelnetwerk. Daarnaast wordt ook nog een shapefile ingelezen waaruit

de oppervlakte van het doelgebied berekend wordt. In deze file zorgen we ervoor dat er enkel rekening gehouden wordt met indooroppervlakte en worden outdoorgebieden buiten beschouwing gelaten, aangezien femtocellen indoorbedekking voorzien. Figuur 5.4 toont de shapefile waaruit de oppervlakte berekend wordt voor het gebied in Figuur 5.3.



Figuur 5.3: Modelling van een klein gedeelte van Gent in een shapefile. Elke veelhoek stelt een gebouw voor.



Figuur 5.4: Modelling van de indooroppervlakte voor het gebied van Figuur 5.3.

In sectie 2.3 werd reeds vermeld dat een femtocel omnidirectioneel is en in elke richting met dezelfde vermogensterkte kan zenden. Op die manier kan het door de femtocel bedekte gebied grafisch voorgesteld worden met een cirkel.

We gaan uit van de voorwaarde dat het doelgebied van Figuur 5.3 een woonomgeving is en dat gebruikers slechts één femtocel aanschaffen om hun woning van bereik te voorzien.

Deze femtocel wordt door het algoritme in het midden van het gebouw geplaatst: *voor elk gebouw* wordt het zwaartepunt berekend (in drie dimensies) en de femtocel wordt geplaatst in dat zwaartepunt. Mits enkele aanpassingen aan de tool kunnen later, indien gewenst, meerdere femtocellen op verschillende plaatsen in eenzelfde gebouw geplaatst worden.

De technologiespecifieke parameters worden door de tool ingelezen uit een XML-bestand, net als het vermogenverbruik van de verschillende femtocelcomponenten. Via dit laatste bestand kan ook een eenvoudige soort van verkeersmodel gedefinieerd worden door middel van parameters die het belastingspercentage van de femtocel per uur van de dag weergeven. Die parameters worden gebruikt als gewichten om het vermogenverbruik van een femtocel over een specifieke tijdsperiode te berekenen. In onze implementatie staan al deze parameters op 100%, omdat we op het resultaat van de simulatietool een expliciet (complexer) verkeersmodel toepassen om het vermogenverbruik te onderzoeken.

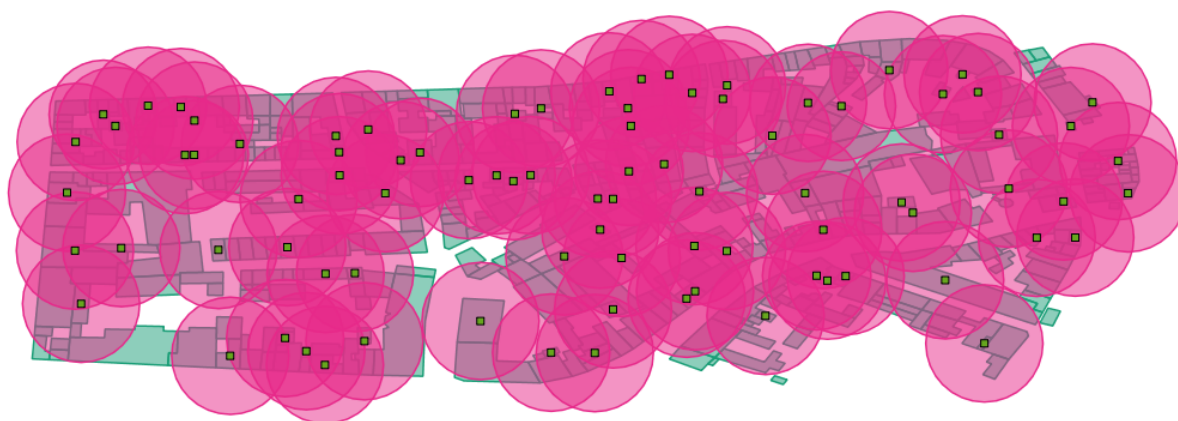
Het te analyseren gebied mag niet te groot zijn, vanwege de rekencomplexiteit die de simulatie met zich meebrengt. Een groot geografisch gebied betekent immers zeer veel mogelijke femtocellocaties die in rekening moeten gebracht worden door het algoritme en dus een beduidend langere rekestijd. Bij een te groot aantal mogelijke femtocelsites komt de tool ook in de problemen wat betreft geheugencapaciteit.

5.3.3 Resultaat

Figuur 5.5 geeft het resultaat van het algoritme weer: het doelgebied van Figuur 5.3 wordt bedekt door een groen femtocelnetwerk met minimaal vermogenverbruik. De punten geven de locaties van de actieve femtocellen weer, de cirkels zijn de gebieden die bedekt worden door de femtocel in het midden van die cirkel. Voor deze berekening werd gebruik gemaakt van de Mobile WiMAX-technologie, omdat deze technologie de hoogste energie-efficiëntie oplevert bij de gebruikte bitrate van ongeveer 5.7 Mbps (zie Figuur 4.1).

Voor deze situatie zijn er 495 mogelijke locaties om een femtocel te plaatsen (de eerder genoemde veronderstelling in acht genomen), waarvan er 86 effectief gebruikt worden. Op die manier wordt met de tool een (*indoor*) bedekkingsgraad van 96.10% gerealiseerd voor het opgegeven gebied. De fitheidswaarde voor het vermogenverbruik bedraagt 82.63%, resulterend in een totale fitheidswaarde van 509.23 (via Formule (5.6)).

Er zijn dus, vanwege het beperkte bereik van een femtocel, relatief veel femtocellen nodig om een gebied voldoende te bedekken. Dit uit zich in de fitheidswaarde van het vermogen-



Figuur 5.5: Resultaat van de simulatietool: femtocelbedekking van het doelgebied van Figuur 5.3.

verbruik, die beduidend lager is dan de fitheidswaarde voor de bedekking. In totaal wordt er dagelijks door het gehele femtocelnetwerk 21052.8 W aan vermogen verbruikt, indien alle femtocellen de hele tijd actief zijn. In de volgende sectie wordt dit verder onderzocht en geoptimaliseerd met het eerder vermelde vermogenreducerend algoritme.

Tabel 5.5 vergelijkt de resultaten van de tool voor verschillende technologieën. In eerste instantie valt het op dat HSPA zeer zwak presteert, zowel op vlak van bedekking als op vlak van vermogenverbruik: er worden maar liefst 484 femtocellen gebruikt. Deze zwakke prestatie van HSPA is vooral te wijten aan het beperkte bereik van deze technologie. Het is duidelijk de Mobile WiMAX de beste prestatie oplevert wat betreft het aantal gebruikte femtocellen (en bijgevolg het vermogenverbruik). LTE bereikt ongeveer dezelfde bedekkingsgraad van het doelgebied, maar doet dit met veel meer femtocellen waardoor de fitheidswaarde van het vermogenverbruik van LTE lager ligt dan bij Mobile WiMAX. De meest efficiënte technologie is in deze situatie dus Mobile WiMAX. We merken nog eens op dat de kwaliteit van de oplossing afhankelijk is van de rekentijd. De resultaten in de tabel werden bekomen met een rekentijd van één uur. Een langere simulatieduur zou eventueel nog iets betere resultaten kunnen opleveren.

	Mobile WiMAX	HSPA	LTE
Totaal vermogenverbruik [kW]	21.05	118.48	34.27
$f_{bedekking}$	96.10	77.79 %	95.73 %
$f_{vermogen}$	82.63	2.22 %	71.72 %
f_{totaal}	509.23	77.79	454.32
Aantal gebruikte femtocellen	86	484	140

Tabel 5.5: Vergelijking van Mobile WiMAX, HSPA en LTE voor de bedekking van het gebied in Figuur 5.3, voor een bandbreedte van 5 MHz en een bitrate van ongeveer 5.7 Mbps.

5.4 Analyse van de simulatiemodellen

Na zowel een statische als een dynamische simulatie uitgewerkt te hebben, kunnen we nu de resultaten van beide methodes combineren en evalueren: we passen de vermogenreducerende techniek van Sectie 5.2 toe op het groene femtocelnetwerk van Figuur 5.5, resulterend uit de simulatietool van Sectie 5.3.

In Sectie 5.2 werd reeds vermeld dat ons vermogenreducerend algoritme in een kantorumgeving aanvaardbare resultaten opleverde tot maximum acht gebruikers per femtocel. We onderzoeken nu de impact van een verkeersmodel op het vermogenverbruik van het volledige groene femtocelnetwerk van Figuur 5.5: hiervoor veronderstellen we dat er voor elke femtocel steeds minstens één en maximum acht gebruikers binnen het bereik van die femtocel aanwezig zijn.

Door middel van een randomgenerator die aan elke femtocel een willekeurig aantal gebruikers tussen één en acht toekent, hebben we 330 gebruikers verdeeld over het gehele femtocelnetwerk. Dit is een gemiddelde van 3.84 gebruikers per femtocel. Wanneer we het dagelijkse vermogenverbruik van elke individuele femtocel optellen, bekomen we een totaal vermogenverbruik van het groene femtocelnetwerk van 12959.8 W. Door gebruik te maken van slaaptoestanden, bespaart het femtocelnetwerk dagelijks dus 8093 W, dit is een reductie van het vermogenverbruik met 38.4%. Zelfs indien we minstens vier gebruikers per femtocel veronderstellen en op deze manier 520 gebruikers verdelen over het groene femtocelnetwerk (gemiddeld 6.05 gebruikers per femtocel), wordt er nog een besparing in het vermogenverbruik van 33.9% bereikt.

Indien we ook femtocellen met meer dan acht gebruikers toelaten, kunnen we opnieuw random aan elke femtocel een willekeurig aantal gebruikers tussen één en zestien toekennen. Als we zo 590 gebruikers verdelen over het femtocelnetwerk (gemiddeld 6.86 gebruikers per femtocel), besparen we nog steeds 30.9% aan vermogen. Wanneer we echter proberen om nog meer femtocelgebruikers toe te laten en simuleren met voor elke femtocel ofwel acht ofwel zestien gebruikers (in totaal 1080, gemiddeld 12.56 per femtocel), bekomen we slechts een besparing van 17.6% die al aan de lage kant is.

Gebruik maken van slaaptoestanden in femtocellen loont dus absoluut de moeite, op voorwaarde dat de gebruikersdichtheid niet te hoog is: meer dan acht gebruikers per femtocel kan nog aanvaardbare resultaten opleveren voor de totale vermogenbesparing in het groene femtocelnetwerk, maar enkel indien er ook voldoende femtocellen met een lager aantal gebruikers zijn.

Hoofdstuk 6

Conclusie en toekomstperspectieven

Femtocellen hebben het potentieel om goedkope kwaliteitsvolle netwerktoegang te bieden aan binnenshuisgebruikers, terwijl tegelijk ook de belasting van het volledige netwerk van de operator gereduceerd wordt. In dit werk hebben we femtocellen gekarakteriseerd. We hebben voor verschillende technologieën het bereik van een femtocel onderzocht in verschillende omgevingen. Daarnaast hebben we een hardwaremodel van een typische femtocel opgesteld en hiervan componentgewijs het vermogenverbruik opgesomd. Door de resultaten van bereik en vermogenverbruik te combineren, konden we de energie-efficiëntie van de verschillende technologieën vergelijken. Uiteindelijk werd een simulatietool ontwikkeld die een klein geografisch gebied bedekt met femtocellen. Dit resultaat hebben we dan gebruikt om de prestatie van een vermogenreducerend algoritme op een dynamische manier te onderzoeken met behulp van een verkeersmodel.

Hoewel femtocellen momenteel aan een steile opmars bezig zijn, zijn er vanuit een technisch oogpunt nog enkele gebieden open voor verder onderzoek in verband met groene femtocelnetwerken. In eerste instantie kan er nog dieper ingegaan worden op interferentie, zowel tussen macrocellen en femtocellen als tussen femtocellen onderling [45]. In een macrocelnetwerk kunnen de RF-signalen van de basisstations qua richting, vermogen en frequentie nauwkeurig op elkaar worden afgestemd. Dit is niet het geval voor femtocelbasisstations, die zelf de radio-omgeving moeten onderzoeken en zich vervolgens instellen om geen verstoring te ondervinden of te veroorzaken.

Beveiliging is een andere uitdaging bij het gebruik van femtocellen. Femtocelbasisstations moeten via een beveiligde breedbandverbinding (geëncrypteerde tunnel) geconnecteerd worden met het onderliggende netwerk van de operator, opdat hackers geen valse femtocel op het netwerk zouden kunnen installeren om op die manier op kosten van een onwetende

reguliere femtocelgebruiker te connecteren met het netwerk. Identificatie en authenticatie van de femtocel bij het netwerk is hierbij vereist.

Als de technische uitdagingen aangepakt worden, kunnen femtocellen een mooie aanvulling vormen op de bestaande middelen (zoals WiFi) om de binnenshuisbedekking te verbeteren.

Net als het onderzoek naar optimalisatie van groene femtocelnetwerken, staat ook het onderzoek naar de hardware van femtocelbasisstations niet stil. Miniaturisatie van femtocellen wordt steeds verder doorgedreven: de toekomst ligt in femtocellen op USB-formaat of zelfs op chipformaat. Ook architecturen met meerdere zend- en ontvangstantennes (Multiple Input Multiple Output) worden momenteel bestudeerd.

Naar aanleiding van het World Mobile Congress in Barcelona heeft Informa Telecoms & Media een studie gepubliceerd waaruit blijkt dat de femtocelmarkt significant zal groeien in de volgende jaren, tot bijna 49 miljoen femtoceltoegangspunten in 2014 en 114 miljoen gebruikers die connecteren met mobiele netwerken met behulp van femtocellen [46]. De toekomst van femtocellen in draadloze netwerken ziet er dus bijzonder rooskleurig uit...

Bijlage A

Technologiespecifieke parameters

Mobile WiMAX

Bandbreedte	1.25 MHz	5 MHz	10 MHz	20 MHz
# gebruikte subcarriers	72	360	720	1440
# totaal subcarriers	128	512	1024	2048

Tabel A.1: Mobile WiMAX: aantal carriers in functie van de bandbreedte.

Modulatie	1/2 QPSK	3/4 QPSK	1/2 16-QAM	3/4 16-QAM	2/3 64-QAM	3/4 64-QAM
Ontvanger-SNR [dB]	6	8.5	11.5	15	19	21
Bitrate [Mbps]	3.8	5.7	7.6	11.5	15.3	17.2

Tabel A.2: Mobile WiMAX: ontvanger-SNR en bitrate in functie van het modulatieschema.

LTE

Bandbreedte	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
# gebruikte subcarriers	76	151	301	601	901	1201
# totaal subcarriers	128	256	512	1024	1536	2048

Tabel A.3: LTE: aantal carriers in functie van de bandbreedte.

Modulatie	1/3 QPSK	1/2 QPSK	2/3 QPSK	1/2 16- QAM	2/3 16- QAM	4/5 16- QAM	1/2 64- QAM	2/3 64- QAM
Ontvanger-SNR	-1.5 dB	3 dB	10.5 dB	14 dB	19 dB	23 dB	23 dB	29.4 dB
Bitrate [Mbps]	2.8	4.2	5.7	8.5	11.3	13.6	12.7	16.9

Tabel A.4: LTE: ontvanger-SNR en bitrate in functie van het modulatieschema.

UMTS

Service	AMR Voice	12.2	PS 64 Data	PS 384 Data
Ontvanger-SNR [dB]	7		5.5	7
Bitrate [Mbps]	1.6		2.0	3.1
Guard period	0.25		0.25	0.25
Target load	0.75		0.75	0.75
# gebruikers	64		16	4
Processing gain [dB]	25		17.8	10
Bandbreedte [MHz]	5			

Tabel A.5: UMTS: karakteristieken.

HSPA

Modulatie	1/3 QPSK	1/2 QPSK	2/3 QPSK	1/2 16- QAM	2/3 16- QAM	1/2 64- QAM	2/3 64- QAM
Ontvanger-SNR	-3.1 dB	0.1 dB	3.4 dB	6 dB	7.1 dB	9.6 dB	15.6 dB
Bitrate [Mbps]	1.3	2.5	3.8	5.6	5.0	7.5	11.3
Guard period	0.25						
Target load	0.875						
# gebruikers	25						
Processing gain	12 dB						
Bandbreedte	5 MHz						

Tabel A.6: HSPA: karakteristieken in functie van het modulatieschema.

Bijlage B

Maximaal padverlies en bereik: uitgebreide resultaten

Mobile WiMAX

Modulatie	1/2 QPSK	3/4 QPSK	1/2 16- QAM	3/4 16- QAM	2/3 64- QAM	3/4 64- QAM
PL_{max}	103.423	100.923	97.923	94.423	90.423	88.423

Tabel B.1: Mobile WiMAX: maximaal padverlies PL_{max} (in dB) in functie van het modulatieschema voor een bandbreedte van 5 MHz.

Modulatie	1/2 QPSK	3/4 QPSK	1/2 16- QAM	3/4 16- QAM	2/3 64- QAM	3/4 64- QAM
Commercieel	159.557	122.823	89.726	62.205	40.927	33.197
Residentieel	53.810	43.810	34.232	25.670	18.475	15.673
Kantoor	41.255	34.052	27.048	20.676	15.210	13.046

Tabel B.2: Mobile WiMAX: bereik (in m) voor verschillende scenario's in functie van het modulatieschema voor een bandbreedte van 5 MHz.

LTE

Modulatie	1/3 QPSK	1/2 QPSK	2/3 QPSK	1/2 16- QAM	2/3 16- QAM	4/5 16- QAM	1/2 64- QAM	2/3 64- QAM
PL_{max}	110.829	106.329	98.829	95.329	90.329	86.329	86.329	79.929

Tabel B.3: LTE: maximaal padverlies PL_{max} (in dB) in functie van het modulatieschema voor een bandbreedte van 5 MHz.

Modulatie	1/3 QPSK	1/2 QPSK	2/3 QPSK	1/2 16- QAM	2/3 16- QAM	4/5 16- QAM	1/2 64- QAM	2/3 64- QAM
Commercieel	334.234	208.692	95.191	65.994	39.105	25.728	25.728	13.168
Residentieel	96.202	66.446	35.860	26.891	17.825	12.829	12.829	7.579
Kantoor	70.953	50.231	28.247	21.593	14.711	10.822	10.822	6.622

Tabel B.4: LTE: bereik (in m) voor verschillende scenario's in functie van het modulatieschema voor een bandbreedte van 5 MHz.

UMTS

Service	AMR 12.2 Voice	PS 64 Data	PS 384 Data
Commercieel	129.977	134.412	95.362
Residentieel	45.803	47.027	35.911
Kantoor	35.495	36.379	28.284

Tabel B.5: UMTS: bereik (in m) voor verschillende scenario's.

HSPA

Modulatie	1/3 QPSK	1/2 QPSK	2/3 QPSK	1/2 16- QAM	2/3 16- QAM	1/2 64- QAM	2/3 64- QAM
PL_{max}	93.252	90.052	86.752	84.152	83.052	80.552	74.552

Tabel B.6: HSPA: maximaal padverlies PL_{max} (in dB) in functie van het modulatieschema voor een bandbreedte van 5 MHz.

Modulatie	1/3 QPSK	1/2 QPSK	2/3 QPSK	1/2 16- QAM	2/3 16- QAM	1/2 64- QAM	2/3 64- QAM
Commercieel	64.482	46.130	32.658	24.877	22.172	17.067	9.108
Residentieel	26.406	20.296	15.472	12.494	11.413	9.292	5.673
Kantoor	21.229	16.606	12.890	10.558	9.703	8.009	5.053

Tabel B.7: HSPA: bereik (in m) voor verschillende scenario's in functie van het modulatieschema voor een bandbreedte van 5 MHz.

Bibliografie

- [1] J. Andrews V. Chandrasekhar and A. Gatherer. Femtocell networks: a survey. *IEEE Communications Magazine*, 46(9):59–67, 2008.
- [2] R.R. Agumamidi. Concept and challenges of femtocells. *EE 497A Fundamentals of Wireless Communications*, 2010.
- [3] Femto forum. <http://www.femtoforum.com/femto/>, April 2011.
- [4] Analysis. Picocells and femtocells: Will indoor base stations transform the telecoms industry? <http://www.analysismason.com/>, April 2011.
- [5] J. Zhang and G. de la Roche. *Femtocells: technologies and deployment*. Wiley, 2009.
- [6] Think femtocell. <http://www.thinkfemtocell.com/>, April 2011.
- [7] Telecom abc. <http://www.telecomABC.nl/>, April 2011.
- [8] Wikipedia. <http://www.wikipedia.org/>, April 2011.
- [9] Rohde & Schwarz. Wimax: General information about the standard 802.16, April 2011. Application Note.
- [10] International telecommunication union. <http://www.itu.int/>, April 2011.
- [11] 3rd Generation Partnership Project. *Technical Specification Group Radio Access Network; UE Radio Transmission and Reception (TDD) (Release 1999)*. TR 25.102 v3.13.0, 3GPP, October 2006.
- [12] Chiphelp. <http://chiphelp.com/2010/11/umts-in-900mhz-band.html>, April 2011.
- [13] Technical overview and performance of hspa and mobile wimax. http://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/hspa_and_mobile_wimax.pdf, Juni 2009.

-
- [14] Lte, an introduction. http://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/lte_overview.pdf, Juni 2009.
- [15] S. Saunders. *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. Wiley, 1999.
- [16] M. Deruyck, W. Vereecken, E. Tanghe, W. Joseph, M. Pickavet, L. Martens, and P. Demeester. Comparison of power consumption of mobile wimax, hspa and lte access networks. *Telecommunication, Media and Internet Techno-Economics, 9th Conference, Proceedings*, 2010.
- [17] E. Tanghe, W. Joseph, L. Verloock, L. Martens, H. Capoen, K. Van Herwegen, and T. Buysschaert. Statistical validation of wlan range calculated with propagation models for industrial environments by chipset-level received signal strength measurements. *IET SCIENCE MEASUREMENT & TECHNOLOGY*, 3(3):244–255, 2009.
- [18] M. Elenjikel, M. Al-Mutairi, N. Shankarappa, and T. Roy. Wimax-femto networks: A comparison with mobile wimax networks with respect to cost of indoor coverage. *Interdisciplinary Telecommunications Program, University of Colorado, Boulder*, 2009.
- [19] 3GPP. Further advancements for e-utra physical layer aspects (release 9). *Technical Report*, 2010.
- [20] Pavel Mach and Zdenek Becvar. Dynamic power control mechanism for femtocells based on the frame utilization. *Wireless and Mobile Communications, International Conference on*, 0:498–503, 2010.
- [21] H. Holma and A. Toskala. *WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE*. Wiley, 2007.
- [22] FemtoForum. *Interference management in UMTS femtocells*. FemtoForum, 2008.
- [23] L.T.W. Ho and H. Claussen. Effects of user-deployed, co-channel femtocells on the call drop probability in a residential scenario. *18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Athens*, pages 1–5, 2007.
- [24] J. Espino and J. Markendahl. Analysis of macro-femtocell interference and implications for spectrum allocation. *Proceedings of the 20th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pages 13–16, 2009.

- [25] V. Erceg, L.J. Greenstein, S.Y. Tjandra, S.R. Parkoff, A. Gupta, B. Kulic, A.A. Julius, and R. Bianchi. An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 17:1205 – 1211, 1999.
- [26] J. Markendahl and Ö. Mäkitalo. A comparative study of deployment options, capacity and cost structure for macrocellular and femtocell networks. *Second IEEE Workshop on Indoor and Outdoor Femto Cells (in conjunction with IEEE PIMRC 2010)*, 2010.
- [27] T.S. Rappaport. *Wireless Communications: Principles & Practice*. Prentice Hall, 2002.
- [28] ITU-R Recommendations. *Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radio communication systems and the radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz*. ITU-R Recommendations, 2001.
- [29] P.C. Lu, K.J. Tsao, C.R. Huang, and T.C. Hou. A suburban femtocell model for evaluating signal quality improvement in wimax networks with femtocell base stations. *WCNC'10*, pages 1–6, 2010.
- [30] I. Ashraf, F. Boccardi, and L. Ho. Power savings in small cell deployments via sleep mode techniques. *Full-Day Workshop on W-GREEN*, pages 306–310, 2010.
- [31] Picochip. <http://www.picochip.com/news/160/>, April 2011.
- [32] R. Abou-Jaoude, M. Dillinger, E. Mohyeldin, J. Luo, W. Koenig, T. Loewel, and C. Hartmann. Optimal hsdpa multi-cell power allocation in a moving hotspot scenario. *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005. PIMRC 2005. IEEE 16th International Symposium on*, 3:1698 – 1702, 2005.
- [33] I. Ashraf, L. Ho, and H. Claussen. Improving energy efficiency of femtocell base stations via user activity detection. *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–5, 2010.
- [34] 2wcl. <http://www.2wcl.com/datasheet/pdf.php?datasheet=pc202>, April 2011.
- [35] B. Fienberg. Xilinx 7 series fpgas slash power consumption by 50 percent and reach 2 million logic cells on industry's first scalable architecture. *Xilinx*, 2010.
- [36] Electronics tech. <http://electronics-tech.com/max2547-femto-base-station-wireless-receiver/>, April 2011.

- [37] Sagem hilo module product synopsis. <http://www.dachs.es/>, April 2011.
- [38] Vodafone sure signal: inside a femtocell. <http://www.zdnet.co.uk/>, April 2011.
- [39] CTBR Staff Writer. Maxim introduces new wcdma band ii and band v femto base-station transceiver chipsets. *Clean Technology Business Review*, 2009.
- [40] New 3g hsdpa femtocell bts. <http://www.3g.co.uk/PR/July2009/New-3G-HSDPA-Femtocell-BTS-3G.html>, April 2011.
- [41] Shaun Cairns. Femtocells combat climate change and reduce the bottom line. *Wilson Street*, 2011.
- [42] Think femtocell: Are femtocells green? <http://www.thinkfemtocell.com/Technology/are-femtocells-green.html>, April 2011.
- [43] Residential femtocells. <http://www.ubiquisys.com/residential-3g-femtocells/>, April 2011.
- [44] M. Deruyck, E. Tanghe, W. Joseph, W. Vereecken, M. Pickavet, B. Dhoedt, and L. Martens. Towards a deployment tool for wireless access networks with minimal power consumption. *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops (PIMRC Workshops), 2010 IEEE 21st International Symposium on*, pages 295–300, 2010.
- [45] Femtocell: de nieuwe hype na wifi? <http://www.verbinding.nl/index.php?D=2&view=1&category=0&id=10>, Mei 2011.
- [46] D. Duffy. Femtocell market set for strong growth in 2011. *Informa Telecoms & Media*, 2010.

Lijst van figuren

1.1	Verbinding van femtocel met cellulair netwerk. [3]	3
1.2	Infrastructuur van een microcelnetwerk. [1]	6
1.3	Vergelijking van het bereik van verschillende celtypes. [5]	7
1.4	Infrastructuur van een femtocelnetwerk. [1]	7
2.1	Bereik van een femtocel per technologie (in kantooromgeving).	27
3.1	Typisch hardwaremodel voor een femtocelbasisstation. [30]	29
3.2	De Picochip PC333 femtocel-on-chip. [31]	30
3.3	Binnenkant van de Vodafone Sure Signal femtocel. [38]	33
3.4	Voorbeelden van gecommmercialiseerde femtocellen.	34
3.5	Detectie van gebruikersactiviteit door de femtocel. [33]	38
3.6	Flowchart van het algoritme op basis van detectie van gebruikersactiviteit. [33]	39
4.1	Energie-efficiëntie van verschillende technologieën in functie van de bitrate in een kantoorscenario.	42
5.1	Simulatieresultaat van vermogenverbruik (in W) van een femtocel met ver- keer van één gebruiker volgens Poissonproces gedurende één dag.	47
5.2	Flowchart van de tool die het samengestelde vermogenreducerend algoritme implementeert.	48
5.3	Modellering van een klein gedeelte van Gent in een shapefile. Elke veelhoek stelt een gebouw voor.	52
5.4	Modellering van de indooroppervlakte voor het gebied van Figuur 5.3.	52
5.5	Resultaat van de simulatietool: femtocelbedekking van het doelgebied van Figuur 5.3.	54

Lijst van tabellen

2.1	Gebruikte parameters in de formules voor berekening van het maximale padverlies.	13
2.2	Gebruikte macrocelparameters voor berekening van het maximale padverlies. [16]	15
2.3	Maximaal padverlies PL_{max} met eenvoudige formule en macrocelparameters.	15
2.4	Maximaal padverlies PL_{max} met complexe formules en macrocelparameters.	17
2.5	Gebruikte femtocelparameters voor berekening van het maximale padverlies.	19
2.6	Maximaal padverlies PL_{max} met complexe formules en femtocelparameters voor Mobile WiMAX, HSPA en LTE.	20
2.7	Maximaal padverlies PL_{max} met complexe formules en femtocelparameters voor UMTS.	21
2.8	Parameters van ITU-R P.1238 model in femtocelscenario.	24
2.9	Bereik van Mobile WiMAX, HSPA en LTE in functie van het scenario. . .	26
2.10	Bereik van UMTS in functie van het scenario.	26
3.1	Vermogenverbruik van componenten van theoretisch hardwaremodel. [30] .	32
3.2	Gebruikte verkeersmodel in simulaties.	40
5.1	Gemiddelde arbeidscyclus en vermogenreductie in het geval van één femtocel met één of meerdere gebruikers volgens het opgestelde algoritme.	46
5.2	Gemiddelde arbeidscyclus en vermogenreductie in het geval van één femtocel met één of meerdere gebruikers volgens het algoritme gebaseerd op detectie van gebruikersactiviteit [33].	47
5.3	Gemiddelde arbeidscyclus en vermogenreductie in het geval van één femtocel met acht of zestien gebruikers volgens het gebruikte algoritme.	49
5.4	Gemiddelde arbeidscyclus en vermogenreductie in het geval van één femtocel met één of meerdere gebruikers volgens het opgestelde algoritme met λ_{CH} -waarde van anderhalve minuut.	49

5.5	Vergelijking van Mobile WiMAX, HSPA en LTE voor de bedekking van het gebied in Figuur 5.3, voor een bandbreedte van 5 MHz en een bitrate van ongeveer 5.7 Mbps.	55
A.1	Mobile WiMAX: aantal carriers in functie van de bandbreedte.	59
A.2	Mobile WiMAX: ontvanger-SNR en bitrate in functie van het modulatieschema.	59
A.3	LTE: aantal carriers in functie van de bandbreedte.	59
A.4	LTE: ontvanger-SNR en bitrate in functie van het modulatieschema.	60
A.5	UMTS: karakteristieken.	60
A.6	HSPA: karakteristieken in functie van het modulatieschema.	61
B.1	Mobile WiMAX: maximaal padverlies PL_{max} (in dB) in functie van het modulatieschema voor een bandbreedte van 5 MHz.	62
B.2	Mobile WiMAX: bereik (in m) voor verschillende scenario's in functie van het modulatieschema voor een bandbreedte van 5 MHz.	62
B.3	LTE: maximaal padverlies PL_{max} (in dB) in functie van het modulatieschema voor een bandbreedte van 5 MHz.	63
B.4	LTE: bereik (in m) voor verschillende scenario's in functie van het modulatieschema voor een bandbreedte van 5 MHz.	63
B.5	UMTS: bereik (in m) voor verschillende scenario's.	63
B.6	HSPA: maximaal padverlies PL_{max} (in dB) in functie van het modulatieschema voor een bandbreedte van 5 MHz.	64
B.7	HSPA: bereik (in m) voor verschillende scenario's in functie van het modulatieschema voor een bandbreedte van 5 MHz.	64

