



Technische
Universität
Braunschweig



Institut für Nachrichtentechnik

Funknetzplanung für LTE

Nachrichtentechnisches Praktikum

Institut für Nachrichtentechnik
Technische Universität Braunschweig

Dennis M. Rose

Johannes Baumgarten

19.11.2014

Version 1.0

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
1. Einleitung	5
2. Grundlagen	7
2.1. Versorgung und Interferenz	7
2.2. Planung eines Mobilfunknetzes	8
2.3. Anforderungsdefinition	9
2.3.1. Systemkenngrößen	9
2.3.2. Aufstellen einer Linkbilanz	14
2.3.3. Abschätzung der erforderlichen Anzahl an Standorten	14
2.4. Versorgungsplanung	16
2.4.1. Erweitertes Okumura-Hata Modell	16
2.4.2. Berücksichtigung von Geo-Daten	18
2.4.3. Beugung an topografischen Hindernissen	19
2.4.4. Effektive Antennenhöhe	19
2.5. Kapazitätsplanung für Long Term Evolution (LTE)	20
2.5.1. Effizientere Nutzung des Spektrums	20
2.5.2. Nutzung von Referenzsignalen (RSRP, SINR)	20
2.5.3. Maximal erzielbare Datenrate	21
2.5.4. Verkehrsabschätzungen für LTE	22
2.6. Parameterplanung	23
2.6.1. Handover-Konfiguration	23
2.7. Netzoptimierung	25
3. Hausaufgaben	27
3.1. Kurzfragen	27
3.2. Aufgaben	28
3.2.1. Ausbreitungsdämpfung berechnen	28
3.2.2. Downlink Linkbilanz aufstellen	28
3.2.3. Zellgrößen ermitteln	29
3.2.4. Versorgungsplanung	29
3.2.5. Kapazitätsplanung	29
4. Versuchsaufbau	31
4.1. Hauptfenster	31
4.2. Kartenansichten	32

4.2.1. Topografie	32
4.2.2. Landnutzung	32
4.2.3. Intensitätskarte	33
4.2.4. RSRP-Karte	33
4.2.5. Versorgungskarte	34
4.2.6. Best-Server-Karte	34
4.2.7. SINR-Karte	35
4.2.8. Maximale Datenrate	35
4.2.9. Zelllasten	36
4.3. Virtuelle Messfahrten und Detail-Informationen	36
5. Versuchsdurchführung	39
5.1. Konfigurationen mit einer eNodeB	39
5.1.1. Erster Versuch	39
5.1.2. Höherer Standort	40
5.1.3. Niedrigere Frequenz	41
5.2. Konfigurationen mit zwei eNodeBs	41
5.2.1. Zwei Standorte	41
5.2.2. Antennen-Tilt und Antennen-Typ	42
5.2.3. Sendeleistung	43
5.3. HO-Betrachtungen anhand einer virtuellen Messfahrt	43
5.4. Optimierung einer bestehenden Netzkonfiguration	44
Literaturverzeichnis	47

1. Einleitung

In den letzten Jahren sind die Ansprüche der Mobilfunknutzer hinsichtlich der erforderlichen Datenraten immens gestiegen. Ermöglicht wurde dies auf Kundenseite durch immer leistungsfähigere Endgeräte. Gleichzeitig muss jedoch auch das Mobilfunknetz hinsichtlich Technologie und Kapazität den Ansprüchen gerecht werden. Netzbetreiber müssen deshalb ihre Netze kontinuierlich optimieren und erweitern. Eine wesentliche Schwierigkeit hierbei ist jedoch, dass der Ausbau eines Netzes nur schlecht im Trial- and Error-Verfahren erfolgen kann, da dies zum einen sehr zeitaufwendig wäre und zum anderen sich auch äußert kostspielig gestalten würde. Als einzige Option bietet sich daher eine rechnergestützte Planung, sprich Simulation. Zu diesem Zweck werden Sie im vorliegenden Praktikumsversuch einen ersten Einblick in den Planungsablauf erhalten und grundlegende Vorgehensweisen zur Konzeption und Konfiguration von Mobilfunknetzen vermittelt bekommen.

Zu Beginn werden theoretische Grundlagen aus den Bereichen Mobilfunk und Funknetzplanung beschrieben. Hierzu gibt es eine Hausaufgabe, die die relevanten Aspekte vertiefen soll. Vor Beginn der Rechnerübung werden Sie in einem kurzen Kolloquium durch den Betreuer hierüber abgefragt.

Die praktische Versuchsdurchführung erfolgt anschließend mithilfe eines Simulators, der eine Ein- und Ausgabe von Planungsparametern und die Simulation verschiedener Netzkonfigurationen anhand gängiger Algorithmen ermöglicht.

Aus Gründen der Komplexität wird sich in diesem Praktikum auf den derzeit aktuellen Mobilfunkstandard, nämlich Long Term Evolution (LTE), beschränkt. Viele der Planungsschritte sind aber auch auf die älteren Mobilfunkstandards übertragbar.

2. Grundlagen

Unter dem Begriff Mobilfunk werden Telekommunikationssysteme zusammengefasst, die eine kabellose Signalübertragung und somit eine Mobilität der Teilnehmer ermöglichen. Als Folge der Mobilität unterliegen die Verbindungen kontinuierlichen Veränderungen der Kanaleigenschaften. Um eine flächendeckende Versorgung sicherzustellen, muss diese Problematik sowohl bei der Planung als auch während des Betriebs eines Mobilfunknetzes berücksichtigt werden.

Da die für den Mobilfunk verfügbaren Funkfrequenzen eine knappe und durch behördliche Stellen regulierte Ressource sind, hat jeder Mobilfunknetzprovider nur ein begrenztes, aber exklusives Spektrum um in seinem Funknetz Dienste bereitzustellen. Hierbei unterscheidet sich der Mobilfunk ganz wesentlich von Rundfunksystemen, wie Fernsehen oder Radio (*Broadcast*), da zum einen ein Rückkanal für Übertragungen vom Mobilgerät zur Basisstation existiert und zum anderen individuelle Inhalte an einzelne Mobilgeräte übertragen werden (*Unicast*). Eine wesentliche Folge ist, dass Mobilfunknetze in kleine Bereiche, sog. Zellen, unterteilt werden, um die Aussendung von Unicasts räumlich zu begrenzen. Hierzu werden üblicherweise am Antennenträger einer Basisstation die Antennen von mehreren Funkzellen angebracht. Abbildung 2.1 zeigt das Prinzip einer solchen zellularen Netzstruktur, die hier der Einfachheit halber als hexagonale Struktur gezeigt wird.

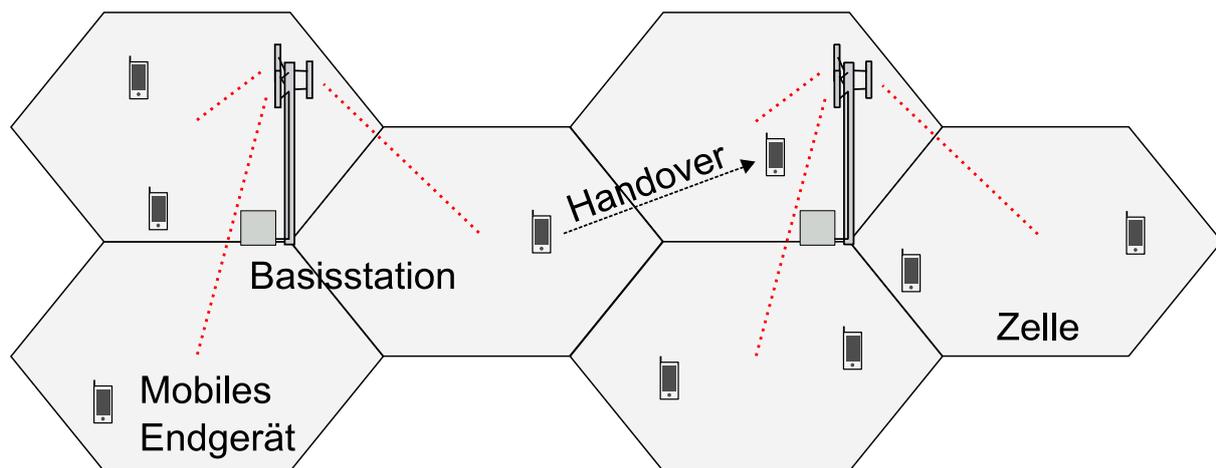


Abbildung 2.1: Zellularer Aufbau eines Mobilfunknetzes

Über die jeweiligen Basisstationen werden die mobilen Endgeräte mit dem Mobilfunknetz verbunden. Bewegt sich ein Nutzer aus einer Funkzelle in eine benachbarte, wird die Verbindung durch das Mobilfunknetz unterbrechungsfrei an die entsprechende Basisstation der neuen Funkzelle weitergeleitet. Dieser Prozess wird als *Handover* bezeichnet.

2.1. Versorgung und Interferenz

Im Mobilfunk wird ein Bereich, in dem eine Verbindung zur Basisstation aufgebaut werden kann, als versorgt bezeichnet. Um flächendeckend Mobilfunk zu ermöglichen, muss ein Mobilfunknetz so geplant werden, dass die Versorgung nahtlos gewährleistet ist und Handover möglich sind.

Signale von benachbarten Funkzellen, die im gleichen Frequenzbereich senden, überlagern sich und stören so den Empfang des Signals der versorgenden Zelle. Dieser Effekt wird als *Interferenz* bezeichnet und ist ein wesentlicher Einflussfaktor für die Definition der Versorgung. Ein Gebiet wird als

versorgt bezeichnet, wenn die von der versorgenden Zelle empfangene Leistung P_S am Empfänger oberhalb der minimal erkennbaren Signalleistung des Mobilteils $P_{E,min}$ liegt:

$$P_S > P_{E,min} \quad (2.1)$$

$P_{E,min}$ wird daher auch als *Empfängerempfindlichkeit* bezeichnet. Zusätzlich muss die empfangene Leistung der versorgenden Zelle um einen bestimmten Wert größer als die Leistung der Interferenz P_I sein, damit das empfangene Signal decodiert werden kann:

$$\frac{P_S}{P_I} > SIR_{min} \quad (2.2)$$

SIR_{min} (engl.: Signal-to-Interference Ratio) gibt dabei das minimale Verhältnis der beiden Leistungen an um das Signal zu decodieren. Da sich die empfangenen Leistungen, sowohl der versorgenden Zelle als auch der Interferenz, über einen sehr großen Wertebereich erstrecken können, wird ihr Verhältnis üblicherweise im logarithmischen Maßstab in der Einheit *Dezibel [dB]* angegeben. Um für den hier betrachteten Mobilfunkstandard *Long Term Evolution (LTE)* das Empfangssignal noch decodieren zu können, wird $SIR_{min} = -6,5dB$ benötigt. Somit lässt sich der versorgte Bereich durch die beiden oben eingeführten Schwellen zur empfangenen Leistung und Interferenz definieren, die entsprechend dem gesamten folgenden Planungsprozess zugrunde liegen.

2.2. Planung eines Mobilfunknetzes

Die Planung eines zellularen Funknetzes kann in die folgenden Abschnitte untergliedert werden:

1. Anforderungsdefinition
2. Versorgungsplanung
3. Kapazitätsplanung
4. Parameterplanung
5. Optimierung

Bei der Anforderungsdefinition werden die Anforderungen, die das zu planende Mobilfunknetz erfüllen soll, vorgegeben. Sie umfassen den geografischen Bereich sowie die angestrebte Dienstgüte und die Anzahl an zu versorgenden Nutzern pro Fläche. Die Anforderungen werden anschließend in der Versorgungsplanung in eine Menge an minimal benötigten Standorten umgesetzt, um eine Versorgung der Nutzer im Planungsgebiet zu gewährleisten. Die Kapazitätsplanung verdichtet das so entstandene Netz durch eine Kombination aus zusätzlichen Standorten und/oder mehr Systemtechnik auf bestehenden Standorten, um in den einzelnen Funkzellen ausreichend Kapazität für die erwartete Menge an Nutzern vorzuhalten.

Auf diesem Stand wäre das geplante Funknetz prinzipiell schon einsatzbereit. Allerdings müssen viele standortspezifische Netzparameter noch angepasst werden, um die Gegebenheiten der Umwelt zu berücksichtigen. So müssen zum Beispiel die Handover-Parameter an die durchschnittlichen Geschwindigkeiten der Nutzer einer Zelle angepasst werden, damit die Verbindung zwischen einem Nutzer und der Basisstation rechtzeitig an die Nachbarzelle übergeben wird.

Die Optimierung ist ein kontinuierlicher Prozess, der die Parameter des Netzes im laufenden Betrieb an sich ändernde Bedingungen anpasst. So erfordert z. B. ein neues Bürogebäude oder eine Großveranstaltung mit großen Menschenmengen die Anpassung der bestehenden Konfiguration.

2.3. Anforderungsdefinition

Bei der Anforderungsdefinition muss der zu versorgende Bereich, die zu erreichende Dienstgüte sowie die bedienbare Menge an Nutzern pro Fläche definiert werden. Als Anforderung für die Güte wird üblicherweise eine Sprachverbindung eines Nutzers am Zellrand angenommen, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, der sogenannten „Versorgungswahrscheinlichkeit“, empfang- und decodierbar sein soll. In der Praxis wird ein Mobilfunknetz für Versorgungswahrscheinlichkeiten zwischen 80 % und 98 % ausgelegt. Eine höhere Versorgungswahrscheinlichkeit ist hierbei gleichbedeutend mit höheren Sicherheitsreserven in der Planung, gleichbedeutend mit einem dichteren Netz und mehr Standorten, was die Kosten für Aufbau und Betrieb entsprechend erhöht. Die Menge an zu versorgenden Nutzern pro Fläche wird aus Messungen des bestehenden Netzes und aus Schätzungen zur Entwicklung des Mobilfunkverkehrs bestimmt.

Sind die Anforderungen definiert, wird auf Basis der im nächsten Abschnitt vorgestellten Systemkenngrößen eine erste Abschätzung über die benötigte Menge an Standorten und Systemtechnik vorgenommen.

2.3.1. Systemkenngrößen

Für die Planung eines zellularen Mobilfunksystems gibt es viele Parameter, die bei der Planung berücksichtigt werden müssen. Abbildung 2.2 zeigt schematisch ein typisches Funksystem einer Funkzelle mit einer kleinen Auswahl wichtiger Parameter.

Sowohl Basisstation (BS) als auch das mobile Endgerät (auch Mobilstation, MS) sind gleichermaßen Sender und Empfänger. Als logische Folge gibt es zwei Übertragungsrichtungen. Die Übertragungsrichtung von BS zu MS wird als *Downlink* bezeichnet, der umgekehrte Weg als *Uplink*. In der Versorgungsplanung werden für beide Fälle Berechnungen erstellt um die maximale, unterstützte Entfernung zwischen BS und MS und damit die Größe der Funkzelle zu bestimmen. Durch die reziproken Ausbreitungsbedingungen im Funkkanal weichen die Berechnungen jedoch nur bei einigen systemtechnischen Werten voneinander ab.

Die Entfernung zwischen BS und MS auf Bodenniveau wird als Abstand r bezeichnet. Die Definition und der Einfluss der weiteren Parameter werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

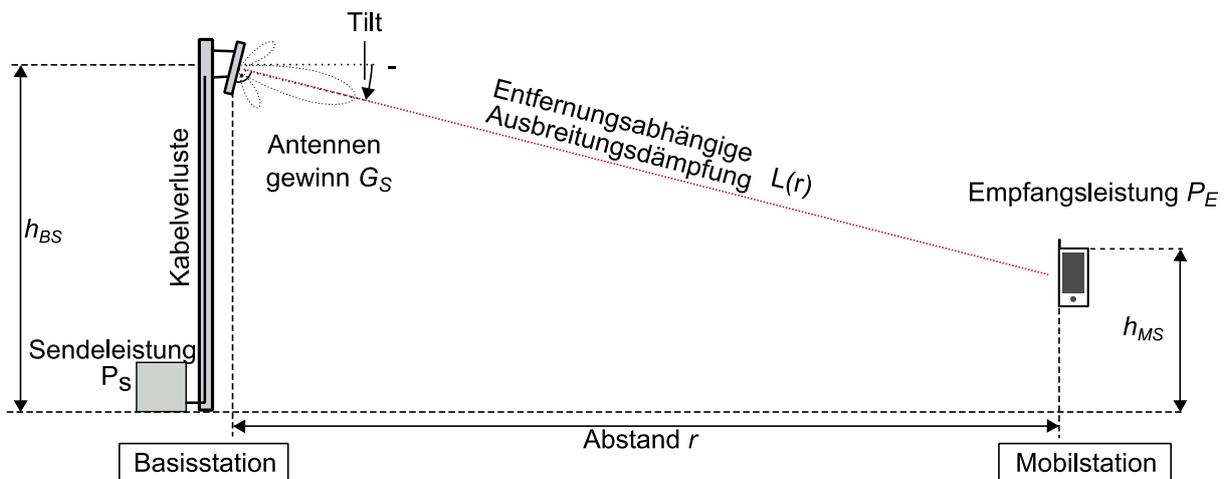


Abbildung 2.2: Parameter des Funksystems und der Systemtechnik

Antennenhöhen h_{BS} und h_{MS}

Die Höhe der Basisstationsantenne über dem Erdboden h_{BS} hat direkten Einfluss auf die direkte Sichtlinie zu Empfangspunkten im Versorgungsgebiet. Ein hoher Antennenstandort ist potenziell von mehr Teilnehmern direkt zu sehen (Line of Sight, LOS) und bietet daher bessere Bedingungen für die Wellenausbreitung. Generell gilt dies für die Mobilstation in gleicher Weise, allerdings befinden sich Mobilgeräte typischerweise am Körper oder am Kopf einer Person, sodass in der Regel eine Höhe h_{MS} von 1,00 m bzw. 1,50 m angenommen wird. Anmerkung: Personen in Gebäuden werden bei dieser ersten Betrachtung nicht berücksichtigt.

Antennentyp

Die im Mobilfunk typischerweise verwendeten Antennen haben häufig eine starke Richtwirkung, die durch eine spezielle Anordnung von mehreren Dipolantennen vor einem Reflektor erzielt wird. Die Richtwirkung dieser so entstehenden Antenne beschreibt, wie stark die von der Antenne ausgesendete oder empfangene Leistung in einer bestimmten Richtung gebündelt ist. Der Öffnungswinkel der Antenne wird durch die 3dB-Grenzen beschrieben, also dem Winkel, bei dem die in Hauptstrahlrichtung (0°) abgestrahlte Leistung auf die Hälfte des Maximums abgefallen ist. Abbildung 2.3 zeigt ein exemplarisches Antennendiagramm mit einem horizontalen Öffnungswinkel von 65° und einem vertikalen Öffnungswinkel von 10° .

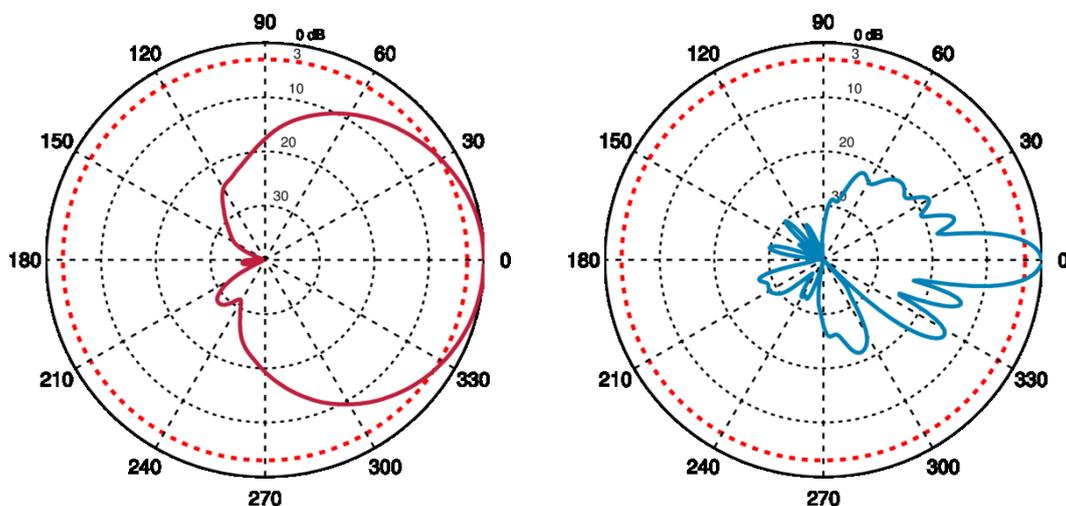


Abbildung 2.3: Richtcharakteristik einer Kathrein 80010682 Mobilfunkantenne. Links: horizontal. Rechts: vertikal.

Gerichtete Antennen werden in erster Linie dazu eingesetzt, um den Bereich einer Funkzelle zu begrenzen/verkleinern und gleichzeitig die Empfangsleistung innerhalb des Bereichs zu erhöhen, aber die Störungen für andere Funkzellen zu reduzieren. Ein in der Praxis häufig anzutreffender horizontaler Öffnungswinkel beträgt 65° , was zu einer 3-fach Sektorisierung passt, wie im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

Sektorisierung und Azimut

Bei der Verwendung von mehreren Richtantennen an einer gemeinsamen Basisstation spricht man von einer Sektorisierung (Abbildung 2.4). Jeder Sektor strahlt dann eine, oder ggf. mehrere, eigene Funkzellen ab. Durch die Sektorisierung kann das Funkfeld gezielter gestaltet werden, als dies bei der Verwendung einer omni-direktionalen Antenne möglich wäre, z. B. um Interferenzen durch Nachbarzellen zu reduzieren. Die Aufteilung in mehrere Sektoren ist außerdem eine verhältnismäßig günstige Möglichkeit, die Anzahl der Zellen und damit die Gesamtkapazität eines Netzes zu erhöhen, ohne zusätzliche Standorte zu benötigen.

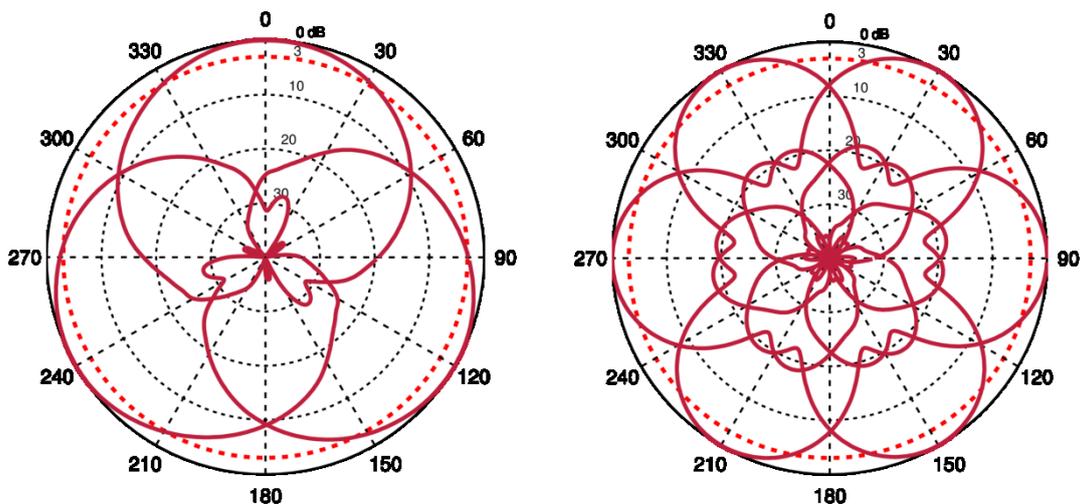


Abbildung 2.4: Typische Sektorisierungen. Links: 3-fach (Kathrein 80010682). Rechts: 6-fach (Kathrein 742351).

Die horizontale Ausrichtung einer Antenne wird durch den Azimut-Winkel beschrieben, der ausgehend von Norden (0°) im Uhrzeigersinn angegeben wird. Wie auch beim Tilt hat eine Änderung des Azimuts einen direkten Einfluss auf die Versorgung und Ausprägung der Zellüberlappung (Interferenzen) zur Folge.

Sendeleistung P_S

Die Sendeleistung P_S wird üblicherweise in der Einheit Dezibel bezogen auf 1 mW [dBm] angegeben. Die Darstellung von Leistungen als logarithmisches Verhältnis wird im Mobilfunk genutzt, da die resultierenden Werte mehrere Größenordnungen überspannen können (siehe Gleichung 2.3). Typische Werte für die maximale Sendeleistung am Antenneneingang einer LTE-Basisstation liegen zwischen 40 und 46 dBm. Eine Reduzierung der Sendeleistung kann zu weniger Zellüberlappungen und demzufolge zu einer geringeren Interferenz führen.

$$P_S [\text{dBm}] = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_S [\text{W}]}{1 \text{ mW}} \right) \quad (2.3)$$

Eine typische Sendeleistung für eine LTE-Basisstation bei 5 MHz Bandbreite beträgt 43 dBm, bei Bandbreiten von 10 MHz und mehr 46 dBm.

Antennengewinn G_S

Eine typische Angabe um eine Antenne zu charakterisieren ist der Antennengewinn in Hauptstrahlrichtung. Der Gewinn G_S in dBi gibt dabei das Verhältnis der gerichteten Abstrahlintensität in Hauptstrahlrichtung zu einer isotropen, also einer gleichmäßig in alle Richtungen abstrahlenden, Antenne an. Dies wird durch den Zusatz i bei dBi gekennzeichnet. Diese ideale Antenne ohne jede Richtwirkung, die in der Praxis nicht existiert, hätte einen Antennengewinn von 0 dBi.

Durch die Bündelung der Abstrahlung wird in der damit ausgeleuchteten Fläche eine höhere Empfangsleistung erzielt, als dies mit der isotropen Antenne möglich wäre. Für die in diesem Praktikum eingesetzten Antennen, ergeben sich folgende Gewinne:

- Kathrein 80010306 bei 800 MHz: 17,25 dBi
- Kathrein 80010682 bei 1800 MHz: 15,67 dBi
- Kathrein 742351 bei 1800 MHz: 20,2 dBi

Die im mobilen Endgerät eingesetzten Antennen sind ebenfalls gerichtet. Da aufgrund der Mobilität und der Vielzahl unterschiedlicher Geräte die Ausrichtung zur Basisstation allerdings beliebig sein kann, werden sowohl der Antennengewinn als auch das Antennendiagramm in der Regel nicht bei Prädiktionen berücksichtigt.

Elektrischer und mechanischer Tilt

Durch vertikale Neigung der Antenne (*Tilt*, häufig auch *Down-Tilt* genannt) kann die maximale Reichweite reduziert werden. Die Neigung einer Antenne ist dann sinnvoll, wenn eine zu große Reichweite zur Störung anderer Zellen führen würde. Die Überlappungsfläche zwischen den Zellen wird somit reduziert und das Interferenzniveau gesenkt. Es wird zwischen mechanischem und elektrischem Tilt unterschieden. Bei ersterem wird die Antenne als solche geneigt, bei letzterem wird das Abstrahlverhalten durch Anpassung der Phasenlage der Elemente im Antennenarray gesteuert. Beide Verfahren haben einen im Wesentlichen ähnlichen Effekt. Abbildung 2.5 zeigt schematisch, wie eine nicht getiltete Antenne (0°) sowie eine übertrieben stark getiltete Antenne sich hinsichtlich ihrer ausgeleuchteten Fläche unterscheiden.

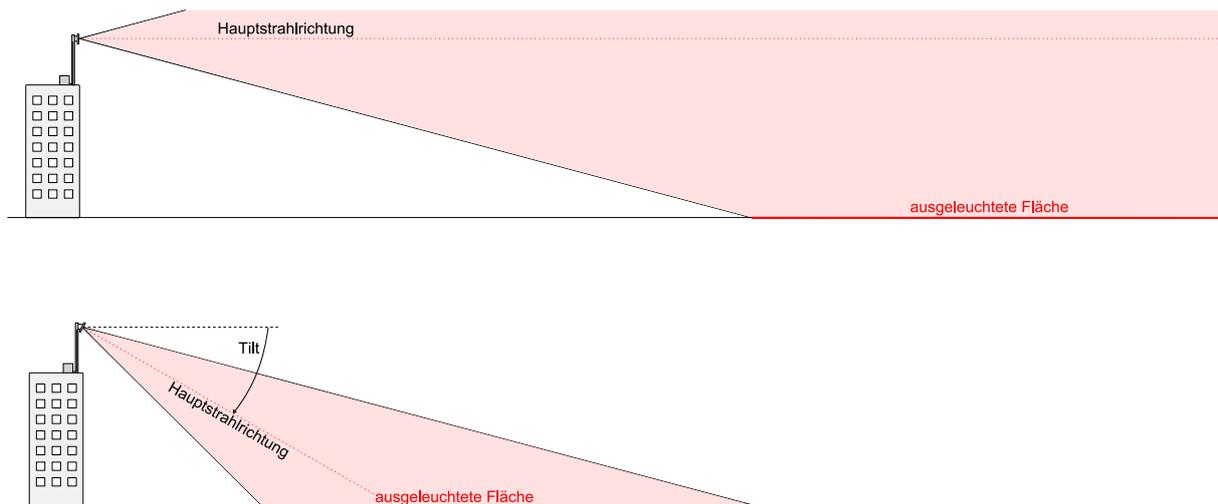


Abbildung 2.5: Funkfeldabdeckung ohne und mit Antennenneigung (Tilt)

Anmerkung: diese Darstellung ist hochgradig vereinfacht. Streng genommen strahlen beide Antennen in die gesamte Fläche. Die Antennendiagramme haben jedoch für unterschiedliche Winkel unterschiedliche Gewinne bzw. Verluste und verstärken bzw. schwächen das abgestrahlte Signal in der jeweiligen Richtung.

Kabelverluste

Zwischen dem „Sender“ in einer Basisstation und der eigentlichen Antenne ist meist noch ein zusätzlicher Dämpfungsanteil durch die Kabel zu berücksichtigen, d. h. ein Verlust an Leistung auf dem Weg zur Antenne. Die Verluste sind dabei abhängig von der Frequenz des zu übertragenden Signals und der Länge des Kabels. Für typische Anbindungsängen ergeben sich nach [1] Verluste von 2,5 dB bei 800 MHz und 3,4 dB bei 1800 MHz. Deshalb wird die Sendeeinheit der Basisstation so nah wie möglich an die Antenne gebracht. Neuste Antennen-Entwicklungen haben teilweise sogar bereits die Sendeeinheit in der Antenne integriert und werden über Glasfaserleitungen digital angesteuert.

Empfangsleistung P_E und entfernungsabhängige Dämpfung $L(r)$

P_E gibt die vom Endgerät erfasste Empfangsleistung in dBm an. Diese Größe ist für die meisten Untersuchungen im Netz von höchster Bedeutung, da sich direkt wesentliche Eigenschaften der Versorgung ablesen lassen. Ist die Empfangsleistung beispielsweise unterhalb der minimal benötigten Empfangsleistung am Empfänger (*Empfängerempfindlichkeit*), ist kein Empfang möglich. Die Empfangsleistung bildet darüber hinaus die Grundlage für viele weitere Kenngrößen, wie die RSRP (*Reference-Signal-Received-Power*) und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (engl.: *Signal-to-Noise-Ratio* (SNR)). Die Empfangsleistung P_E an der jeweiligen Position berechnet sich dabei als:

$$P_E = P_S + G_S - L(r) \quad (2.4)$$

Die entfernungsabhängige Dämpfung $L(r)$ wird in Kapitel 2.4 näher beschrieben.

2.3.2. Aufstellen einer Linkbilanz

Durch die Linkbilanz kann die Abhängigkeit der Empfangsleistung P_E von den Kenngrößen der Systemtechnik, der Ausbreitungsdämpfung L_F und zusätzlicher Sicherheitsreserven beschrieben werden. Der Einfachheit halber wird in diesem Skript nur auf die Linkbilanz im Downlink eingegangen; in der Praxis würden jeweils für Downlink und Uplink getrennte Linkbilanzen aufgestellt werden.

In Tabelle 2.1 ist beispielhaft eine Linkbilanz für ein Mobilfunksystem der 4. Generation mit *Long Term Evolution (LTE)* und 10 MHz Bandbreite bei 1800 MHz aufgestellt.

	Komponente	Bezeichnung	Größe	Einheit
	Sendeleistung der Basisstation	$P_{S,max}$	46,00	dBm
+	Sendeantennengewinn	G_S	15,67	dB
-	Kabelverluste		3,40	dB
+	Empfangsantennengewinn	G_E	0,00	dB
-	Empfängerempfindlichkeit	$P_{E,min}$	-105,00	dBm
+	Sonstige Gewinne		0,00	dB
-	Sonstige Verluste		0,00	dB
-	Sicherheitsreserve		9,00	dB
Σ	Max. Ausbreitungsdämpfung	$L_{F,max}$	154,27	dB

Tabelle 2.1: Aufstellen einer Linkbilanz

G_E ist der Gewinn der Empfängerantenne, welcher bei fehlender Richtwirkung häufig mit 0 dBi angenommen wird. Weitere Gewinne können beispielsweise durch Nutzung mehrerer Antennen für eine Verbindung resultieren (Diversitätsgewinn). Zusätzliche Dämpfungskomponenten ergeben sich durch den Kabelverlust und die Systemtechnik in der Basisstation. In den Sicherheitsreserven werden Schwund- und Interferenzreserven zusammengefasst. Mit Schwund wird hier die Dämpfung des Signals durch Hindernisse und destruktive Überlagerung bei der Wellenausbreitung bezeichnet. Der tatsächliche Wert des Schwunds schwankt in Abhängigkeit der Umgebung und wird hier unter statistischer Berücksichtigung dieser Schwankung als ein fester Wert angenommen. Die Interferenzreserve modelliert den Effekt störender Signale benachbarter Zellen am Empfänger.

Anschließend kann durch das Auflösen der Linkbilanz nach L_F die maximal zulässige Ausbreitungsdämpfung bestimmt werden, das sogenannte *Linkbudget* $L_{F,max}$. Dabei wird beim Sender die maximale Sendeleistung $P_{S,max}$ und beim Empfänger die Empfängerempfindlichkeit $P_{E,min}$ angenommen. Fällt die Empfangsleistung unterhalb von $P_{E,min}$, ist kein fehlerfreier Empfang mehr möglich. Die Versorgungswahrscheinlichkeit ist bei der Planung die Wahrscheinlichkeit, dass ein Nutzer an einer Position am Rand der Zelle mindestens eine vorgegebene Empfangsleistung, hier $P_{E,min}$ hat. Die einzige statistisch schwankende Größe der Linkbilanz ist die Schwundreserve, sodass sie entsprechend der angestrebten Versorgungswahrscheinlichkeit gewählt wird.

2.3.3. Abschätzung der erforderlichen Anzahl an Standorten

Auf Grundlage des Linkbudgets sowie einem einfachen Ausbreitungsmodell (um die auftretende Ausbreitungsdämpfung zu ermitteln) kann ein Zellradius abgeschätzt werden. Anschließend kann die erforderliche Anzahl an Basisstationen für ein vorgegebenes Versorgungsgebiet ermittelt werden.

Die Versorgungsfläche einer Zelle hängt dabei wesentlich von der Art der gewählten Konfiguration ab (Sektorisierung).

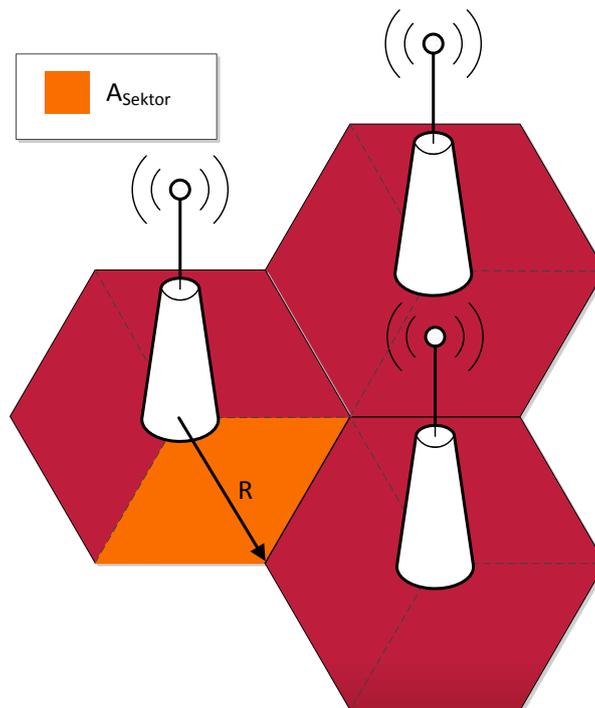


Abbildung 2.6: Zellflächen bei Annahme hexagonaler Zellen

Für den Fall einer 3-fachen Sektorisierung ergibt sich nach [2] die Versorgungsfläche A_{Sektor} einer Zelle bei der vereinfachenden Annahme hexagonaler Versorgungsbereiche einer Basisstation (siehe Abbildung 2.6) mit einem Zellradius R :

$$A_{\text{Sektor}} = \frac{\sqrt{3}}{2} R^2 \quad (2.5)$$

Werden die resultierenden Versorgungsflächen mit dem insgesamt zu versorgenden Gebiet A_{Gebiet} ins Verhältnis gesetzt, kann die für die Versorgung erforderliche ungefähre Anzahl $n_{\text{Versorgung}}$ an Basisstationen errechnet werden:

$$n_{\text{Versorgung}} = \frac{A_{\text{Gebiet}}}{3 \cdot A_{\text{Sektor}}} \approx 0,4 \frac{A_{\text{Gebiet}}}{R^2} \quad (2.6)$$

Es ist an dieser Stelle hervorzuheben, dass diese Ergebnisse lediglich eine Näherung darstellen, da sie keinerlei genauere Informationen über die Topografie und Landnutzung berücksichtigen und die versorgte Fläche durch Hexagone stark abstrahiert wird. Die Einzelheiten der Versorgungsplanung werden in Abschnitt 2.4 detaillierter dargestellt, speziell die Modellierung der Wellenausbreitung um konkrete Standorte zu bestimmen. Die bis hierher vorgenommene grobe Abschätzung liefert die minimale Anzahl an Standorten um eine Versorgung des Gebiets unter den abstrahierten Annahmen zu gewährleisten. Um die tatsächlich zur Versorgung benötigte Menge an Standorten zu ermitteln, werden in der detaillierteren Versorgungsplanung die konkrete Topografie und weitere verfügbare Umweltdaten einbezogen. Zur Kapazität des geplanten Netzes lässt sich zu diesem Zeitpunkt noch keine Aussage machen. Dies wird allerdings in einem späteren Schritt, der Kapazitätsplanung für LTE (siehe Abschnitt 2.5), näher betrachtet.

2.4. Versorgungsplanung

In diesem nächsten Schritt werden nun auch Effekte berücksichtigt, die die Funkübertragung auf dem Weg zwischen Sender und Empfänger beeinflussen. Abhängig von der jeweiligen Umgebung können sich hierbei sehr unterschiedliche Bedingungen ergeben, wie beispielsweise eine Empfangsposition vor oder hinter einem Berg. Zur Abschätzung der Ausbreitungseffekte gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Ausbreitungsmodelle. Generell kann man zwischen auf Messungen basierenden (empirischen) und strahlenoptischen Ansätzen differenzieren.

Empirische Modelle basieren rein auf den Erfahrungswerten von Messkampagnen. Ein großer Nachteil dieser Modelle ist, dass der Einfluss einzelner Ausbreitungsphänomene nur schwer separiert werden kann. In der Regel sind sie auch nur für den Umgebungstyp geeignet, in dem die Messungen ursprünglich stattgefunden haben. Im Gegensatz dazu bilden Verfahren auf strahlenoptischen Ansätzen Ausbreitungseffekte auf Basis mathematischer Berechnungen nach. Dadurch kann eine hohe Genauigkeit erreicht werden, die jedoch einen extrem hohen Detaillierungsgrad der Eingangsdaten und entsprechend sehr viel mehr Rechenzeit erfordert. Häufig werden auch Kombinationen angewendet, sog. semi-empirische Modelle, bei denen einzelne Aspekte durch Messungen bestimmt wurden, die spätere Anwendung dann aber fallspezifisch stattfindet.

2.4.1. Erweitertes Okumura-Hata Modell

Für diesen Versuch wird das in der Praxis häufig eingesetzte Okumura-Hata Modell genutzt, welches im Folgenden detailliert beschrieben wird. In seiner Grundform ist es ein rein empirisches Verfahren zur Beschreibung der Ausbreitungseffekte zwischen Basis- und Mobilstationen, das ursprünglich für Frequenzen $f = 150 \dots 1000 \text{ MHz}$ eingesetzt wurde. Durch niedrigere Basisstation-Antennenhöhen mit immer kleineren Zellen mussten die ursprünglichen Definitionsbereiche durch weitere Gleichungen mit neuen Ausbreitungsfaktoren ergänzt werden. Weiterhin finden zunehmend auch Frequenzen bis $f \leq 3000 \text{ MHz}$ Verwendung, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Das erweiterte Okumura-Hata Modell nach [3], definiert hierzu für verschiedene Frequenzen die entfernungsabhängige Dämpfung $L(r)$ in dB:

Für Entfernungen mit $r \leq 0,04 \text{ km}$ durch

$$L(r_{km}) = 32,4 + 20 \cdot \log_{10}(f_{MHz}) + 10 \cdot \log_{10} \left(r_{km}^2 + \frac{(h_{Base} - h_{Mobile})^2}{10^6} \right) \quad (2.7)$$

Für $0,04 \text{ km} < r < 0,10 \text{ km}$ durch

$$L(r_{km}) = L(0,04) + \left(\frac{\log_{10}(r_{km}) - \log_{10}(0,04)}{\log_{10}(0,1) - \log_{10}(0,04)} \right) \cdot (L(0,10) - L(0,04)) \quad (2.8)$$

Und für $0,10 \text{ km} \leq r \leq 20 \text{ km}$ mittels

$$L(r) = A + B \cdot \log_{10}(r_{km}) + C + D + E \quad (2.9)$$

Dabei beschreibt der Koeffizient A den Leistungsverlust in 1 km Entfernung (Einheitsverlust). Für unterschiedliche Frequenzbereiche gelten hierbei unterschiedliche Definitionen, die in Tabelle 2.2 aufgeführt sind:

Frequenz f	Pfadverlust A
$30 < f_{MHz} \leq 150$	$A = 69,6 + 26,2 \cdot \log_{10}(150) - 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{150}{f_{MHz}}\right) - 13,82 \cdot \log_{10}(\max\{30; h_{Base}\}) - a - b$ (2.10)
$150 < f_{MHz} \leq 1500$	$A = 69,6 + 26,2 \cdot \log_{10}(f_{MHz}) - 13,82 \cdot \log_{10}(\max\{30; h_{Base}\}) - a - b$ (2.11)
$1500 < f_{MHz} \leq 2000$	$A = 46,3 + 33,9 \cdot \log_{10}(f_{MHz}) - 13,82 \cdot \log_{10}(\max\{30; h_{Base}\}) - a - b$ (2.12)
$2000 < f_{MHz} \leq 3000$	$A = 46,3 + 33,9 \cdot \log_{10}(2000) + 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{f_{MHz}}{2000}\right) - 13,82 \cdot \log_{10}(\max\{30; h_{Base}\}) - a - b$ (2.13)

Tabelle 2.2: Pfadverlust in 1 km Entfernung in Abhängigkeit der Frequenz f in MHz

Die Terme a und b gelten hierbei für alle Frequenzbereich gleichermaßen:

$$a = (1,1 \cdot \log_{10}(f_{MHz}) - 0,7) \cdot \min\{10; h_{Mobile}\} - (1,56 \cdot \log_{10}(f_{MHz}) - 0,8) + \max\left\{0; 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{h_{Mobile}}{10}\right)\right\} \quad (2.14)$$

$$b = \min\left\{0; 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{h_{Base}}{30}\right)\right\} \quad (2.15)$$

B ist der Verlust je weiterer Dekade der Entfernung, also bei Verzehnfachen des Abstandes:

$$B = 44,9 - 6,55 \cdot \log_{10}(\max\{30; h_{Base}\}) \quad (2.16)$$

C berücksichtigt Beugungsdämpfung aufgrund von topografischen Hindernissen. Im Falle, dass keine Beugung auftritt, bzw. berücksichtigt wird, gilt hier:

$$C = 0 \quad (2.17)$$

Die im Versuchsprogramm vorliegende Implementierung berücksichtigt Beugung an topografischen Hindernissen, siehe Kapitel 2.4.3. Dadurch ergibt sich dann eine fallabhängige Dämpfung mit

$$C > 0 \quad (2.18)$$

D entspricht einer Korrekturdämpfung in Abhängigkeit der Frequenz. In der vorliegenden Implementierung wird hierbei die Korrektur über den Koeffizienten E in Abhängigkeit zur Landnutzungszone bzw. Bebauung vorgenommen, deshalb gilt hier:

$$D = 0 \quad (2.19)$$

Der Wert für den Koeffizienten E ist abhängig von der Frequenz und der Art der Bebauung, es ergeben sich die folgenden Werte:

Urban (großstädtisch):

$$E = 0$$

Suburban (vorstädtisch):

$$E = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{\min(\max(150; f_{MHz}); 2000)}{28} \right)^2 - 5,4$$

Rural (ländlich):

$$E = -4,78 \cdot \log_{10}(\min(\max(150; f_{MHz}); 2000))^2 + 18,33 \\ \cdot \log_{10}(\min(\max(150; f_{MHz}); 2000)) - 40,94$$

Bei der konkreten Implementierung im Versuchsprogramm wird vereinfachend angenommen, dass der Korrekturterm E maßgeblich von der Bebauung am jeweiligen Empfangspunkt abhängig ist.

2.4.2. Berücksichtigung von Geo-Daten

Neben systemtechnischen Kenngrößen sind Umgebungsinformationen wie die Geländehöhe und die Bebauung die zweite große Gruppe an Einflussfaktoren für die Berechnungen der Empfangsbedingungen. Je nach Herkunft der Daten können sie als Raster- oder Vektordaten vorliegen. Eine topografische Karte beschreibt dabei den Höhenverlauf des Geländes bezogen auf Normalnull und ohne Berücksichtigung von Bebauung und Vegetation. Die Information über die Oberfläche und Nutzung (z. B. Ackerland, Wald oder bebaute Fläche) des Geländes wird durch eine Landnutzungskarte klassifiziert. Aus diesen Daten lassen sich unterschiedliche Dämpfungseinflüsse für eine Funkwelle ableiten.

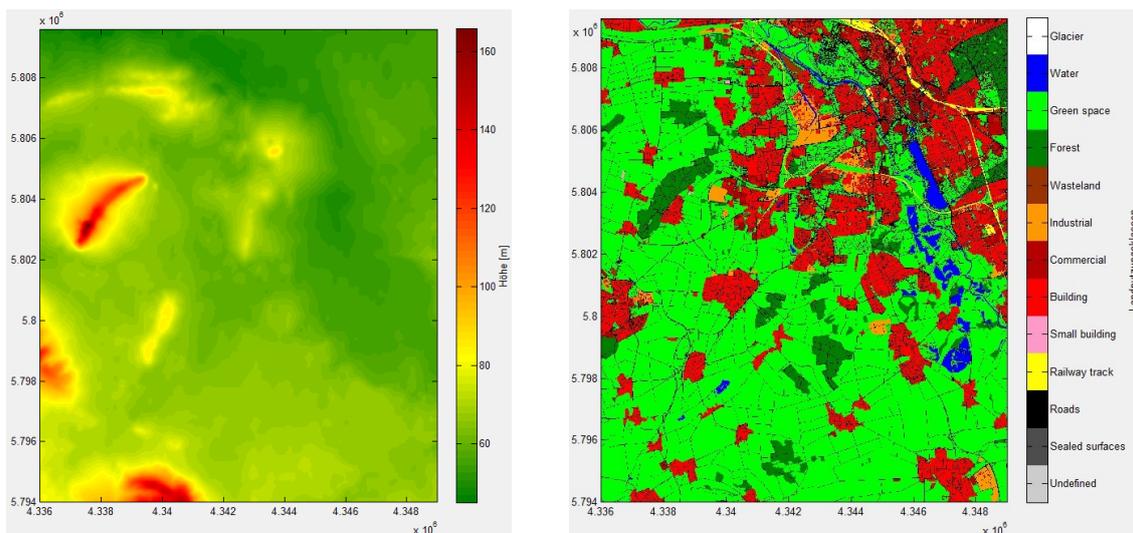


Abbildung 2.7: Höhenkarte (links) und Landnutzungskarte (rechts)

Weitere Quellen, die insbesondere für städtische Gebiete berücksichtigt werden, bilden digitale Straßenkarten und Gebäudemodelle. So ist in städtischen Umgebungen mit dichter Bebauung der Einfluss der Gebäude auf die Ausbreitungsbedingungen wesentlich größer als im ländlichen Gebiet mit sehr spärlicher Bebauung. Dementsprechend ist für städtische Gebiete detailliertes Datenmaterial zur Bebauung generell wichtiger als im ländlichen Bereich, wo die Versorgung maßgeblich durch die Landnutzung und Topografie des Geländes bestimmt wird.

Die Verarbeitung dieser raumbezogenen Daten ist entsprechend der Größe des betrachteten Gebiets, der Auflösung der digitalen Daten und den verwendeten Algorithmen mehr oder weniger rechenintensiv. Um eine effiziente Vorgehensweise zu gewährleisten, gewinnt für die Ausbreitungs-

berechnungen die Extraktion der relevanten Parameter aus den Geländedaten an Bedeutung. Meist wird bei der Verarbeitung ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenzeit eingegangen.

2.4.3. Beugung an topografischen Hindernissen

Anschaulich gesprochen erlaubt die Beugung das Blicken hinter ein Hindernis. Mit dem für den Menschen sichtbaren Licht ist dies bekanntlich nicht möglich; für erheblich niedrigere Frequenzen, wie sie im Mobilfunk relevant sind, ist dies jedoch begrenzt gegeben. So lässt sich zwar aus der Position des Betrachters kein klares Abbild hinter dem Hindernis erkennen, elektromagnetische Wellen finden allerdings den Weg vom Sender zum Empfänger, indem sie an der Spitze der Kante um das Hindernis herum gebeugt werden. Hierbei erfahren sie eine Beugungsdämpfung, das heißt eine Schwächung, wie in Abbildung 2.8 dargestellt ist.

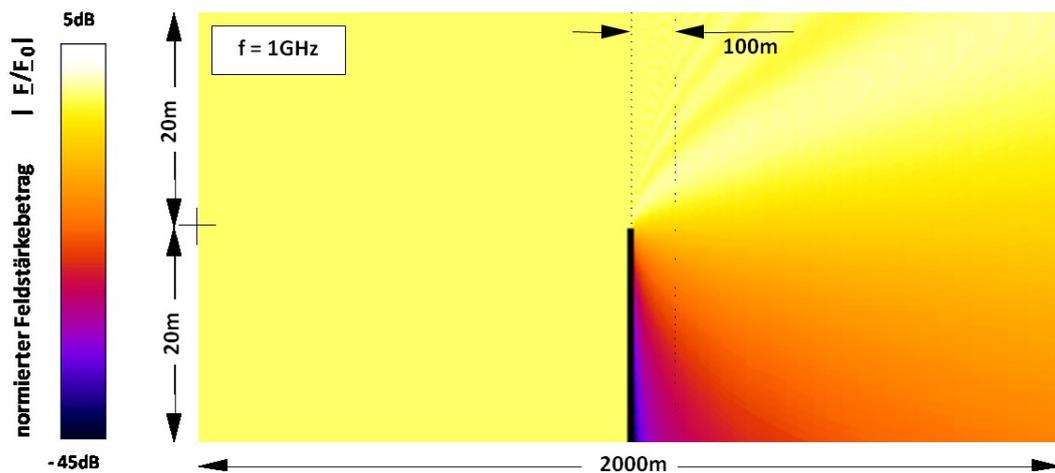


Abbildung 2.8: Beugungsdämpfung an einem Knife-Edge bei $f=1$ GHz. Entnommen aus [2]

Für die Versorgung im Mobilfunk ist dies von hoher Relevanz. So erlaubt die Beugung über Dächer und um Gebäudeecken herum die Versorgung von Bereichen, die keine direkte Sichtverbindung zur Basisstation haben.

Für die Modellierung dieser Beugungseffekte gibt es verschiedene Ansätze. Die oben dargestellte Grafik ist mit einem Knife-Edge-Modell („Messerkante“) gerechnet worden. Die in diesem Versuch genutzte Implementierung basiert auf den Untersuchungen von Deygout [4] mit Korrekturtermen von Causebrook [5]. Weitere Implementierungsdetails sind in [2] beschrieben.

2.4.4. Effektive Antennenhöhe

Eine weitere Notwendigkeit bei der Verwendung von Höhendaten ist die Berechnung einer effektiven Antennenhöhe. Da die oben beschriebenen Gleichungen von einem flachen Szenario ausgehen, sind in den empirisch ermittelten Koeffizienten logischerweise auch nur eben diese Effekte berücksichtigt. Durch ein abweichendes Geländeprofil ergeben sich aber auch unterschiedliche Anteile der an der Erdoberfläche reflektierten bzw. gestreuten Wellen.

Für die Ermittlung dieser effektiven Antennenhöhe existieren verschiedene Vorgehensweisen, die sich jeweils bei unterschiedlichen Geländeumgebungen anbieten. Da diese Zusammenhänge allerdings den Rahmen dieses Skripts sprengen würden, sei an dieser Stelle lediglich darauf hingewiesen, dass das im Versuchsprogramm genutzte Prädiktionsmodell darauf Rücksicht nimmt.

2.5. Kapazitätsplanung für Long Term Evolution (LTE)

Die Kapazitätsplanung hängt von einer Vielzahl verschiedener Einflüsse ab. Insbesondere ist die Kapazität einer Mobilfunkzelle stark von der eingesetzten Technik abhängig, weshalb in den folgenden Abschnitten kurz die wesentlichen Aspekte und Zusammenhänge von LTE eingeführt werden, um dann eine beispielhafte Kapazitätsplanung vorzunehmen.

2.5.1. Effizientere Nutzung des Spektrums

Im Vergleich zur ersten kommerziell erfolgreichen Mobilfunktechnologie GSM wurden bei den nachfolgenden Standards UMTS und LTE die verfügbaren Frequenzressourcen immer effizienter genutzt. Während bei GSM jeder Funkzelle ein kleiner Bereich des Frequenzspektrums zur exklusiven Nutzung zugewiesen wurde, konnte bei UMTS jede Zelle das komplette, zugewiesene Spektrum nutzen. Bei UMTS wurde dies durch ein spezielles Codierungsverfahren ermöglicht, dass die Störung zwischen benachbarten Zellen zumindest in der Theorie komplett unterbinden könnte. Auch bei LTE wird in jeder Zelle das komplette, zugewiesene Spektrum genutzt. Trotz der sich daraus ergebenden unvermeidlichen Interferenz liegen die erreichbaren Datenraten über denen, die sich ergäben, wenn man wieder zu exklusiver Frequenz-Nutzung einzelner Zellen zurückkehren würde.

Die Besonderheit bei LTE ist das Multiplex-Verfahren *OFDM* (Orthogonal Frequency Division Multiplex), bei dem die Informationen für unterschiedliche Nutzer auf benachbarten Frequenzen übertragen werden können, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen. Hierdurch ergibt sich eine hohe mögliche Datenrate pro verfügbarer Frequenzressource, die sogenannte „spektrale Effizienz“ $\left[\frac{\text{bit/s}}{\text{Hz}} \right]$.

Zum Vergleich ist in Tabelle 2.3 die maximale spektrale Effizienz der verschiedenen Mobilfunktechnologien im Downlink angegeben.

Technologie	Spektrale Effizienz $\left[\frac{\text{bit/s}}{\text{Hz}} \right]$
GSM	0,4
UMTS (HSDPA)	3,0
LTE	7,5

Tabelle 2.3: Maximale spektrale Effizienz im Downlink, aus [6]

Die Nutzung der gleichen Frequenzen in jeder Zelle bedeutet allerdings auch, dass sich der Planungsprozess solcher Netze stark verändert hat. War zu Zeiten von GSM die Planung der Frequenz-Zuweisung an die einzelnen Zellen der wesentliche Schlüssel für die Kapazität der Zelle, so ist bei LTE die Minimierung der Interferenz zwischen benachbarten Zellen essenziell für die Kapazität der Zellen und des gesamten Netzes.

2.5.2. Nutzung von Referenzsignalen (RSRP, SINR)

Damit die Mobilstation während einer Netzwerksuche ein LTE-Signal finden und später die Signalqualität einschätzen kann, werden im Downlink in einem vordefinierten Muster sogenannte *Referenzsymbole* übertragen. Aus der Messung der Referenzsymbole kann u.a. die mittlere Empfangsleistung *Reference Signal Received Power (RSRP)* dieser Zelle geschätzt werden.

Die RSRP ist die mittlere Leistung des Referenzsignals über die betrachtete Kanalbandbreite. Sie entspricht der Empfangsleistung des Signals in der Annahme, dass die weiteren Signalanteile mit Nutzdaten die gleiche Leistung besitzen. Mithilfe der RSRP kann die am stärksten empfangene Zelle

als Referenz ausgewählt werden. Besondere Bedeutung besitzt dieser Wert für die Wahl einer neuen Zelle bei einem Handover.

Eine weitere Größe, die zur Beurteilung eines Funkkanals zwischen Basisstation (bei LTE als *evolved NodeB (eNodeB)* bezeichnet) und Mobilstation dient ist das *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR)*. Das SINR ist das Verhältnis des Referenzsignals zu den durch Interferenzen und Rauschen verursachten Störungen:

$$SINR = \frac{S}{I + N} [dB] \quad (2.20)$$

Dabei entspricht S der empfangenen Leistung der gewünschten Verbindung, I der Interferenzleistung aus den aufsummierten Empfangsleistungen aller anderer Quellen und N der Leistung des bandbreitenabhängigen thermischen Rauschens des Kanals. Durch das SINR erfolgt eine Quantifizierung der Signalqualität, da es einen wesentlichen Einfluss auf die erreichbare Datenrate eines Funkkanals hat, wie im folgenden Abschnitt näher erläutert wird.

Außerdem dienen Referenzsignale auch für Kanalschätzungen, die in diesem Skript allerdings nicht weiter behandelt werden.

2.5.3. Maximal erzielbare Datenrate

Die bei einer drahtlosen Datenübertragung erzielbaren Datenraten hängen maßgeblich von der Bandbreite B des zur Übertragung genutzten Funkkanals und den Störungen bzw. dem Rauschen auf diesem ab. Die Stärke des Rauschens lässt sich durch das SNR beschreiben und wirkt sich nach dem Satz von der Kanalkapazität von Shannon wie folgt auf die maximal erzielbare Datenrate D aus:

$$D_{max} = B \cdot \log_2(1 + SNR_{lin}) \quad (2.21)$$

B steht hierbei für die Bandbreite des Kanals in Hz und SNR_{lin} ist das SNR als lineare Größe. In einem stärker gestörten Kanal mit geringerem SNR sinkt also D_{max} .

Um die Datenübertragung auch in gestörten Kanälen zu verbessern, wird in Mobilfunksystemen jeweils eine passende Kombination aus Modulationsschema und Fehlerschutzcodierung gewählt. Fasst man die Störungen durch das thermische Grundrauschen und die Interferenz durch andere Übertragungen im gleichen Frequenzspektrum zusammen, so lässt sich die erzielbare Datenrate auch äquivalent in Abhängigkeit des SINR darstellen.

Abbildung 2.9. zeigt die Shannon Kapazität sowie die für LTE erzielbaren Bruttodatenraten in einem 10 MHz breiten Kanal mit den unterschiedlichen Modulationsverfahren und den entsprechenden Fehlerschutzcodes über unterschiedliche SINR Werte. Die erzielbare Datenrate hängt also direkt mit dem SINR zusammen.

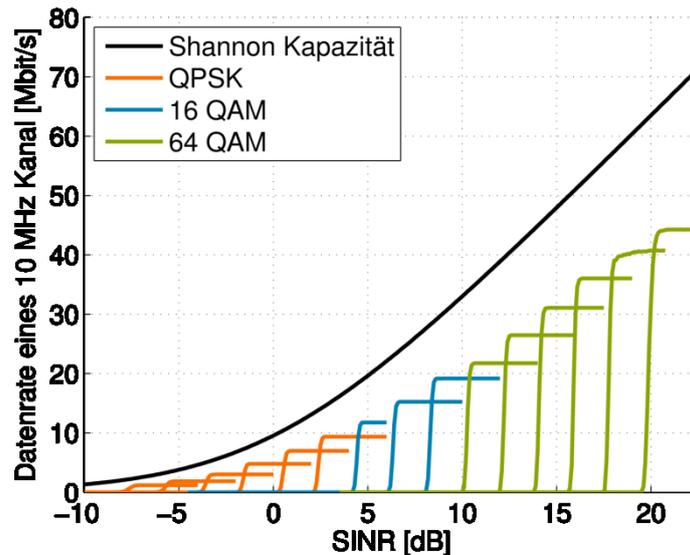


Abbildung 2.9: Shannon Kapazität und theoretische Bruttodatenraten eines 10 MHz LTE Kanals für verschiedene Modulations- und Codierungsschemata

2.5.4. Verkehrsabschätzungen für LTE

Wie eben erläutert ist die Interferenz die ausschlaggebende Größe für die mögliche Datenrate eines Nutzers und damit auch für die Kapazität einer Funkzelle. Um den Zusammenhang anhand der Interferenz zweier benachbarter Zellen zu erläutern, soll vereinfacht angenommen werden, dass sich der Nutzer auf der direkten Verbindungslinie zwischen den Nachbarzellen befindet. Abbildung 2.10 zeigt qualitativ die Empfangsleistung in Abhängigkeit der Entfernung zur jeweiligen Basisstation. Befindet sich der Nutzer auf der Zellgrenze, ist die empfangene Leistung von beiden Standorten gleich hoch und das Verhältnis von $\frac{\text{Nutzleistung}}{\text{Störleistung}} = \frac{S}{I} \approx 1$, was einem SINR von 0 dB entspricht. Befindet sich ein Nutzer näher an der ihn versorgenden Basisstation, sinkt der Einfluss des störenden Nachbarn und die empfangene Leistung der versorgenden Zelle nimmt gleichzeitig zu. Dementsprechend steigt auch das SINR.

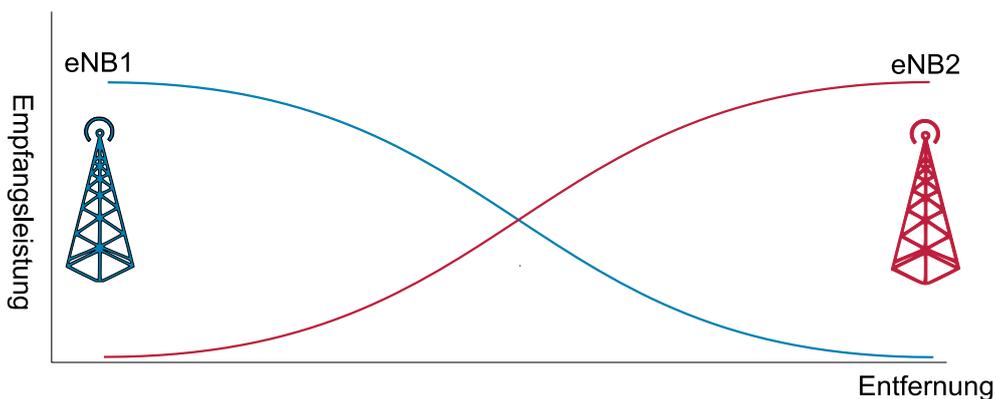


Abbildung 2.10: Empfangsleistung des Signals einer Zelle in Abhängigkeit der Entfernung

Zur ersten Abschätzung der Kapazität der Zellen wird das mittlere SINR aller Nutzer einer Zelle genommen. Auf Basis dieses SINR lässt sich bei einer festen, angefragten Datenrate je Nutzer berechnen, wie viele Nutzer eine Funkzelle zeitgleich versorgen kann.

Ein Mobilfunknetz wird allgemein für die Zeiträume mit der höchsten Teilnehmeraktivität ausgelegt, die sogenannte *Hauptverkehrsstunde*. Es wird also für diesen Zeitraum die Nutzerdichte und eine

durchschnittliche angefragte Datenrate je Nutzer geschätzt und auf Basis dieser Informationen die Kapazität des Netzes (erforderliche Menge an Standorten und Funkzellen) ausgelegt. Da sich die Dimensionierung nur auf die mittlere Zellkapazität bezieht, wird hier für die Hauptverkehrsstunde eine Zellauslastung von weit unter 100% angenommen, um auch für etwaige Schwankungen und zukünftige Zunahme des Verkehrs noch Reserven vorzuhalten. Tabelle 2.4 zeigt die einzelnen Schritte, um die Menge der durch einen Standort versorgten Nutzer abzuschätzen.

Zellkapazität (bei $SINR_{avg} = 15$ dB und 10 MHz Bandbreite)	31 MBit/s
Mittlere Zellauslastung in der Hauptverkehrsstunde	$\cdot 70 \%$
Angestrebte mittlere Datenrate je Nutzer	$/ 250 \text{ kBits/s}$
3 Sektoren je Standort	$\cdot 3$
Versorgbare Nutzer je Standort	$= 260,4$

Tabelle 2.4: Abschätzung der versorgbaren Anzahl an Nutzern je Standort über die Datenrate

Ausgehend von Annahmen über die voraussichtlichen Verkehrsanforderungen und die angestrebte mittlere Datenrate kann die erforderliche Gesamtdatenrate in einer Region berechnet werden:

$$Datenrate_{gesamt} = Nutzeranzahl \cdot Datenrate_{Nutzer} \tag{2.22}$$

Wird diese Gesamtdatenrate in Relation zu der Kapazität einer Zelle gesetzt, so kann die erforderliche Anzahl an Zellen für die Bedienung des gesamten Verkehrs ermittelt werden:

$$n_{Kapazität} = \frac{Datenrate_{gesamt}}{Zellkapazität} \tag{2.23}$$

2.6. Parameterplanung

Die Parameterplanung baut auf der festgelegten Konfiguration der Standorte, der Antennen- und der Systemtechnik auf. Es werden die Beziehungen der Funkzellen untereinander festgelegt und weitere Einstellungen vorgenommen, die das spätere Betriebsverhalten des Netzes definieren. Zelleigenschaften wie die Art des versorgten Gebiets (z. B. Innenstadt oder Autobahn) machen für jede Zelle eine individuelle Parameterplanung sinnvoll. Dies soll im Folgenden am Beispiel einer Handover-Konfiguration näher erläutert werden.

2.6.1. Handover-Konfiguration

Bei einem Handover wechselt ein aktiver Mobilfunkteilnehmer von einer Funkzelle in eine andere. Hierbei soll die entsprechende Mobilstation möglichst immer zu der Zelle verbunden sein, die die beste RSRP bietet und somit den vermutlich besten Funkkanal. Da der Funkkanal sich in Downlink und Uplink-Richtung reziprok verhält, ist hierdurch auch sichergestellt, dass in umgekehrter Richtung, also vom Mobilteil zur Basisstation, die beste Verbindung gewählt ist. Dies erlaubt der Mobilstation die Sendeleistung so gering wie möglich zu halten. Unnötige Handover, z. B. der ständige Wechsel eines Nutzers an der Zellgrenze zwischen den beiden benachbarten Zellen (Ping-Pong Handover) sind zu vermeiden, da jeder Handover Signalisierungsverkehr sowohl im Funknetz als auch im Kernnetz erzeugt. Die Initialisierung eines Handovers kann durch verschiedene Ereignisse ausgelöst werden. Oft führen die variierenden Empfangsbedingungen dazu, dass eine Versorgung durch die verbundene eNodeB nicht länger gewährleistet werden kann. Handover können jedoch auch vom System aus-

gelöst werden, um eine gleichmäßigere Auslastung der Zellen zu erzielen bzw. überlastete Zellen zu entlasten. Während einer Verbindung werden von der Mobilstation regelmäßige Messungen der Empfangsleistung der verbundenen Zelle sowie benachbarter Zellen durchgeführt. Bei Erreichen von zuvor definierten Grenzwerten werden die gemessenen Empfangsleistungen in Form eines Measurement Reports an die versorgende eNodeB gesendet. Diese entscheidet anschließend über die Durchführung eines Handovers.

Das in [7] spezifizierte *EventA3-Szenario* soll als Beispiel dienen, um das Verhalten einer MS beim Übergang zwischen zwei Zellen zu betrachten (Abbildung 2.11). Dargestellt sind die RSRP-Verläufe der versorgenden und der benachbarten eNodeB über den zurückgelegten Weg des UEs. Dabei wirken sich Änderungen der nachfolgend beschriebenen Parameter unterschiedlich auf den Erfolg und den Ausführungszeitpunkt eines Handovers aus.

Das Handover-Verhalten für das *EventA3* wird durch folgende Parameter definiert:

- Mit *A3Offset* wird die versorgende Zelle im Vergleich zu ihren Nachbarzellen aufgewertet, indem dieser zum gemessenen RSRP-Wert addiert wird
- *HysteresisA3* beschreibt die Differenz der RSRP-Werte zweier Zellen, die mindestens vorliegen muss, bevor ein Handover in Betracht gezogen wird
- Über die Messdauer *TimeToTriggerA3* muss die Handoverbedingung (2.24) erfüllt sein, dann wird ein Measurement Report an die eNodeB gesendet, sodass diese einen Handover veranlassen könnte
- *ReportIntervallA3* ist die Messdauer bis zu jedem weiteren Versenden eines Measurement Reports

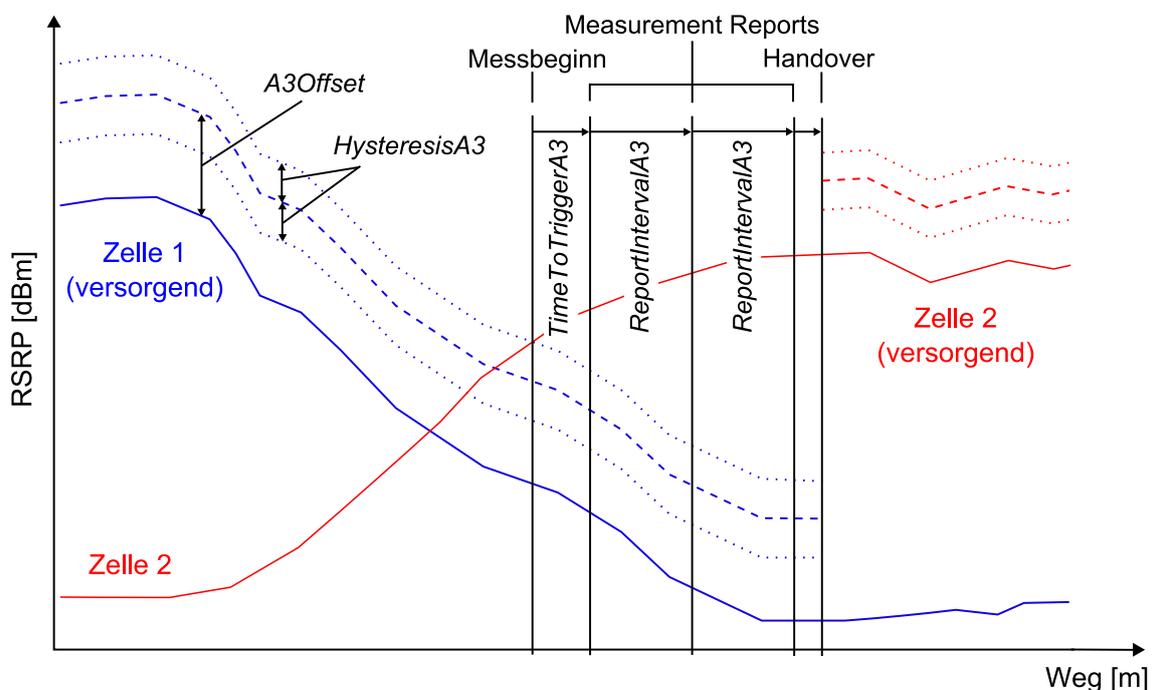


Abbildung 2.11: Das Handover-Szenario EventA3 nach [7]

Solange die MS keine Rückmeldung der eNodeB bekommt, wird bei Erfüllung der Gleichung 2.24 nach jedem Zeitraum $ReportIntervallA3$ ein neuer Report gesendet.

$$RSRP_{target} > RSRP_{serving} + A3Offset + HysteresisA3 \quad (2.24)$$

In Abbildung 2.11 sei angenommen, dass die MS abschließend den Befehl für einen Handover erhält und daraufhin in die über den Messzeitraum gemessene Nachbarzelle wechselt. Durch die geeignete Wahl einer *TimeToTrigger* (TTT) können Ping-Pong-Handover reduziert und unnötiger Signalisierungsverkehr vermieden werden. Wählt man die TTT allerdings zu groß, so kann es sein, dass das Signal der versorgenden Zelle zu schwach wird und die Verbindung abbricht. Besonders kritisch sind diese Einstellungen bei Funkzellen in Regionen mit hohen Nutzergeschwindigkeiten, wie z. B. Autobahnen oder Bahnstrecken.

2.7. Netzoptimierung

Bauliche Veränderungen innerhalb des Versorgungsgebietes oder technische Maßnahmen im Netz führen zu Veränderungen der Ausbreitungsbedingungen. Aus diesem Grund sind zur Überwachung der Funktionsfähigkeit und Qualität des Netzes regelmäßige Messungen notwendig. Mit Messfahrten kann auch die für den Kunden erlebte Qualität des Netzes analysiert werden und z. B. Problemstellen identifiziert werden, die mit den vorhandenen Daten in der Planung nicht zu erwarten waren.

Bei LTE werden für eine Beurteilung der Verbindungsqualität vor allem die RSRP und das SINR erfasst. Aus dem Vergleich der realen Messwerte mit den im Planungsprozess ermittelten Prädiktionswerten lassen sich Rückschlüsse auf Erwartungswerte und Standardabweichungen der Empfangsleistungen ziehen, sodass gleichzeitig die Genauigkeit der prädizierten Ergebnisse für zukünftige Planungen verbessert werden kann.

3. Hausaufgaben

Bitte bereiten Sie diese Hausaufgaben **VOR** dem Termin mit dem Betreuer vor. Der Betreuer wird mit Ihnen die Ergebnisse besprechen.

3.1. Kurzfragen

Beantworten Sie in Kurzform, schriftlich, die folgenden Fragen:

- a) Welche Gründe gibt es für die zellulare Struktur von Mobilfunknetzen und welche Konsequenzen entstehen daraus?

- b) Welche Parameter beeinflussen die Zellform und -größe?

- c) Welche Vor- und Nachteile sind mit unterschiedlichen Sektorisierungen verbunden?

- d) Beschreiben Sie kurz die Bedeutung einer Linkbilanz.

- e) Auf welche Weise werden beim Okumura-Hata Modell Hindernisse berücksichtigt?

- f) Was drücken die Bewertungskriterien RSRP und SINR aus? Schätzen Sie ab, wie sich die beiden Größen bei einer höheren Dichte an Basisstationen verhalten.

- g) Wieso kann sich die Anzahl benötigter Standorte bei der Versorgungs- und Kapazitätsplanung unterscheiden?

3.2. Aufgaben

3.2.1. Ausbreitungsdämpfung berechnen

Berechnen Sie mit dem Okumura-Hata Modell die auftretenden entfernungsabhängigen Ausbreitungsdämpfungen für die in der Tabelle genannten Kombinationen und $h_{Base} = 35m$ sowie $h_{Mobile} = 1,5m$.

Bebauungsdichte	Rural			Suburban			Urban		
	2,75	7,75	13,75	2,75	7,75	13,75	2,75	7,75	13,75
Entfernung [km]									
800 MHz									
1800 MHz									

3.2.2. Downlink Linkbilanz aufstellen

Stellen Sie für den Downlink eines 5 MHz-LTE-Systems die Linkbilanzen auf und bestimmen Sie die maximal zulässige Ausbreitungsdämpfung. Vervollständigen Sie hierzu die Tabelle.

Parameter	Einheit	LTE 800 DL	LTE 1800 DL
Sendeleistung P_S	dBm		
Sendeantennengewinn G_S	dBi		
Kabelverlust	dB		
Empfangsantennengewinn G_E	dBi		
Sonstige Gewinne	dB		1,48
Sonstige Verluste	dB	1	0
Sicherheitsreserven	dB	9	9
Empfängerempfindlichkeit	dBm	-106,52	-106,52
Max. Ausbreitungsdämpfung	dB		

3.2.3. Zellgrößen ermitteln

Bestimmen Sie für die ermittelte maximal zulässige Ausbreitungsdämpfung den maximalen Zellradius in suburbaner Umgebung und die resultierenden Zellflächen unter Annahme einer hexagonalen Zelle. Nutzen Sie hierzu die Ergebnisse aus 3.2.1.

Parameter	LTE 800 DL	LTE 1800 DL
Zellradius		
A_{Sektor}		

3.2.4. Versorgungsplanung

Für den Versuch wird eine Fläche von $13 \text{ km} \cdot 15.6 \text{ km} = 202,8 \text{ km}^2$ zugrunde gelegt. Schätzen Sie die zur Versorgung des Gebiets benötigte Anzahl an Standorten für LTE 800 und LTE 1800.

Parameter	LTE 800 DL	LTE 1800 DL
Benötigte Standorte		

3.2.5. Kapazitätsplanung

Angenommen, es befinden sich in der Hauptverkehrsstunde 2000 aktive Teilnehmer in dem eben beschriebenen Gebiet, die eine mittlere Datenrate von 250 kbit/s im Downlink benötigen. Wie viele Standorte (Zellkapazität = 31 Mbit/s, maximale Auslastung = 70 %) werden benötigt um alle Teilnehmer mit dieser Kapazität zu versorgen?

Parameter	LTE 800 DL	LTE 1800 DL
Benötigte Standorte		

4. Versuchsaufbau

Im praktischen Versuchsteil werden verschiedene Planungsabläufe mit Hilfe einer Simulationsumgebung durchgeführt.

4.1. Hauptfenster

Die Benutzeroberfläche des Simulators ermöglicht die Eingabe und Änderung verschiedener Parameter sowie die grafische Ausgabe der jeweiligen Ergebnisse.

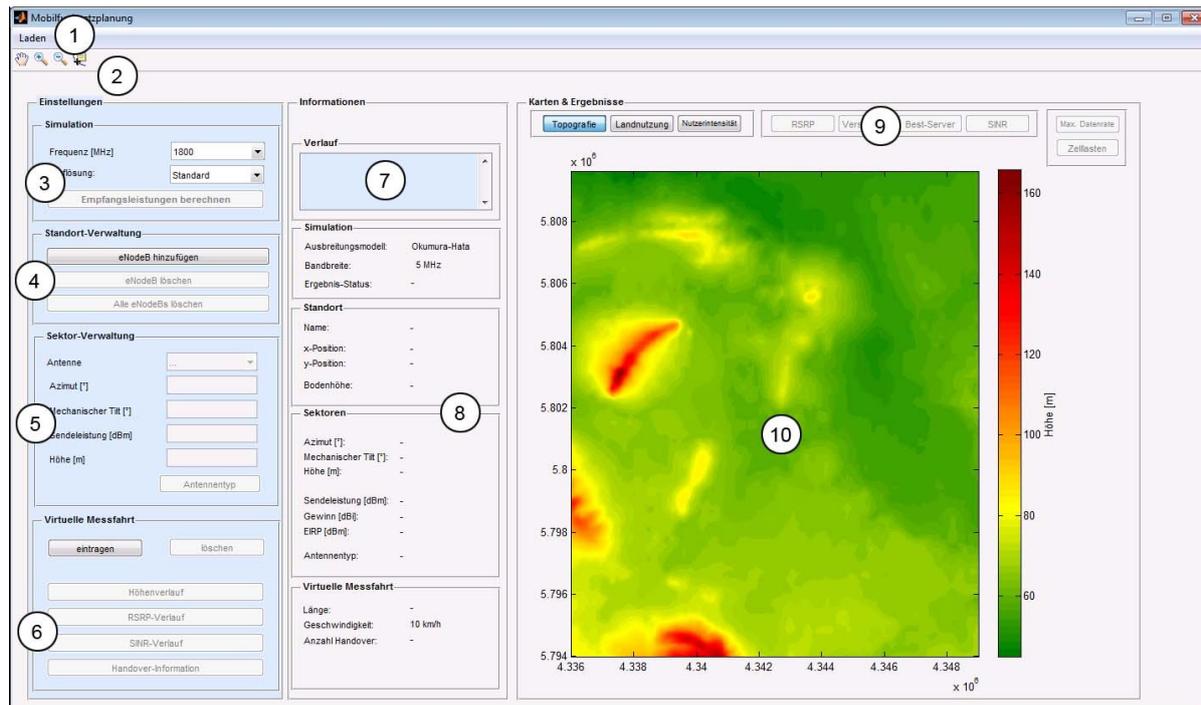


Abbildung 4.1: Simulationsumgebung

Über das Menü ① können verschiedene Netzkonfigurationen für die Aufgaben geladen werden. Die Toolbar ② bietet eine Zoomfunktion für die Karten und Berechnungsergebnisse. Mit dem  Symbol kann ein sogenannter Data Cursor auf der Karte platziert werden, der eine exakte Darstellung der Koordinaten und Eigenschaften (z. B. Höhe) dieses Punktes ermöglicht.

Die interaktiven Elemente der GUI sind im *Einstellungen*-Panel gesammelt. Die Frequenz der Simulation und der Button zum Starten der Berechnungen befinden sich in ③. Die Anzahl der gesetzten eNodeBs kann über die Standort-Verwaltung ④ geändert werden. Die individuelle Konfiguration einer einzelnen Antenne wird über ⑤ vorgenommen. Nach entsprechender Antennenauswahl wird die Antenne des Standortes rot eingefärbt.

Um Unterschiede zwischen einzelnen Simulationen besser zu erkennen und zu analysieren, können die letzten drei Ergebnisse über eine Verlaufsfunktion ⑦ geladen und hierdurch untereinander verglichen werden. Nach einem Klick auf einen gesetzten Standort werden in ⑧ alle Parameter der Basisstation angezeigt. Im *Karten & Ergebnisse*-Panel ⑨ kann zunächst zwischen einer Anzeige der Höhen-, Landnutzungs- oder Nutzerintensitätskarte gewechselt werden.

Sobald Berechnungsergebnisse vorliegen kann auf RSRP-, SINR-, Versorgungs- und Best-Server Karten, sowie auf eine Karte zur maximalen Datenrate und Zellauslastung zugegriffen werden, um die Netzkonfiguration zu analysieren.

Zu Beginn wird das Programm mit Hilfe der entsprechenden Desktop-Verknüpfung gestartet. Nach dem Starten des Programms werden die für die Netzplanung benötigten Karten und Einstellungen automatisch geladen. Die einzelnen auswählbaren Ansichten werden im folgenden Abschnitt kurz näher erläutert.

4.2. Kartenansichten

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Ansichten ⑩ aus dem Karten & Ergebnisse Panel ⑨ kurz erläutert.

4.2.1. Topografie

Eine Höhenkarte des Szenarios mit der Geländehöhe in [m]. Die Topografie wirkt sich auf die Ausbreitung der Funkwellen aus, sodass diese Information bei der Planung der Standorte eines Netzes zu berücksichtigen ist.

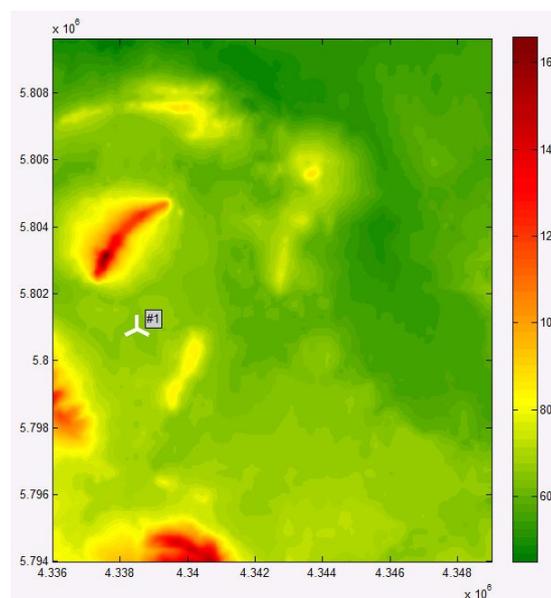


Abbildung 4.2: Topografie

4.2.2. Landnutzung

Die Landnutzungsklassen beschreiben, wie die Fläche genutzt wird. Um detaillierte Landnutzungsdaten für die Prädiktion nutzen zu können, muss für jede Landnutzungsklasse und Frequenz ein entsprechender Korrekturfaktor durch Messungen ermittelt werden, was die Genauigkeit der Prädiktionen erhöht. Die hier dargestellten Landnutzungsklassen werden der Einfachheit halber den drei Korrekturfaktoren des Okumura-Hata Modells zugeordnet. So wird beispielsweise bebautes Gebiet wie Building, Small Building oder Commercial mit dem Korrekturfaktor für städtisches Gebiet assoziiert.

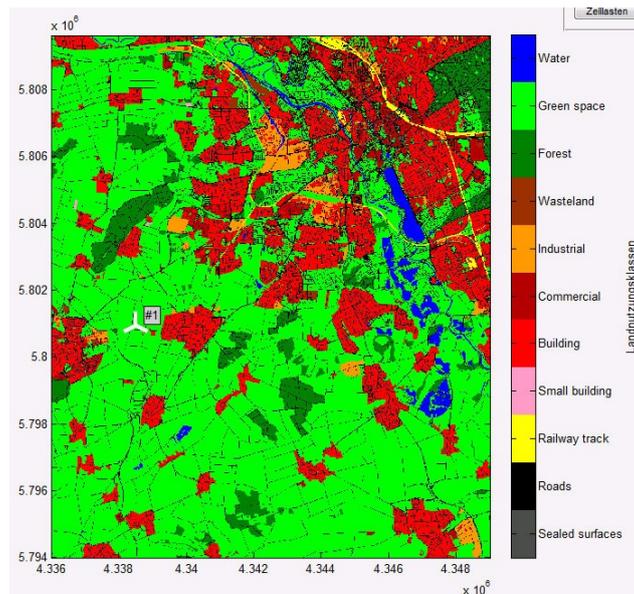


Abbildung 4.3: Landnutzung

4.2.3. Intensitätskarte

Die Intensitätskarte gibt Aufschluss über die räumliche Verteilung des mobilen Datenverkehrs. Eine hohe Intensität bedeutet, dass hier viele Daten über das Mobilfunknetz angefragt werden und das Netz eine entsprechende Kapazität bereitstellen muss.

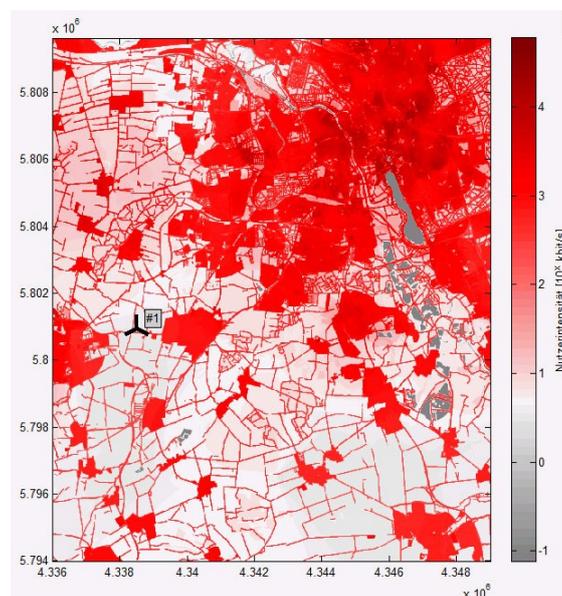


Abbildung 4.4: Intensitätskarte

4.2.4. RSRP-Karte

Die RSRP-Karte zeigt die empfangene Leistung des Referenzsignals der stärksten empfangbaren Funkzelle an jeder Position. Die Leistung wird hier, wie die Sendeleistung P_S , in [dBm] angegeben.

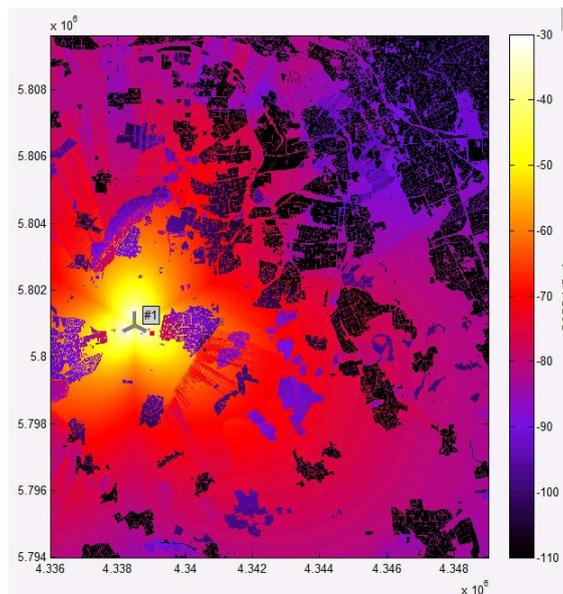


Abbildung 4.5: RSRP-Karte

4.2.5. Versorgungskarte

Hier wird das versorgte Gebiet anhand der minimalen empfangenen Leistung gezeigt. Liegt die empfangene RSRP an einer Position unterhalb des Schwellwerts $P_{E,min}$ ist hier keine Versorgung gegeben.

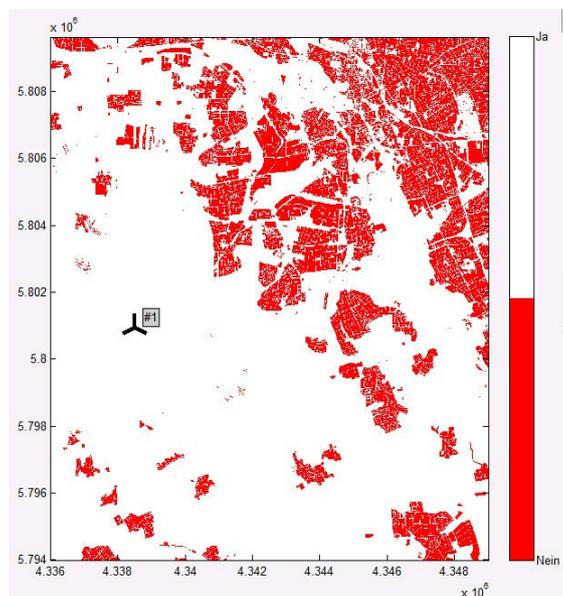


Abbildung 4.6: Versorgungskarte

4.2.6. Best-Server-Karte

Die Best Server Karte zeigt die Positionen, an denen eine Funkzelle eine höhere RSRP als alle anderen Funkzellen bietet, an denen sie also die bestmögliche Verbindung bietet.

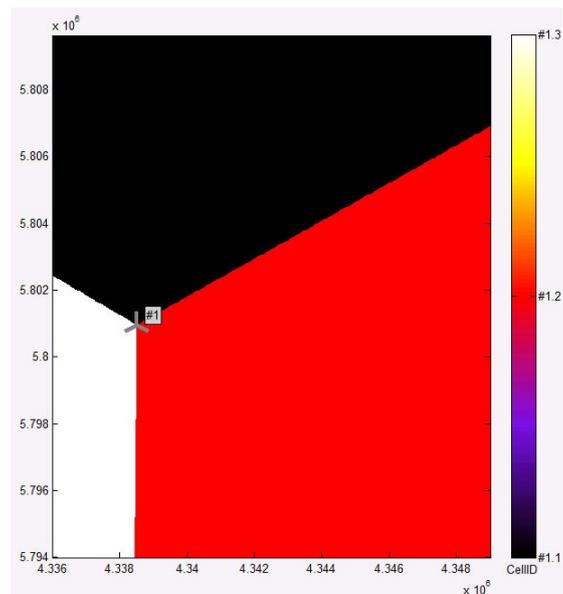


Abbildung 4.7: Best-Server-Karte

4.2.7. SINR-Karte

Zeigt das SINR für jede Position. Ist das $SINR < SIR_{\min} = -6,5 \text{ dB}$ so ist keine Decodierung des empfangenen Signals mehr möglich und die Position ist unter den gegebenen Interferenzbedingungen nicht versorgt. Diese Positionen werden in der Karte durch die rote Farbe gekennzeichnet.

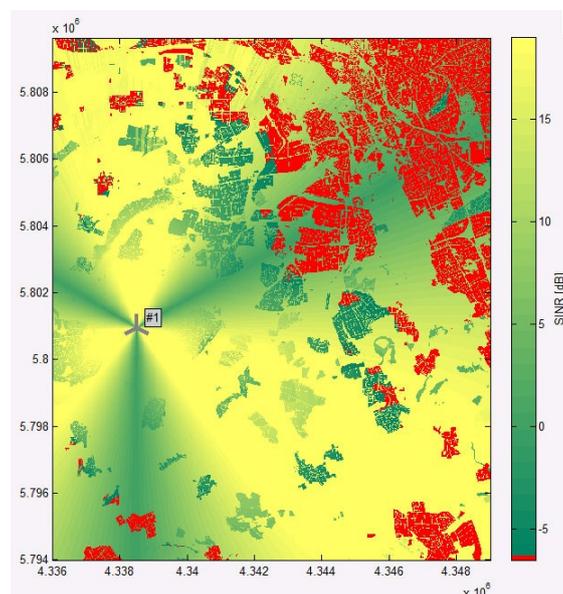


Abbildung 4.8: SINR-Karte

4.2.8. Maximale Datenrate

Zeigt die mit dem aktuellen SINR maximal erreichbare Datenrate an einer Position. Hierbei wird angenommen, dass alle Ressourcen der Funkzelle exklusiv einem Nutzer an dieser Position zugewiesen sind.

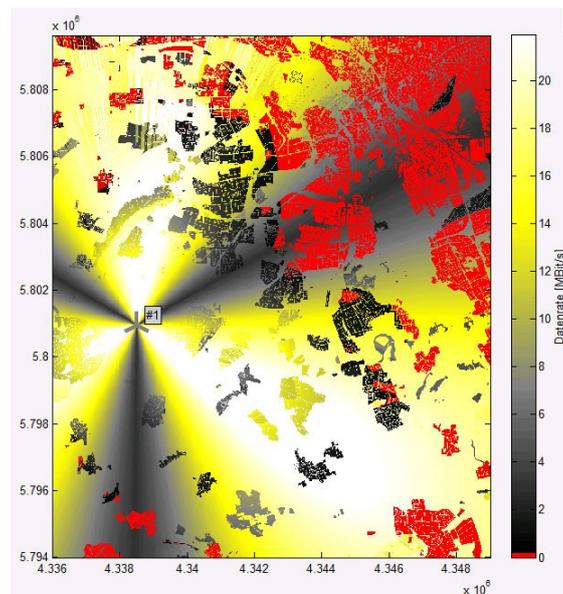


Abbildung 4.9: Maximale Datenrate

4.2.9. Zelllasten

Zeigt den prozentualen Anteil an belegten Ressourcen einer Funkzelle. Sind alle verfügbaren Ressourcen belegt, ist die Kapazität nicht ausreichend. In der Praxis würde sich dies darin äußern, dass Datenübertragungen für manche Nutzer entweder nicht möglich sind, oder die Datenrate bestehender Verbindungen sinkt.

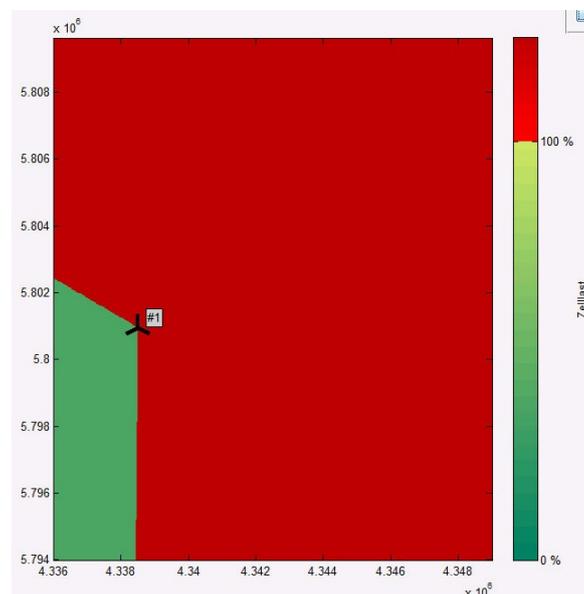


Abbildung 4.10: Zelllasten

4.3. Virtuelle Messfahrten und Detail-Informationen

Für eine genauere Analyse der Empfangsbedingungen kann eine virtuelle Messfahrt ⑥ eingezeichnet werden, welche die Darstellung verschiedener Verläufe (Höhe, SINR, RSRP und Handover-Informationen) entlang dieser Strecke ermöglicht. Die Position der grünen gestrichelten Linie wird hierbei auf der Messfahrt durch einen kleinen grünen Kreis angezeigt. Durch Ziehen der Linie im Fenster bewegt sich der kleine grüne Kreis auf die entsprechende Position der virtuellen Messfahrt.

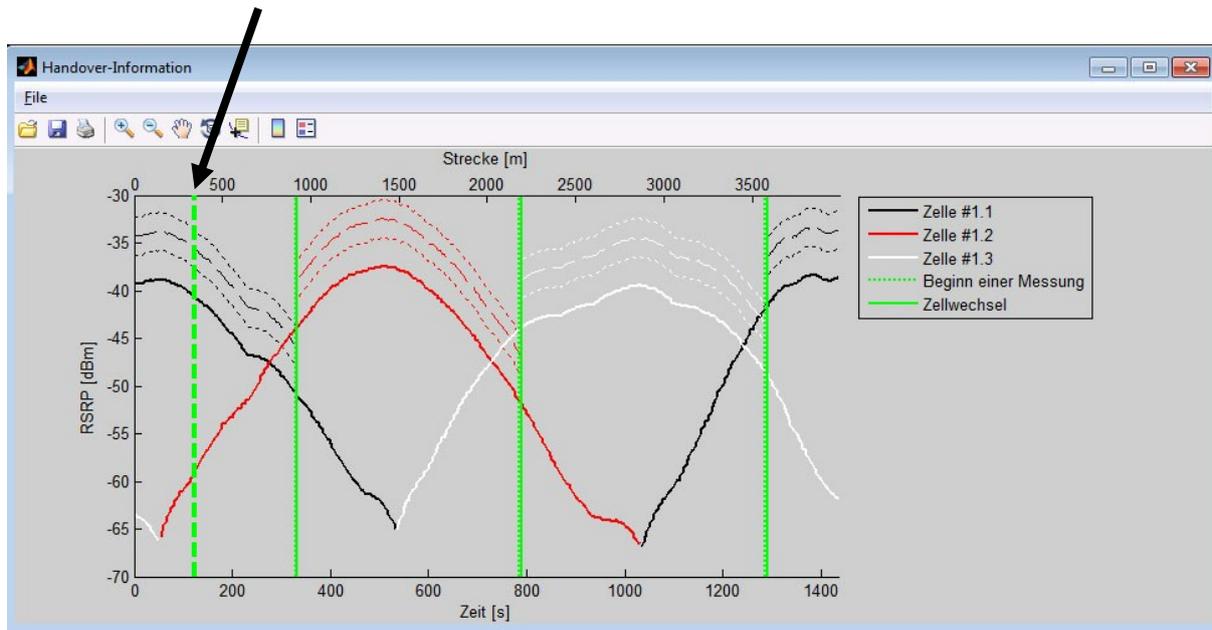


Abbildung 4.11: Virtuelle Messfahrt „Handover-Information“

5. Versuchsdurchführung

Das betrachtete Gebiet umfasst einen realen Ausschnitt aus dem Großraum Hannover. Es beinhaltet sowohl ländliche als auch bebauten Umgebungen. Das Höhengniveau variiert von etwa 45 m bis 165 m. Basierend auf den im Programm hinterlegten Geo-Daten sollen verschiedene Konfigurationen simuliert, analysiert und diskutiert werden. Soweit hierbei nicht anders angegeben, werden für die Antennen dabei die in Tabelle 5.1 angegebenen Standardwerte angenommen.

Antennen	1	2	3
Azimut	0°	120°	240°
Mechanischer Tilt	0°	0°	0°
Sendeleistung	43 dBm	43 dBm	43 dBm
Typ	Kathrein 80010682	Kathrein 80010682	Kathrein 80010682
Gewinn	15,67 dBi	15,67 dBi	15,67 dBi

Tabelle 5.1: Eigenschaften der in den Konfigurationen verwendeten Antennen

Die für den Versuch erforderlichen Netzwerkkonfigurationen sind bereits vorab gespeichert und können über das Menü geladen werden. Nach Abschluss des Ladevorgangs wird die gewählte Konfiguration direkt berechnet (prädiert). Je nach Netzwerkkonfiguration kann dies zwischen einigen Sekunden und ca. einer Minute dauern. Durch einen Klick auf *Empfangsleistungen berechnen* kann dieser Vorgang für geänderte Konfigurationen erneut durchgeführt werden. Sobald die Ergebnisse vorliegen, werden diese im Kartenbereich der GUI angezeigt.

Nach jeder Teilaufgabe sind die Ergebnisse und Ihre Überlegungen mit dem Betreuer zu diskutieren.

5.1. Konfigurationen mit einer eNodeB

Zu Beginn sollen unterschiedliche Konfigurationen einer eNodeB mit 3 Sektoren analysiert werden. Laden Sie dazu die jeweiligen vorgefertigten Konfigurationen in das Programm und berechnen Sie die Empfangsleistungen der Antennen.

5.1.1. Erster Versuch

Laden Sie zunächst „Konfiguration 1“. Diese besteht aus einer eNodeB deren Antennen in einer Höhe von 65 m über dem Boden montiert sind.

- a) Wo kann man charakteristische Ausprägungen der Antennenkonfiguration in den resultierenden Empfangsleistungen (RSRP) sehen?

- b) Wie äußert sich die unterschiedliche Landnutzung in der Berechnung des Okumura-Hata Modells (siehe Kapitel 2.4.2) ?

- c) Wo kann man den Einfluss der Topografie in der RSRP-Karte sehen? Erläutern Sie den auftretenden Effekt.

- d) Ist mit dem Standort die Versorgung des gesamten Szenarios sichergestellt? Belegen Sie Ihre Aussage!

5.1.2. Höherer Standort

Laden Sie nun „Konfiguration 2“. Sie besteht aus einer eNodeB deren Antennen sich in einer Höhe von 161 m über dem Boden befinden.

- a) Welche Unterschiede und Besonderheiten fallen Ihnen bei der resultierenden RSRP-Karte im Vergleich zu „Konfiguration 1“ auf? Nutzen Sie ggf. die Verlauf-Funktion um zwischen der alten Prädiktion und der neuen hin- und her zu wechseln. Beziehen Sie bei Ihren Begründungen die topografischen Informationen und die Parameter des Okumura-Hata Modells mit ein.

- b) Gibt es Unterschiede in der Versorgung? Beschreiben Sie sie.

5.1.3. Niedrigere Frequenz

Berücksichtigen Sie Ihr in der Vorbereitung erworbenes Wissen zu Wellenausbreitung und Prädiktionsmodellen: Welche Unterschiede sind bei einer Änderung der Frequenz von 1800 MHz auf 800 MHz zu erwarten?

Diskutieren Sie ihre Erwartungen mit dem Betreuer und überprüfen Sie sie anschließend durch eine entsprechende Simulation. Ändern Sie dazu für „Konfiguration 2“ die Frequenz von 1800 MHz auf 800 MHz und lassen Sie erneut eine Berechnung der Empfangsleistungen durchführen.

- a) Welche Unterschiede fallen Ihnen bei der resultierenden RSRP-Karte im Vergleich zur vorherigen Konfiguration auf? Gibt es Unterschiede in der Versorgung?

5.2. Konfigurationen mit zwei eNodeBs

Betrachten Sie nun die Empfangsbedingungen und die Interferenzsituation für mehrere eNodeBs.

5.2.1. Zwei Standorte

Stellen Sie die Frequenz auf 1800 MHz zurück und laden Sie „Konfiguration 3“.

- a) Beschreiben Sie Aussehen und Entstehung der Zellflächen, die Sie sich über „Best-Server“ anzeigen lassen können.

- b) Was sehen Sie in der resultierenden SINR-Karte? In welchem Zusammenhang steht diese mit der Best-Server-Karte?

- c) Wie erklären Sie sich die Artefakte im Nordwesten der SINR-Karte? Denken Sie hierbei an die Definition des SINR. Welchen Zellen ist das gute SINR zu verdanken, und warum?

- d) Welche Konsequenzen haben die verschiedenen SINR-Werte für einen Nutzer? Erklären Sie diese mit Hinblick auf die zu erwartende Datenrate eines Nutzers.

5.2.2. Antennen-Tilt und Antennen-Typ

Verwenden Sie weiterhin „Konfiguration 3“. Verändern Sie den mechanischen Tilt von „Antenne 1“ an Standort #1 von 0° auf 10° und lassen Sie die Empfangsleistungen erneut berechnen.

- a) Verbessern oder verschlechtern sich RSRP, SINR und die zu erwartende maximale Datenrate? Wie erklären Sie sich das?

- b) Verändern Sie den Antennen-Typ von „Antenne 1“ an Standort #1 von „Kathrein 80010682“ auf „Kathrein 742212“. Wie unterscheiden sich diese Antennen in ihrem Diagramm? Prädizieren Sie die Empfangsleistungen. Was für Vorteile bzw. Nachteile hat die Verwendung der jeweiligen Antennen?

- c) Setzen Sie die Antenne wieder zurück und die mechanischen Tilts aller Antennen an allen Standorten im Netz auf 10°. Lassen Sie erneut die Empfangsleistungen berechnen. Führt dies zu einer Verbesserung oder Verschlechterung des Netzes? Begründen Sie Ihre Aussage mit Blick auf RSRP, SINR und maximale Datenrate.

5.2.3. Sendeleistung

Laden Sie „Konfiguration 3“ erneut (damit die Veränderung der mechanischen Tilts wieder auf 0° zurückgesetzt wird) und verändern Sie anschließend die Sendeleistung von „Antenne 1“ an Standort #1 von 43 dBm auf 40 dBm.

- a) Wie verändern sich RSRP, SINR und die zu erwartende maximale Datenrate? Wie erklären Sie sich das?

- b) Wenn man die Sendeleistung aller Standorte im Netz von 43 dBm auf 40 dBm reduzieren würde, ergäbe sich dann eine Verbesserung oder eine Verschlechterung des Netzes mit Hinsicht auf RSRP und SINR?

5.3. HO-Betrachtungen anhand einer virtuellen Messfahrt

Ändern Sie die Auflösung der Prädiktionen auf „Entwurf“. Laden Sie „Konfiguration 4“ und zeichnen Sie anschließend eine (ungefähr) kreisförmige Messstrecke um Standort #4 herum, so ähnlich wie dies in Abbildung 5.1 angedeutet ist. Öffnen Sie anschließend das Fenster mit den Handover-Informationen.

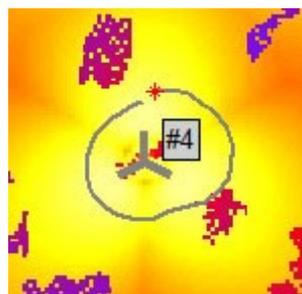


Abbildung 5.1: Virtuelle Messfahrt um einen Standort herum

- a) Identifizieren Sie die Positionen an denen Handover stattfinden. Wie hängen diese mit der Best-Server-Karte zusammen? Vergleichen Sie hierzu das HO-Info-Fenster mit der Karte. Warum treten die Handover nicht direkt auf der Zellgrenze auf?

- b) Wie würde sich eine Vergrößerung bzw. eine Verkleinerung der Werte der Parameter *Hysterese* bzw. *TimeToTrigger* auf die Position der Handover auswirken? Begründen Sie Ihre Einschätzung.

5.4. Optimierung einer bestehenden Netzkonfiguration

Für das gesamte Szenario soll nun eine Optimierung erfolgen. Belassen Sie die Auflösung auf „Entwurf“ und laden Sie „Konfiguration 5“ in das Programm. Das Durchführen der Berechnung der Empfangsleistungen wird bei dieser Konfiguration ein wenig mehr Zeit in Anspruch nehmen.

- a) Sobald die Prädiktion geladen ist, benennen Sie etwaige Problemstellen in dem vorliegenden Netzwerk, mit Hinblick auf die Versorgung und die Auslastung.

Ihre Aufgabe ist es nun, anhand der zuvor erlernten Möglichkeiten zur Optimierung, diese so einzusetzen, dass die folgenden Anforderungen erfüllt werden:

- das Erreichen einer maximalen Versorgung
- das Minimieren von Interferenzen
- eine Kapazitätsplanung, die sich am gemessenen Bedarf orientiert (*Nutzerintensitätskarte*) und in der Lage ist, diesen vollständig abzuführen (keine Zelle in Überlast)
- belassen Sie es bei so wenig Standorten wie möglich

- b) Wiederholen Sie ihre Optimierungen solange, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis vorliegt. Diskutieren Sie anschließend die Änderungen mit dem Betreuer und begründen Sie die vorgenommenen Änderungen.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Holma und A. Toskala, LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 2009.
- [2] T. Kürner, *Planung terrestrischer Funknetze*, Braunschweig, 2012.
- [3] European Communications Office, „SEAMCAT® Handbook,“ Januar 2010. [Online]. Available: <http://www.ero.dk/4494FE08-FE9C-4E0A-BD13-159B749DA6A1?frames=no&>.
- [4] J. Deygout, „Multiple knife-edge diffraction of microwaves,“ *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Bd. 14, Nr. 4, pp. 480 - 489, Jul 1966.
- [5] J. H. Causebrook und B. Davies, „Tropospheric radio wave propagation over irregular terrain: The computation of field strength for UHF broadcasting,“ *BBC R&D Report 1971-43*, 1971.
- [6] T. Rechenbach, „LTE Advanced - Was soll die vierte Mobilfunkgeneration können?,“ *NET Zeitung für Kommunikationsmanagement*, Nr. 3, pp. 44-47, 2012.
- [7] *3GPP TS 36.331*, 2012.
- [8] V. Erceg, L. J. Greenstein, S. Y. Tjandra, S. R. Parkoff, A. Gupta, B. Kulic, A. A. Julius und R. Bianchi, „An Empirically Based Path Loss Modell for Wireless Channels in Suburban Environments,“ *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 17, No. 7, pp. 1205-1211, Juli 1999.
- [9] S. Newman, B. Hurley, J. Peha, P. Amodio, B. G. Ziad Sleem, J. Goldthorp, J. Leibovitz, T. Peters, W. Johnston, M. Iandolo, J. Stanshine, Y. Chang, K. Jacob und J. A. Manner, „A Broadband Network Cost Model“.
- [10] „OpenStreetMap,“ [Online]. Available: www.openstreetmap.org.

