

# Analytische Modellierung der Sendeleistungsregelung und deren Einflüsse auf die Kapazität und Planung von Wideband CDMA Systemen

Kenji Leibnitz

leibnitz@ist.osaka-u.ac.jp

**Abstract:** Das Ziel dieser Arbeit ist die Herleitung analytischer Modelle, um eine Leistungsbewertung von Mobilfunksystemen der dritten Generation (3G) zu ermöglichen. Als eine der wichtigsten Einflussfaktoren wird das dynamische Verhalten der Sendeleistungsregelung (engl. *power control*) erachtet. Die Aufgabe von Power Control ist es die Leistung der Sendestation derart einzustellen, dass sie möglichst minimal ist, jedoch auch den Mindestanforderungen für die empfangene Signalleistung genügt. Durch dieses dynamische Verhalten entsteht eine Wechselwirkung zwischen der Zellgröße, Kapazität und der Dienstgüte im System. Es ist daher von entscheidender Wichtigkeit vor der Einführung neuer Systeme die Systemstabilität zu untersuchen und alle Einflussfaktoren zu identifizieren.

## 1 Einführung in UMTS und WCDMA

Derzeit vollzieht sich ein Paradigmenwechsel bei der Entwicklung von Mobilfunksystemen. Der Übergang von Systemen, die nur reine Sprachdienste anbieten, zu den sogenannten Systemen der dritten Generation (3G) steht unmittelbar bevor oder hat bereits in einigen Ländern begonnen. Dies ermöglicht die Einführung neuer Dienste im Mobilfunk, die bisher nur im Festnetzbereich verfügbar waren. Die steigende Bedeutung von Internetanwendungen, wie Browsen im World Wide Web oder das Senden und Empfangen von Electronic Mail, hat es erforderlich gemacht, dass viele Benutzer von überall her Zugang zu diesen Diensten haben wollen, wie sie es von der Benutzung eines Mobiltelefons gewohnt sind.

Jedoch erfordern diese neuen Anwendungen auch eine höhere Bandbreite als Sprachverkehr und benötigen somit die Einführung neuer Technologien, die eine Übertragung von durchschaltevermitteltem und paketorientiertem Verkehr ermöglichen. Die Tendenzen, die hier gesehen werden können, führen zu einer allmählichen Konvergenz des Internets und des Mobilfunkbereichs. Bisher existiert im Mobilfunk eine Vielzahl heterogener Systeme, die von den Anbietern in den verschiedenen Ländern oder Kontinenten mit unterschiedlichen Zugriffstechnologien angeboten werden. Zum Beispiel werden in Europa fast ausschließlich GSM-Dienste angeboten, während in den USA nur eine eingeschränkte Versorgung mit GSM stattfindet und andere Systeme, wie z.B. AMPS oder cdmaOne, hauptsächlich in Gebrauch sind. Ein Ziel der Standardisierungsgremien für 3G war es

daher ein einheitliches System zu schaffen, das ein globales Roaming unterstützt.

Für 3G wird mit Wideband CDMA eine neue Technologie für die Luftschnittstelle eingeführt [3G99], die eine höhere Kapazität als schmalbandige Systeme hat. Jedoch erfordern die signifikanten Unterschiede zwischen Wideband CDMA und den konventionellen Systemen der zweiten Generation auch neue Paradigmen bei der Dimensionierung und Planung der Netze. Anders als bei GSM ist die Kapazität bei CDMA-basierten Netzen nicht fest und diese „weichen“ Kapazitätsgrenzen (engl. *soft capacity*) führen zu einer Neudefinition des Begriffs der Zellgröße. Sie ist bei CDMA Netzen nicht mehr lediglich von den Ausbreitungsbedingungen festgelegt, sondern bildet sich vielmehr aus der Interaktion zwischen Versorgung, Kapazität und Dienstgüte.

Im Anschluss folgt eine kurze Einführung in die Grundprinzipien der CDMA Technologie und es werden die wichtigsten Einflussfaktoren bei der Bewertung der Systemkapazität vorgestellt. Dies wird im Abschnitt 2 gefolgt von der Herleitung der analytischen Modelle der Regelkreisläufe bei der Sendeleistungsregelung in CDMA. Nach der Leistungsuntersuchung für einen Nutzer, wird die Untersuchung in Abschnitt 4 auf die Bewertung des gesamten Systems ausgeweitet. Ein Modell mit einem räumlichen Punktfeld wird verwendet um die zufälligen Nutzerpositionen zu charakterisieren. Die gewonnen Ergebnisse können als Hinweise für eine verkehrs-orientierte Funknetzplanung verstanden werden.

### 1.1 Prinzipien von Code Division Multiple Access

Bei jedem Kommunikationssystem, bei dem viele Benutzer gleichzeitig eine gemeinsame Ressource nutzen, ist ein Mehrfachzugriffsverfahren erforderlich. Alle Teilnehmer konkurrieren um einen oft nur begrenzten Vorrat an Ressourcen, z.B. eine begrenzte Anzahl an Funkkanälen. Dies trifft vor allem bei der Kommunikation in Mobilfunksystemen zu, bei denen das Nutzsignal auf einen Funkträger in einem sehr begrenzten Frequenzspektrum aufmoduliert wird. Das Mehrfachzugriffssystem wird benötigt, um die Bandbreite effizient zu nutzen und eine hohe Systemkapazität zu erreichen.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Zugriffsverfahren wie F/TDMA (Frequency/Time Division Multiple Access) bei GSM, bei dem ein Zeitschlitz in einem Frequenzband einem Benutzer für die gesamte Dauer seiner Übertragung zur Verfügung steht, verwendet CDMA (Code Division Multiple Access) orthogonale Codes, um die einzelnen Verkehrskanäle zu trennen. CDMA basiert auf der *Spread Spectrum* Technologie und wurde in der Mitte der 1950er Jahre ursprünglich für militärische Anwendungen entwickelt, aufgrund seiner Robustheit gegenüber Störung und seiner hoher Abhörsicherheit [Vi95].

Die Signalspreizung wird in CDMA durch Modulation des Nutzsignals auf einen rauschähnlichen Träger mit einer höheren Frequenz durchgeführt. Der Vorteil bei der Verwendung eines Rausch-Trägers liegt darin, dass das Signal robuster gegenüber Störung wird. Jedoch, da das Signal jedes Nutzers auf der Luftschnittstelle als Rauschen erscheint, trägt es auch somit zur gesamten Interferenz bei. Da die Verbindung eine Mindestqualität hinsichtlich *bit-energy-to-noise ratio* ( $E_b/N_0$ ) erfordert, limitiert somit die Interferenz im Endeffekt die Kapazität von CDMA Systemen.

## 1.2 Power Control

Alle Benutzer in einem CDMA System teilen sich das Frequenzband und interferieren miteinander. Weiterhin befinden sich die Mobilstationen (MS) auf unterschiedlichen Positionen mit unterschiedlichen Entfernungen zur Basisstation (BS). Falls jeder Benutzer mit der gleichen Signalstärke übertragen würde, würden näher an der BS gelegene Teilnehmer über die weiter entfernten dominieren. Dies ist in der Literatur als *Near-Far Effect* bekannt. Um effizient ablaufen zu können, erfordert CDMA, dass alle Teilnehmer mit nahezu gleichen Signalstärken an der BS empfangen werden. Dafür wurde eine Sendeleistungsregelung (engl. *Power Control*) implementiert, bei dem der Empfänger die Signalleistung des Senders regelt, um eine vorgegebenen Signalgüte an empfangener  $E_b/N_0$  einzuhalten.

Bei CDMA Systemen werden zwei Arten von Power Control auf dem Uplink (MS-BS Verbindung) verwendet: *Open Loop* und *Closed Loop*. Bei Open Loop Power Control verwendet die MS die empfangene Signalstärke des Pilotkanals der BS als Schätzwert für den Ausbreitungsverlust und setzt die Sendestärke dementsprechend. Zusätzlich dazu arbeitet Closed Loop in Wechselwirkung zwischen MS und BS, um die Fluktuationen auf dem Funkkanal zu überwinden. Die Closed Loop Schleife besteht aus *Inner Loop* und *Outer Loop*, siehe Abb. 1. Innerhalb der Inner Loop überprüft die BS andauernd die Verbindungsqualität durch den empfangenen  $E_b/N_0$ -Wert und vergleicht ihn mit einem Schwellwert. Falls der empfangene Wert zu hoch ist, wird die MS angewiesen ihre Sendestärke zu verringern. Andernfalls, ist die Verbindungsqualität nicht ausreichend und ein *Power-Up* Kommando wird übertragen. Die Zeiteinheit für diese Power Updates wird als Power Control Groups (PCG) bezeichnet und beträgt bei UMTS 0.67 ms.

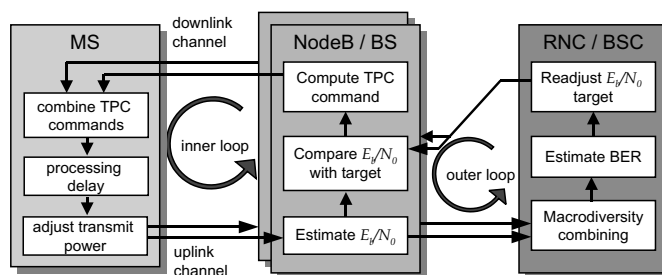


Abbildung 1: Kreislauf der Closed Loop Power Control bei UMTS

Nachdem ein kompletter Rahmen übertragen worden ist, geht der Power Control Algorithmus in die Outer Loop über. Deren Hauptaufgabe ist es eine akzeptable Rahmenfehlerrate (*frame error rate*, FER) durch die Anpassung des  $E_b/N_0$  Schwellwertes nach jedem Rahmen zu erreichen.

### 1.3 Das Universal Mobile Telecommunication System (UMTS)

Das *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS) ist der europäische Beitrag zur 3G Standardisierung. Es ist Teil von dem Ansatz der ITU um eine globale Familie von 3G Systemen als IMT-2000 (International Mobile Telephony) zu vereinheitlichen. Das Hauptziel ist es die Systeme der zweiten Generation zu ersetzen und schnelle, paket-orientierte Mobilfunkverbindungen zu ermöglichen.

Die Luftschnittstelle von UMTS wird bezeichnet als UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access) und verwendet WCDMA (Wideband CDMA) bei Datenraten zwischen 12.2 kbps bei Sprache bis hin zu 2 Mbps für Multimediaanwendungen. UMTS unterstützt Power Control auf dem Up- und Downlink.

## 2 Analytische Modellierung von Power Control

### 2.1 Modell der Inner Loop

Die Sendestärke der betrachteten MS wird im Folgenden mit dem abstrakten Index  $j$ ,  $0 \leq j \leq J$  bezeichnet. Sei  $P^{(n)}$  eine Zufallsvariable für die Sendestärke der MS zum Zeitpunkt  $n$ .

Das ursprüngliche Signal wird auf dem Uplink durch den Kanalverlust abgeschwächt. Im vorliegenden Modell wird der Kanalverlust stochastisch mit der Zufallsvariable  $G^{(n)}$  beschrieben. Die Wahrscheinlichkeit für Power-Up und Power-Down Kommandos unter der Bedingung, dass die betrachtete MS zum Zeitpunkt  $n$  mit Stärke  $j$  sendet, ist gegeben durch

$$p_u^{(n)}(j) = \Pr \left[ \varepsilon^{(n)} \leq \theta \mid P^{(n)} = j \right] \quad (1)$$

und  $p_d^{(n)} = 1 - p_u^{(n)}$ .

Weiterhin wird angenommen, dass die betrachtete MS  $i$  sich bei einer Entfernung von  $x$  zu der BS befindet und mit einer Signalstärke  $P_i$  sendet. Bei der Übertragung zur BS wird das Signal durch den Ausbreitungsverlust  $L(x)$ , Abschattung und Mehrwegeschwund abgeschwächt und wird nach einer Verzögerung  $\delta$  mit der Stärke  $S_i$  an der BS empfangen. In der Literatur existieren viele Modelle, die den Ausbreitungsverlust charakterisieren, siehe z.B. [Ra96, Wa98].

Verlust durch Abschattung wird im Allgemeinen mit einer normalverteilten Zufallsvariable mit Mittelwert 0 dB und einer Standardabweichung von 7–8 dB modelliert. Wir können daher den Gesamtverlust auf dem Uplink durch eine normalverteilte Zufallsvariable  $G^{(n)}$  annehmen, mit einem Mittelwert von  $L(x)$  abhängig von der Distanz zwischen MS und BS und der Standardabweichung  $\sigma_G$ .

Mit Hilfe des Multi-Access Interference (MAI) Faktors  $\varphi$  lässt sich  $E_b/N_0$  in einer sehr

vereinfachten Form als

$$\varepsilon^{(n)} = P^{(n)} + G^{(n)} + \underbrace{W - R - N + \varphi}_{\chi=\text{constant}}, \quad (2)$$

darstellen, wobei  $W$  die Frequenzbandbreite,  $R$  die Datenrate und  $N$  das Hintergrundrauschen sind.

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Power-Up Kommando zum Zeitpunkt  $n$  gesendet wird, kann dadurch berechnet werden, indem  $\varepsilon^{(n)}$  mit  $\theta$  verglichen werden.

$$p_u^{(n)}(j) = \Pr \left[ G^{(n)} \leq \theta - j \right] \quad (3)$$

## 2.2 Modell der Outer Loop

Der Schwellwert der Outer Loop wird erhöht falls der Rahmen fehlerhaft ist, ansonsten wird er verringert. Sei  $B$  die Anzahl von Bits pro Rahmen. Ein fehlerhafter Rahmen tritt auf, wenn mindestens ein Bit im Rahmen einen Fehler hat. Daher kann die Wahrscheinlichkeit  $q_u(i)$  für eine Erhöhung und  $q_d(i)$  für eine Verringerung des Schwellwerts  $\theta$  von Stufe  $i$  durch eine Binomial-Verteilung angenommen werden.

$$q_u(i) = 1 - (1 - p_b(i))^B \quad q_d(i) = 1 - q_u(i). \quad (4)$$

Diese Gleichungen beruhen auf der Annahme, dass ein Interleaving den Auftritt von Bitfehlern innerhalb eines Rahmens unabhängig voneinander macht. Zwecks Vereinfachung wird weiter angenommen, dass der  $E_b/N_0$  Schwellwert durch einen maximalen Wert  $M$  beschränkt wird.

## 2.3 Markov-Ketten Modell

Um ein Modell herzuleiten, das beide Schleifen beinhaltet, wird eine Markov-Kette mit zwei-dimensionalen Zuständen  $z(i, j)$  betrachtet, wobei  $1 \leq i \leq M$  und  $1 \leq j \leq J$ . Der erste Index  $i$  beschreibt den  $E_b/N_0$  Schwellwert und  $j$  den Pegel der Sendestärke. Die Übergänge zu und von einem Zustand  $z(i, j)$  sind in Abb. 2 abgebildet.

Analog zu Gl. (1) wird die Sendeleistung erhöht und verringert mit  $p_u(i, j)$  bzw.  $p_d(i, j) = 1 - p_u(i, j)$  und kann in einer geschlossenen Form angegeben werden unter Berücksichtigung der Normalverteilungsannahme.

$$p_u(i, j) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( \frac{i - j - \mu_G}{\sqrt{2}\sigma_G} \right) \quad (5)$$

Es können nun die Übergänge zu und von einem bestimmten Zustand  $z(i, j)$  in Abb. 2 beschrieben und eine Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix im stationären Zustand erstellt

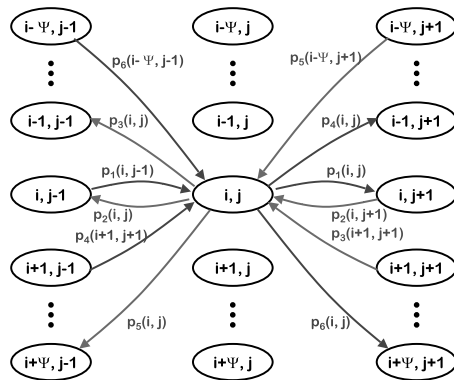


Abbildung 2: Zustandsübergänge

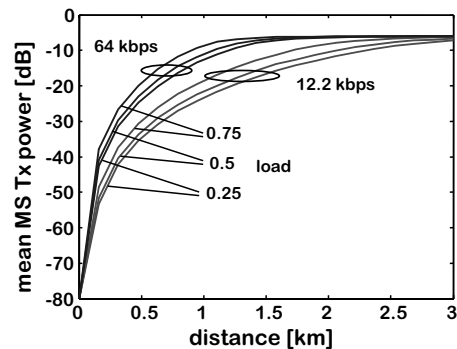


Abbildung 3: Mittlere Uplink-Sendeleistung

werden. Anhand Standardverfahren aus der Verkehrstheorie wird die stationäre Zustandsverteilung  $z(i, j)$  bestimmt.

Ein beispielhaftes Ergebnis ist in Abb. 3 dargestellt. Es gibt drei wichtige Effekte, die in dieser Abbildung zu sehen sind. Erstens, ein Benutzer mit größerem Abstand zur BS benötigt eine höhere Sendeleistung. Weiterhin bewirkt eine Erhöhung der Last in der Zelle oder der Datenrate eine Verringerung der Zellgröße und schließlich führt diese Tatsache zu einer Wechselwirkung zwischen Größe und Kapazität der Zelle, was in Abschnitt 4 vertieft wird.

### 3 Modellierung von Power Control Delays

Bisher wurden die Verzögerungen bei der Verarbeitung der Power Control Kommandos vernachlässigt und angenommen, dass diese sofort im nächsten Zeitschritt nach dem Erhalt des Signals ausgeführt werden. In einem tatsächlichen System wird das zeitliche Verhalten der Inner Loop stark von dieser Verzögerung beeinflusst und das Kommando wird erst nach  $\delta = 3$  Zeitschritten tatsächlich ausgeführt.

Die Übergänge von einem (diskreten) Sendepiegel zum nächsten finden in jedem PCG statt und werden nur zwischen benachbarten Pegel durchgeführt. Die Abhängigkeiten zwischen den Sendepiegeln um einen bestimmten Pegel  $j$  zu erreichen sind in Abb. 4(a) dargestellt.

Abb. 4(a) zeigt, dass das Power-Up Kommando für Level  $j$  zur Zeit  $n$  von den Wahrscheinlichkeiten für Power-Up der vier möglichen Zustände abhängt, d.h. Sendepiegel, die vor 3 PCG angenommen werden konnten ( $j+3, j+1, j-1, j-3$  zum Zeitpunkt  $n-3$ ). Es soll angemerkt werden, dass es nicht möglich war vor drei Zeitschritten im gleichen Zustand gewesen zu sein.

Da die Wahrscheinlichkeit für jeden Zustand zum Zeitpunkt  $n-3$  sich gleichermaßen

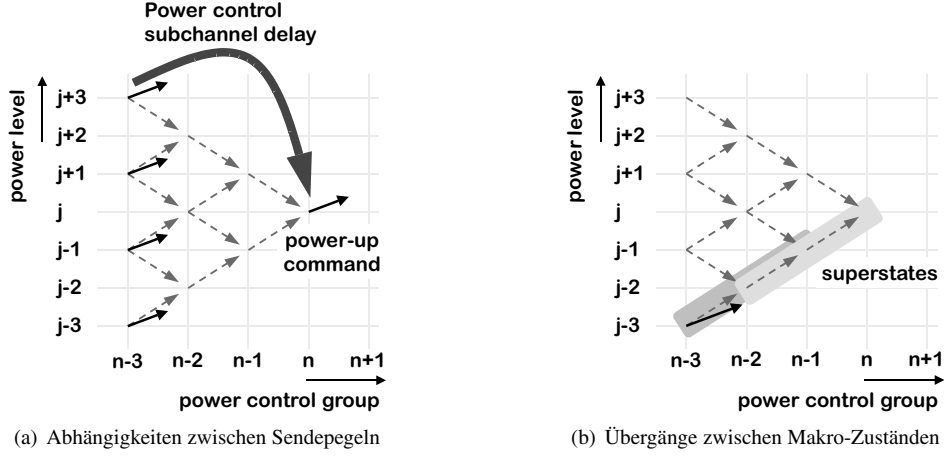


Abbildung 4: Zustandsübergänge im Power Control Modell

aus einer derartigen Baum-Struktur herleitet, besteht ebenfalls eine Abhängigkeit diese Zustände zum Zeitpunkt  $n - 3$  zu erreichen. Daher kann in diesem Fall nicht einfach angenommen werden, dass die  $p_u^{(n)}(j)$  die Übergangswahrscheinlichkeiten bilden, sondern es müssen auch noch die Pfade berücksichtigt werden, um diese Zustände zu erreichen. Es werden nun Makro-Zustände  $\bar{z}^{(n)}(j_1, j_2, j_3)$  definiert, die eine Abfolge von drei Sendepiegeln beschreiben.

$$\bar{z}^{(n)}(j_1, j_2, j_3) = \Pr \left[ P^{(n)} = j_3 \mid P^{(n-1)} = j_2, P^{(n-2)} = j_1 \right] \quad (6)$$

Die Übergänge zwischen den Makro-Zuständen sind in Abb. 4(b) dargestellt. Die Übergangswahrscheinlichkeiten zum Zeitpunkt  $n$  können in einer Matrix  $\mathbf{Q}^{(n)}$  angeordnet werden und anhand des Zustandsgleichungssystems gelöst werden.

### 3.1 Instationäre Analyse der Dynamik von Power Control

Es wird nun ein instationärer Fall betrachtet bei dem, ausgehend von einer Anfangsverteilung für die Sendestärke  $P^{(0)}$  zur Zeit  $n = 0$ , iterativ die nachfolgende Verteilung der Sendeleistung  $P^{(n)}$  berechnet wird. Die Berechnung erfolgt anhand des o.a. Schemas mit der Betrachtung der Pfade. Die neuen Zustandswahrscheinlichkeiten  $P^{(n+1)}$  werden aus  $P^{(n)}$  berechnet indem zuerst der korrespondierende Makro-Zustand  $\bar{Z}^{(n)}$  bestimmt wird und dann aufeinanderfolgend mit der Übergangsmatrix  $\mathbf{Q}^{(n)}$  multipliziert wird.

$$\bar{Z}^{(n+1)} = \bar{Z}^{(n)} \cdot \mathbf{Q}^{(n)}.$$

Die Transformation von  $\bar{z}^{(n+1)}(j_1, j_2, j_3)$  nach  $z^{(n+1)}(j)$  liefert die neuen Zustandswahrscheinlichkeiten. Dies wird durch die Summe über alle Makro-Zustände mit gleichem

Endzustand erreicht.

$$z^{(n+1)}(j) = \sum_{j_1, j_2} \bar{z}^{(n+1)}(j_1, j_2, j) \quad j = 0, \dots, J.$$

Um das dynamische Systemverhalten zu untersuchen, wird die Zeit betrachtet, die benötigt wird um von einem stabilen Zustand zum nächsten zu gelangen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Einfluss der Zelllast auf die Dauer der Konvergenz in dieser Zelle.

Die Wahl des Startvektors zum Zeitpunkt  $n = 0$  hat einen großen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Konvergenz. Um zu gewährleisten, dass das System sich am Anfang in einem eingeschwungenen Zustand befindet, wird anhand einer stationären Analyse eine Verteilung der Sendestärke ermittelt, die als Startvektor für die instationären Untersuchungen gewählt wird. Die Ergebnisse in Abb. 5 zeigen, dass der Mittelwert der MS Sen-

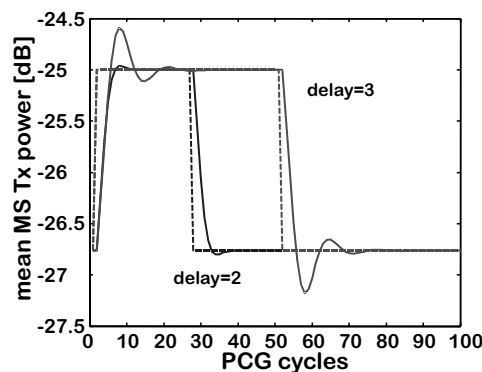


Abbildung 5: Einfluss des Delays auf die mittlere MS Sendestärke

destärke nicht vom Delay abhängt. Jedoch wird die transiente Phase deutlich verlängert, wenn der Delay von 2 auf 3 PCG erhöht wird. Dies wird durch die verzögerte Reaktion des Systems auf die Power Control Kommandos verursacht und wird deutlich in der Oszillation um den theoretischen Mittelwert. Die Studie zeigt, dass eine Verringerung des Delays von 3 PCG (wie im cdmaOne System) auf 2 PCG ein deutlich stabileres System bei Schwankungen in der Zelllast bewirken würde.

#### 4 Planung von WCDMA Netzen mit räumlichem Verkehr

In den bisherigen Abschnitten wurde das Verhalten von Power Control eines einzigen Nutzers betrachtet und die weiteren Teilnehmer wurden nur implizit durch die Last berücksichtigt. In diesem Abschnitt wird das Modell erweitert um eine räumliche Verteilung der Nutzer anhand von räumlichen Punktprozessen [FS98] mathematisch zu charakterisieren.

Allgemein ist ein räumlicher Punktprozess die Erweiterung eines eindimensionalen Punktprozesses auf eine zweidimensionale Fläche, wobei die Punkte durch ihre Koordinaten



gekennzeichnet sind. Ähnlich ihrem eindimensionalen Gegenstück, werden sie durch das erste Moment beschrieben, das als *Intensitätsmaß* bezeichnet wird. Im einfachsten Fall eines homogenen Poisson-Prozesses besteht dieses Intensitätsmaß aus einem Skalar  $\lambda$ , das die mittlere Anzahl von Punkten (hier Teilnehmern) auf einer Einheitsfläche beschreibt. Eine Realisierung eines homogenen Poisson-Prozesses ist in Abb. 6 gegeben.

Eine nützliche Eigenschaft des homogenen Poisson Prozesses ist, dass für jede Zellgröße die Anzahl der Teilnehmer Poisson-verteilt ist und somit zu einer Beziehung zwischen Anzahl an Teilnehmern und ihren Positionen führt.

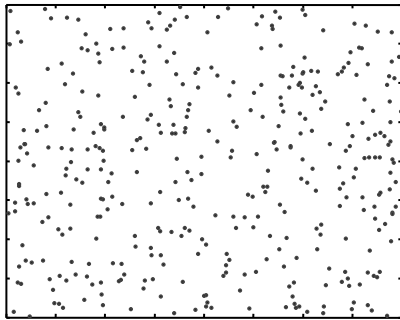


Abbildung 6: Realisierung eines homogenen Poisson Prozesses

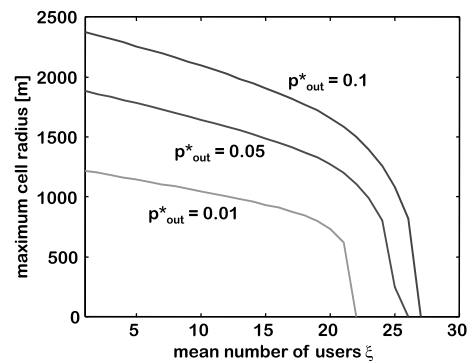


Abbildung 7: Wechselwirkung Zellgrößen gegenüber Kapazität

Die folgende Untersuchung behandelt die Wechselwirkung zwischen Zellradius und Kapazität, d.h. die mittlere Anzahl der Teilnehmer  $\xi$  in einer Zelle [VSJ97]. Es wird eine maximale Schranke  $p_{\text{out}}^*$  für die Ausfallwahrscheinlichkeit (engl. *Outage Probability*) angenommen, welche die Dienstgüte beschreibt und die nicht unterschritten werden darf. Durch Auflösen der Gleichung für die Ausfallwahrscheinlichkeit, die aus dem Modell gewonnen werden kann, kann der maximale Zellradius ermittelt werden, bei dem  $p_{\text{out}}^*$  eingehalten werden kann. Die Kurven für die Wechselwirkung zwischen Zellradius und Kapazität sind in Abb. 7 wiedergegeben. Je höher die Anforderungen an die Ausfallsicherheit werden, d.h. je kleiner  $p_{\text{out}}^*$  ist, umso kleiner wird der maximale Zellradius bei der gleichen Anzahl an Teilnehmern. Daher können bei einer CDMA Zelle die Größe der Versorgungsgebiete und die Kapazität als Größen angesehen werden, die eher durch Stabilitätskriterien bestimmt werden als durch die tatsächlichen Ressourcen.

## 5 Zusammenfassung

Die Arbeit beschäftigt sich mit der analytischen Modellierung des Power Control Kreislaufs in einem CDMA-basierten Mobilfunksystem und der Leistungsuntersuchung in Anbetracht einer räumlichen Benutzerverteilung. Es wurde ein analytisches Markov-Ketten

Modell der Inner und Outer Loop hergeleitet. Das vorrangige Ziel war eine mathematische Beschreibung der Sendeleistung einer beliebigen MS zu erhalten. Als Kriterium für die Leistungsfähigkeit des Systems wurde die Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet als die Wahrscheinlichkeit, dass die maximal mögliche Sendeleistung nicht ausreicht, um eine gewünschte Dienstgüte zu erreichen.

Eine Erweiterung des Modells beinhaltet die Verarbeitungsverzögerung und die Abhängigkeit der Sendepiegel, die durch Aggregation der Pfade zu Makro-Zuständen ebenfalls in das Modell eingebaut werden konnten. Es wurden Studien durchgeführt, die das Systemverhalten bei einer plötzlichen Veränderung der Verkehrslast aufzeigten.

Nach der Betrachtung einer einzelnen Verbindung beinhaltet der nächste Schritt eine Berücksichtigung der gesamten Zelle bei dem die Teilnehmer nach einem räumlichen homogenen Poisson Prozess verteilt sind. Die Ergebnisse in der Arbeit zeigten, dass die Zellgröße und Kapazität durch die Verkehrsverteilung beeinflusst werden. Die Wechselwirkung zwischen Zellgröße und Kapazität erweist sich als nützlicher Parameter für die Planung von CDMA Mobilfunksystemen.

## Biographie

Kenji Leibnitz studierte Informatik an der Universität Würzburg und schloss sein Studium als Diplom-Informatiker ab. Von 1997 bis 2002 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für verteilte Systeme (Prof. P. Tran-Gia) der Universität Würzburg. Sein Forschungsschwerpunkt lag auf der analytischen Modellierung, Leistungsbewertung und Planung von CDMA-basierten Mobilfunksystemen. Nach der Promotion im Frühjahr 2003 befindet er sich im Augenblick am Multimedia Network Laboratory der Universität von Osaka, Japan, als Post-Doc und arbeitet momentan auf dem Gebiet Sensor-Netzwerke.

## Literatur

- [3G99] 3GPP: Radio resource management strategies. Technical Specification TR25.942. 3GPP, TSG RAN. Dec. 1999.
- [FS98] Frey, A. und Schmidt, V.: Marked point processes in the plane I - a survey with applications to spatial modeling of communication networks. *Advances in Performance Analysis*. 1(1):65–110. 1998.
- [Ra96] Rappaport, T. S.: *Wireless Communications – Principles & Practice*. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ. 1996.
- [Vi95] Viterbi, A. J.: *CDMA – Principles of spread spectrum communications*. Addison–Wesley. Reading, MA. 1995.
- [VSJ97] Veeravalli, V. V., Sendonaris, A., und Jain, N.: CDMA coverage, capacity and pole capacity. In: *Proc. of IEEE VTC'97*. S. 1450–1454. Phoenix, AZ. May 1997.
- [Wa98] Walke, B.: *Mobile Radio Networks, Networking and Protocols*. Wiley. 1998.