
Einleitung

Zukünftige Mobilfunknetze werden eine große Anzahl unterschiedlicher Dienste anbieten. Dies spiegelt sich auch in der Entwicklung der Mobilfunkstandards wider. Während sich der Mobilfunkstandard GSM im Wesentlichen auf die Sprachübertragung konzentriert, stehen unterschiedliche und auch hochratige Datendienste bei dem aktuellen Standard Long Term Evolution (LTE) im Vordergrund. Diese Dienste variieren in den sogenannten Quality of Service (QoS) Parametern wie der Datenrate, der zulässigen Verzögerung und der geforderten Paketfehlerrate. Aus diesem Grund muss die Forderung nach hoher Flexibilität und Adaptivität bereits beim Systementwurf berücksichtigt werden.

In dieser Arbeit wird ein Systemvorschlag für ein zellulares Mobilfunknetz entwickelt und die resultierende Leistungsfähigkeit durch modellhafte Betrachtungen quantitativ untersucht. Eine wichtige grundsätzliche Systemeigenschaft besteht darin, dass die zellulare Umgebung durch ein Gleichwellennetz mit einer adaptiven sowie selbstorganisierenden Zeit- und Trägersynchronisation beschrieben wird. Dadurch können Ressourcen sehr flexibel zwischen benachbarten Basisstationen ausgetauscht und Interzellinterferenzen gering gehalten werden. Für den Systementwurf werden zusätzlich drei wichtige Komponenten betrachtet:

- In der Modulationstechnik wird die Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Übertragungstechnik vorgeschlagen.
- In jeder Basisstation werden mehrere und in der Mobilstation (MT) jeweils eine Sende- / Empfangsantenne eingesetzt.
- Für die Ressourcenvergabe innerhalb einer Zelle wird ein selbstorganisierender Ansatz verfolgt.

Die OFDM Übertragungstechnik bietet die geforderte Flexibilität und Adaptivität in Bezug auf den frequenzselektiven und zeitvarianten Funkkanal. Bei dieser Technik

wird die gesamte Bandbreite in Schmalbandkanäle unterteilt, die sogenannten Subträger. Den MTs werden dabei Ressourcen zugeordnet, die im Folgenden als Zeit-Frequenzblöcke bezeichnet werden und die aus mehreren OFDM-Symbolen und mehreren Subträgern bestehen. Mit der Kanalkennntnis in den Basisstationen über sämtliche im Versorgungsbereich befindlichen MTs kann die Ressourcenzuteilung somit sehr flexibel und effizient umgesetzt werden.

Weiterhin kann die Systemflexibilität durch den zusätzlichen Einsatz von mehreren Sendeantennen in der Basisstation erhöht werden. Dadurch wird eine Versorgung mehrerer MTs auf dem gleichen Zeit-Frequenzblock ermöglicht. Die beim Vielfachzugriff zur Verfügung stehenden Ressourcen beziehen sich in diesem Fall auf Zeit-Frequenz-Raumblöcke. Mit dieser Technik kann, bei gleichzeitig hoher Wiederverwendung der verfügbaren Ressourcen innerhalb des zellularen Netzes, die resultierende Datenrate wesentlich erhöht werden.

Die Aufteilung der im gesamten Netz verfügbaren Ressourcen unter den Basisstationen stellt einen weiteren wichtigen Aspekt für den Systementwurf dar. Für eine effiziente Nutzung der Ressourcen ist es unabdingbar, dass dieselben Zeit-Frequenzblöcke von unterschiedlichen Basisstationen genutzt werden können, sofern diese sich nicht oder nur gering gegenseitig beeinträchtigen. Bei klassischen Netzplanungstechniken werden die Ressourcen von vornherein exklusiv und weitestgehend interferenzfrei an die Basisstationen vergeben, ohne dass die momentane Nutzerverteilung innerhalb der zellularen Umgebung mit einbezogen wird. Im Gegensatz dazu wird in dieser Arbeit ein Gleichwellennetz betrachtet, bei dem sämtliche Basisstationen über die gesamte Systembandbreite verfügen. Das Gleichwellennetz ist deshalb in der Lage, die Ressourcen dort zur Verfügung zu stellen, wo sie benötigt werden. Dies ist eine sehr vorteilhafte Systemeigenschaft, sofern in der zellularen Umgebung eine ungleichmäßige Nutzerverteilung vorliegt.

Um Störungen in dem selbstorganisierenden Netz von benachbarten Zellen zu vermeiden, wird die Ressourcenvergabe bei dem vorgeschlagenen Systemkonzept auf Basis von Interferenzmessungen durchgeführt. Zu diesem Zweck führt jede Basisstation kontinuierlich Messungen der Interferenzleistung auf den Zeit-Frequenz-Raumblöcken durch. Das MT, welches neue Ressourcen anfordert, vermisst ebenfalls die Interferenzleistung auf den Zeit-Frequenzblöcken und signalisiert das Messergebnis an die Basisstation. Anhand dieser Informationen werden jedem MT individuelle Ressourcen von der jeweils zuständigen Basisstation zugeteilt, die geringe

Interferenzleistungen aufweisen. Grundvoraussetzung dafür ist, dass sämtliche Basisstationen und MTs in einem OFDM basierten System zeit- und trägersynchronisiert sind. Im Falle von Nachbarzellstörungen beeinträchtigen diese Interferenzen somit nicht das gesamte Spektrum, sondern lediglich den jeweiligen Subträger.

In diesem selbstorganisierenden Ansatz tauschen die Basisstationen keine Informationen über das kabelgebundene Basisnetz aus. Im Gegensatz dazu erfordert der aktuelle Standard LTE einen hohen Signalisierungsaufwand innerhalb des Kernnetzes. Neben der geringeren Komplexität für das Kernnetz sind solche selbstorganisierenden Systeme auch ohne großen Aufwand durch weitere Funkzellen erweiterbar. Die Basisstationen erfüllen für die höheren Protokollschichten weitestgehend die Aufgabe von WLAN Access Points, weswegen Szenarien wie Handover unter Einhaltung der QoS-Anforderungen schwer zu realisieren sind. Daher werden in dieser Arbeit ausschließlich Szenarien herangezogen, in denen sich die MTs mit geringer Geschwindigkeit fortbewegen und sich somit während der Übertragungszeit innerhalb einer Zelle aufhalten.

Die Arbeit gliedert sich wie folgt: In Kapitel 2 wird auf den Mobilfunkkanal eingegangen, welcher die Randbedingungen für drahtlose Kommunikationssysteme vorgibt. Die OFDM-Übertragungstechnik und die Mehrantennensysteme werden in Kapitel 3 und 4 behandelt. Kapitel 5 diskutiert die Versorgung mehrerer Nutzer auf einem Zeit-Frequenzblock mit Hilfe von Beamforming-Techniken und behandelt die Frage der Gruppierung von Nutzern. Der Aspekt der Ressourcenvergabe innerhalb einer Zelle wird in Kapitel 6 erörtert. Für die Ressourcenvergabe werden Algorithmen betrachtet, die sowohl die Kenntnis der physikalischen Schicht als auch der Data Link Control Schicht mit einbeziehen. Kapitel 7 stellt das Systemkonzept vor und analysiert wichtige Einflussgrößen auf die Auslegung des Systems. Die quantitative Auswertung des Systemkonzepts erfolgt in Kapitel 8 und die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit sind in Kapitel 9 zusammengefasst.



Mobilfunkkanal

Der Mobilfunkkanal gibt die Randbedingungen für ein drahtloses Kommunikationssystem vor. Zur Bewertung der einzelnen Komponenten eines Übertragungssystems, wie z.B. Modulation, Codierung und Mehrantennentechniken, werden im Allgemeinen Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Daher ist die Abbildung des Kanals in einem Modell von entscheidender Bedeutung für die Auswertung. Im Rahmen dieser Ausarbeitung wird im Wesentlichen das Kanalmodell gemäß WINNER betrachtet [WIN05]. WINNER ist eine Arbeitsgemeinschaft unter der Leitung von Nokia Siemens Networks, deren Ziel die Steigerung der Leistungsfähigkeit von Mobilfunksystemen ist. Unter anderem werden in WINNER Szenarien definiert, die zukünftige Anforderungen an Mobilfunksysteme abbilden. Insbesondere die Korrelation der Kanäle in Mehrantennensystemen von einem MT zur Basisstation hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Performanz. In WINNER wurden daher Mobilfunkkanäle in diversen Umgebungen vermessen, um anhand dessen stochastische Kanalmodelle zu entwerfen. Diese erlauben die quantitative Bewertung von Systemen und Algorithmen in realen Szenarien. Die in dieser Arbeit analysierten Szenarien beschränken sich auf die ländliche und städtische Umgebung für Makrozellen (D1 und C2).

In dem Kanalmodell werden mehrere Cluster von Ausbreitungspfaden nach statistischen Verteilungen ausgewürfelt. Das Empfangssignal setzt sich demzufolge aus der Superposition der Signale von unterschiedlichen Ausbreitungspfaden zusammen. Dies ist schematisch anhand zweier Cluster in Abbildung 2.1 für den Kanal zwischen einer Basisstation, ausgestattet mit einem linearen Antennenarray (Uniform Linear Antenna Array - ULA), und einem MT dargestellt. In Abhängigkeit des Szenarios können zudem line-of-sight (LOS) Pfade auftreten. Ein wichtiger Punkt für die Simulation besteht in einer handhabbaren Komplexität des Kanalmodells. Aus diesem Grund werden zeitliche Kanalsegmente definiert, in denen sich die sogenannten Langzeitparameter nicht ändern.

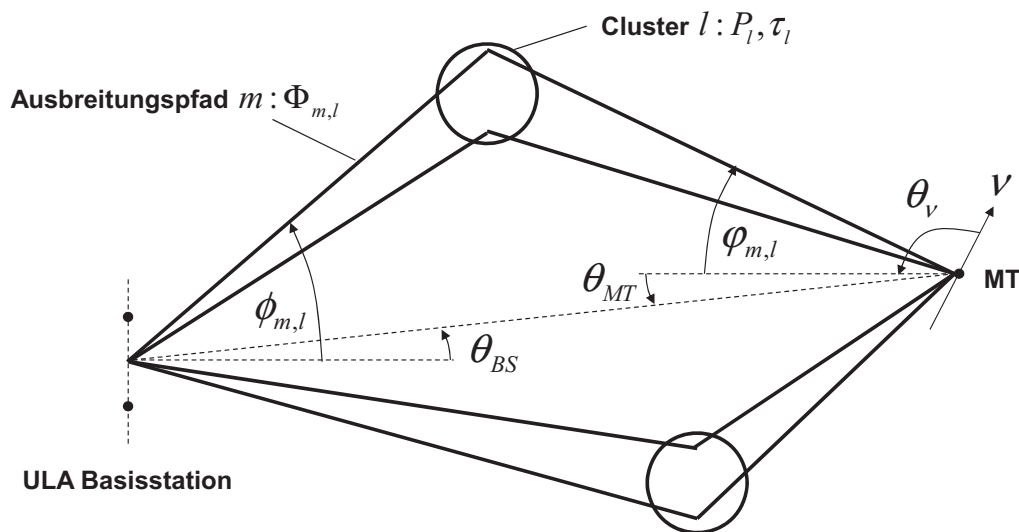


Abbildung 2.1: Kanalmodell nach WINNER

Zu den Langzeitparametern gehören:

- Pfaddämpfung A
- Shadow-Fading σ_{SF}
- Laufzeitverzögerung τ_l
- Abstrahl- und Einfallswinkel $\phi_{m,l}$, $\varphi_{m,l}$

Die Pfaddämpfung beschreibt die Dämpfung des Sendesignals auf Grund der Distanz zwischen Basisstation und dem MT. Schwund, der durch Reflexion, Brechung, Streuung und Beugung an Objekten entlang der Ausbreitungspfade hervorgerufen wird, ist durch das Shadow-Fading abgebildet. Zudem weisen alle Ausbreitungspfade unterschiedliche Laufzeitverzögerungen sowie Abstrahl- und Einfallswinkel auf.

Innerhalb eines Kanalsegments wird darüber hinaus Fast-Fading und frequenzselektives Fading beobachtet. Verbunden mit den Laufzeitverzögerungen und der Abschattung überlagern sich die Empfangssignale von unterschiedlichen Ausbreitungspfaden im Empfänger phasenverschoben. Diese Phasenverschiebung ist sowohl

von der Frequenz abhängig als auch von der Zeit und resultiert in konstruktiver oder destruktiver Interferenz. In Abbildung 2.2 ist exemplarisch eine zeitvariante Kanalübertragungsfunktion für ein MT in städtischer Umgebung (C2) mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h und einer Trägerfrequenz von 5 GHz dargestellt. Die wesentlichen Parameter für das Kanalmodell sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

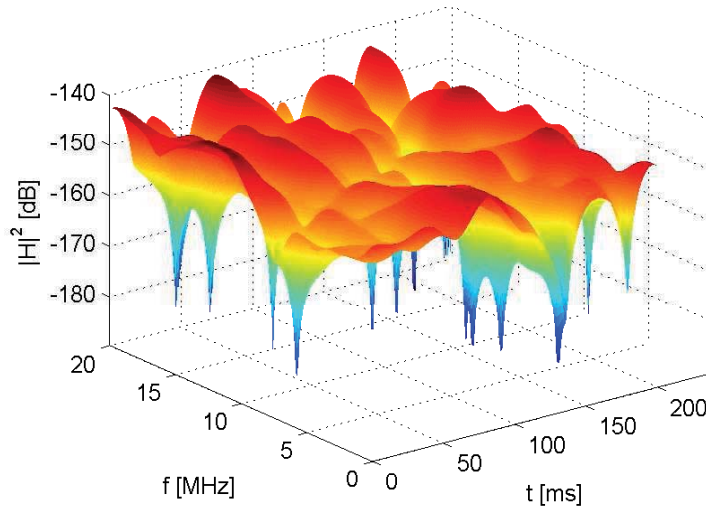


Abbildung 2.2: Zeitvariante und frequenzselektive Kanalübertragungsfunktion, Geschwindigkeit: 5 km/h, Trägerfrequenz: 5 GHz

Die Pfaddämpfung in Abhängigkeit der Distanz fließt direkt in die Leistung aller Ausbreitungspfade ein. Mit diesen Parametern berechnet sich die Impulsantwort zwischen dem MT und dem Antennenelement s der Basisstation nach Gleichung (2-1). Für das MT wird dabei lediglich eine Antenne ohne Antennengewinn angenommen.

$$h_s(t, \tau) = \sum_{l=1}^L \sqrt{P_l \sigma_{SF}} \sum_{m=1}^M \left(\begin{array}{c} \sqrt{G_t(\phi_{m,l})} e^{j(\frac{2\pi}{\lambda} s d \sin(\phi_{m,l}) + \Phi_{m,l})} \\ e^{j\frac{2\pi}{\lambda} |\vec{v}| \cos(\phi_{m,l} - \theta_v) t} \end{array} \right) \delta(\tau - \tau_l) \quad (2-1)$$

Im Falle eines LOS-Pfades wird Gleichung (2-2) für die Berechnung der Impulsantwort herangezogen.

$$h_{s,\text{LOS}}(t, \tau) = \sqrt{\frac{1}{K+1}} h_s(t, \tau) + \sqrt{\frac{\sigma_{\text{SF}} K}{K+1}} \begin{pmatrix} \sqrt{G_t(\theta_{\text{BS}})} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} s d \sin(\theta_{\text{BS}})} \\ e^{j \frac{2\pi}{\lambda} |\vec{v}| \cos(\theta_{\text{MT}} - \theta_v) t} \end{pmatrix} \delta(\tau - \tau_{\text{LOS}}) \quad (2-2)$$

Tabelle 2.1: Parameter des Kanalmodells

A	Pfaddämpfung in Abhängigkeit der Distanz d : $A[\text{dB}] = a \cdot \log_{10}(d[\text{m}]) + b$
σ_{SF}	Schwund durch Abschattung
l	Index des Clusters
m	Index des Ausbreitungspfades
P_l	Leistung des l -ten Clusters
τ_l	Laufzeitverzögerung
$\phi_{m,l}, \varphi_{m,l}$	Abstrahl-, Einfallswinkel
$\Phi_{m,l}$	Phasendrehung des Ausbreitungspfades
$\theta_{\text{BS}}, \theta_{\text{MT}}$	Abstrahl-, Einfallswinkel des LOS -Pfades
$G_t(\phi)$	Antennengewinn einer Antenne der Basisstation
λ	Wellenlänge
d	Abstand zwischen benachbarten Antennenelementen
$\vec{v}$	Geschwindigkeitsvektor des MTs
θ_v	Winkel des Geschwindigkeitsvektors
K	Rice-Faktor

2.1 Kreuzkorrelation der Langzeitparameter

Abgesehen von der Pfaddämpfung werden die Langzeitparameter per Zufallsvariable modelliert, deren Verteilungsfunktion anhand von Messungen ermittelt wurde [WIN05]. Darüber hinaus wurden Korrelationen zwischen den Langzeitparametern eines Kanals festgestellt. So resultiert beispielsweise eine große Streuung der Laufzeitverzögerung in einer großen Streuung des Einfallswinkels. Interessanterweise geht jedoch ein höheres Shadow-Fading mit einer geringeren Streuung der Laufzeitverzögerung einher. Die Korrelation zwischen diesen Parametern wird mit $\rho_{x,y}$ angegeben, wobei x und y die jeweiligen Parameter repräsentieren (siehe Tabelle 2.2). Diese Korrelationen beziehen sich auf die Verbindung zwischen einer Basisstation und einem MT. Darüber hinaus können auch Korrelationen der Langzeitparameter mehrerer MTs zu einer Basisstation (Abbildung 2.3 (a)) oder eines MTs zu mehreren Basisstationen (Abbildung 2.3 (b)) beobachtet werden.

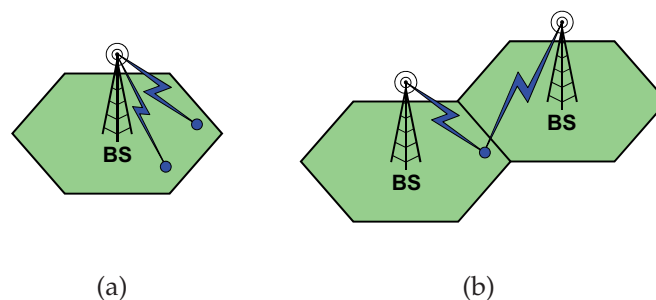


Abbildung 2.3: Korrelation der Langzeitparameter von mehreren Kanälen

Die Korrelationen dieser Langzeitparameter sind auf Objekte in der direkten Umgebung der MTs und der Basisstationen zurückzuführen. Während der erste Fall aus Gründen der Komplexität nicht in das verwendete Kanalmodell einfließt, wird für den zweiten Fall eine Korrelation der Langzeitparameter analog zu [3GP07] angenommen. Diese beschränkt sich auf die Korrelation ζ des Shadow-Fadings. Die Streuung der Zufallsvariablen von Shadow-Fading, Laufzeitverzögerung und Abstrahl- sowie Einfallswinkel wird als Funktion von korrelierten Gaußschen Zufallsvariablen κ_i bestimmt.

$$\begin{aligned}
 \sigma_\tau &= 10^{\varepsilon_\tau \cdot \kappa_\tau + \mu_\tau} \\
 \sigma_\phi &= 10^{\varepsilon_\phi \cdot \kappa_\phi + \mu_\phi} \\
 \sigma_\varphi &= 10^{\varepsilon_\varphi \cdot \kappa_\varphi + \mu_\varphi} \\
 \sigma_{\text{SF}} &= 10^{\sigma_{\text{SF,dB}} \cdot \kappa_{\text{SF}} / 10}
 \end{aligned}$$

In [WIN05] wurden die Parameter ε_i und μ_i anhand von Kanalmessungen bestimmt. Die korrelierten Gaußschen Zufallsvariablen κ_i werden mittels unkorrelierter Gaußscher Zufallsvariablen w_i und ζ gemäß Gleichung (2-3) erzeugt.

$$\begin{pmatrix} \kappa_\tau \\ \kappa_\phi \\ \kappa_\varphi \\ \kappa_{\text{SF}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{\tau,\phi} & \rho_{\tau,\varphi} & \rho_{\tau,\text{SF}} \\ \rho_{\tau,\phi} & 1 & \rho_{\phi,\varphi} & \rho_{\phi,\text{SF}} \\ \rho_{\tau,\varphi} & \rho_{\phi,\varphi} & 1 & \rho_{\varphi,\text{SF}} \\ \rho_{\tau,\text{SF}} & \rho_{\phi,\text{SF}} & \rho_{\varphi,\text{SF}} & 1 - \zeta \end{pmatrix}^{1/2} \cdot \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sqrt{\zeta} \zeta \end{pmatrix} \quad (2-3)$$

Die Zufallsvariable ζ repräsentiert die Korrelation des Shadow-Fadings und wird pro Kanalsegment einmalig für alle Kanäle eines MTs gewürfelt. Alle weiteren Zufallsvariablen w_i werden unabhängig für jeden Kanal ausgewürfelt. Die Werte der Korrelationen sind in Tabelle 2.2 für die betrachteten Kanalmodelle angegeben.

Tabelle 2.2: Korrelation der Langzeitparameter

Korrelation	C2	D1	
	NLOS	LOS	NLOS
$\rho_{\tau,\phi}$	0.4	-0.1	-0.4
$\rho_{\tau,\varphi}$	0.6	0.2	0.1
$\rho_{\phi,\varphi}$	0.4	-0.3	-0.2
$\rho_{\tau,\text{SF}}$	-0.4	-0.5	-0.5
$\rho_{\phi,\text{SF}}$	-0.6	0.2	0.6
$\rho_{\varphi,\text{SF}}$	-0.3	-0.2	0.1
ζ	0.5	0.5	0.5