Versorgungsanalysen von mobilen terrestrischen und Satellitenkommunikationssystemen in modellierten Terrains

Gunar Schorcht / Ulrich Freund

1 Einführung

Die Nutzung von Multimedia-Anwendungen setzt aufgrund der Art der übertragenen Informationen eine breitbandige Netzinfrastruktur voraus. Deshalb hat man sich bisher bei der Entwicklung von Multimedia-Systemen auf Festnetze beschränkt. Die Einführung von zellularen mobilen Kommunikationssystemen der zweiten Generation (GSM, Digital-AMPS, TACS, ...) hat in den letzten 5 Jahren zu einem sprunghaften Anwachsen der Zahl mobiler Teilnehmer geführt. Da das Dienstangebot in Festnetzen schon heute weit über reine Sprachdienste hinausgeht, besteht nunmehr ein berechtigtes Interesse, verfügbare Multimedia-Dienste auch mobilen Teilnehmern bereitzustellen. Aufgrund der schmalbandigen Übertragungsraten in Systemen der zweiten Generation von maximal 9600 bps sind diese nicht oder nur sehr eingeschränkt für die Nutzung von Multimedia-Anwendungen geeignet. Deshalb werden derzeit große Anstrengungen unternommen, breitbandigere Mobilkommunikationssysteme der dritten Generation zu entwickeln. Diese sollen Übertragungsraten von 2 Mbps ermöglichen. Ein wesentliches Merkmal von Systemen der dritten Generation ist, daß sie unabhängig vom Standort des Teilnehmers global nutzbar sein sollen, was eine globale Flächendeckung impliziert. Da jedoch die steigende Zahl an Teilnehmern, die Erhöhung der genutzten Frequenzen und die Verringerung der Sendeleistung mobiler Endgeräte eine stetige Reduzierung der Zellgröße erfordert, ist eine Flächendeckung ökonomisch nicht realisierbar. Aus diesem Grund sollen in zukünftigen Mobilkommunikationssystemen hierarchische Zellstrukturen zur Anwendung kommen. Dazu sind Hierarchieebenen auf Pico-, Mikro-, Makro- und Schirmzellenniveau geplant.

Die Realisierung von Schirmzellen kann durch eine Integration von Satellitensystemen in terrestrische Systeme erfolgen, da Satelliten eine großflächige Abdekkung ermöglichen [1]. Besonders geeignet sind aufgrund geringerer Sendeleistung und geringeren Signallaufzeiten Systeme mit Satelliten auf nicht-geostationären Umlaufbahnen. Diese Systeme führen jedoch zu dynamischen Zellkonstellationen und somit zu ständig wechselnden Umgebungsbedingungen für die Mobilstationen. Dadurch sind Vorhersagen von Systemparametern wie Versorgungs-, Blockierungs- und Terminierungswahrscheinlichkeiten, die einen entscheidenden Einfluß auf das Systemdesign haben, analytisch nicht zu ermitteln. In der Literatur sind verschiedene Ansätze zu finden, die diese Problematik mit statistischen Modellen zu lösen versuchen. Für die Anwendung auf städtische Gebiete als auch auf Regionen mit natürlichen Hindernissen, wie Gebirgen, sind solche Methoden nur bedingt geeignet. Da jedoch gerade diese Regionen für die Wahl verschiedener Parameter während des Systemdesigns von wesentlicher Bedeutung sind, ist die Kenntnis über das Verhalten des Systems in diesen Regionen wünschenswert. Im Rahmen dieses Beitrages sollen deshalb Ansätze vorgestellt werden, wie solche Regionen, im speziellen Gebirgsregionen, geeignet modelliert werden können, um darauf basierend simulative Untersuchungen von Versorgungswahrscheinlichkeiten durchführen zu können.

2 Methoden zur Modellierung von Gebirgsregionen

Die Versorgung einer Region durch ein Satellitensystem wird wesentlich durch die Sichtbarkeit der Satelliten bestimmt, die sich aus dem minimalen Höhenwinkel (Elevation), unter dem ein Satellit für die Mobilstation sichtbar ist, ergibt. Deshalb kann ein Modell einer Gebirgsregion als geeignetes Mittel zur Untersuchung von Versorgungswahrscheinlichkeiten eines Satellitensystemen in dieser Region benutzt werden.

Für die Modellierung von Gebirgsregionen bieten sich die, aus der Computergraphik bekannten Höhenfelder an. Ein Höhenfeld wird in einem kartesischen Koordinatensystem beschrieben, wobei in der xy-Ebene ein äquidistantes Gitter mit dem Abstand 1 aufgespannt wird, deren Knotenpunkte die realen Werte der z-Richtung enthalten. Die Flächen, die im $\mathbb{R}^3$ durch jeweils vier Punkte aufgespannt werden, werden als Zellen bezeichnet.

Die Generierung eines Terrains kann prinzipiell auf drei verschiedene Arten erfolgen:

1. automatisch mit vorgegebenen Parametern,
2. halbautomatisch mit Vorgabe von Stützpunkten der Grundgeometrie und
3. nichtautomatisch auf der Basis von topographischen Daten.

2.1 Automatische Generierung von Terrains

Für die automatische Generierung von Terrains eignen sich fraktale Brownsche Oberflächen *fBs* (fractional Brownian surfaces), welche durch die zweidimensionale Anwendung der fraktalen Brownschen Bewegung *fBm* (fractional Brownian motion) erzeugt werden können [7]. Die Erzeugung einer Brownschen Bewegung $B(t)$ erfolgt durch einen kumulativen Gaußschen Prozeß $X(t)$, der ein durch weißes Rauschen definiertes Signal $x(t)$ integriert. Aus den Eigenschaften des Signals $x(t)$ ergeben sich die Eigenschaften der Brownschen Bewegung $B(t)$, daß die Zuwächse stationär und gaußverteilt sind. Als Verfahren zur Generierung Brownscher Bewegungen sind bekannt: das Poisson Relief, die Fourier-

Filterung, die Gaußsche Mittelpunktverschiebung, die sukzessive zufällige Anhebung von Mittelpunkten und die Aufsummierung bandbegrenzten Rauschens [8]. Für die vorgestellten Modelle wurde die Methode der Gaußschen Mittelpunktverschiebung [10] gewählt, da diese Methode einfach implementierbar und rechenzeiteffizient ist. Ein Nachteil dieser Methode ist jedoch, daß sie auch bei ausreichender Generationstiefe nur eine Approximation der Brownschen Bewegung darstellt [8], jedoch für die meisten Anwendungsfälle ausreichend genau das statistische Verhalten der Brownschen Bewegung *B(t)* approximiert.

Bei der Generierung der Brownschen Bewegung mit Hilfe der Gaußschen Mittelpunktverschiebung wird ein Prozeß *X(t)* zwischen den Zeiten $t_0=0$ und $t_1=1$ berechnet, in dem der Zeitabstand zweier aufeinanderfolgender Werte von *X(t)* sukzessive halbiert und dem Signal *X(t)* an der Stelle des neu entstandenen Zeitpunktes ein Offset aufaddiert wird, Abbildung 1. Jede Halbierung des Zeitabstandes wird als *k*-ter Verfeinerungsschritt bezeichnet, wobei 2^{k-1} neue Zeitpunkte entstehen.

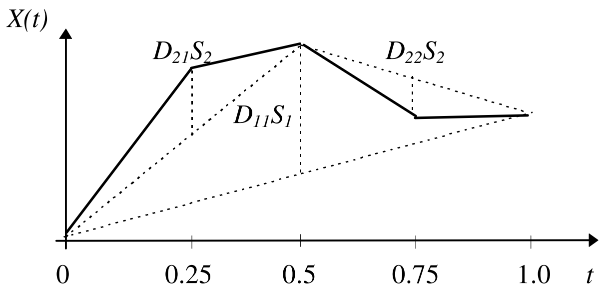


Abbildung 1: Mittelpunktverschiebung

Die Vorschrift für die Berechnung der Werte des *k*-ten Verfeinerungsschrittes basierend auf den Werten des (*k*-1)-ten Verfeinerungsschrittes lautet

$$X\left(\frac{i}{2^k}\right) = \frac{X\left(\frac{i+1}{2^k}\right) + X\left(\frac{i-1}{2^k}\right)}{2} + D_{ki}S_k \qquad (1)$$

mit $i=1,3,5,...,2^k-1$ und $k>0$ wobei D_{ki} voneinander unabhängige Gaußsche Variablen sind. Der Skalierungsfaktor, der den Betrag der Mittelpunktverschiebungen mit zunehmenden *k* verringert, wird berechnet durch

$$S_k = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^{k-1} \quad \text{für} \quad k > 0 \cdot \qquad (2)$$

Der Übergang zur fraktalen Brownschen Bewegung erfolgt durch die Erweiterung des Skalierungsfaktors S_k in (2) um den sogenannten Hurst-Exponenten *H*

$$S_k = \sqrt{1-2^{2H-2}}\left(\frac{1}{2^H}\right)^{k-1} \quad \text{mit} \quad 0 < H < 1\,,\; k > 0. \cdot \qquad (3)$$

Der Hurst-Exponent bestimmt den Zusammenhang zwischen aufeinanderfolgenden Zuwächsen und somit die Eigenschaft der fraktalen Brownschen Bewegung $B_H(t)$ wie folgt

– für $H = 0{,}5$ sind die Zuwächse unabhängig,
– für $H > 0{,}5$ sind die Zuwächse positiv korreliert,
– für $H < 0{,}5$ sind die Zuwächse negativ korreliert.

Die fraktale Dimension der fraktalen Brownschen Bewegung $B_H(t)$ ist $D=2-H$. Es ist leicht zu überprüfen, daß die fraktale Brownsche Bewegung für $H=0{,}5$ der gewöhnlichen Brownschen Bewegung *B(t)* entspricht. Der Übergang zur fraktalen Brownschen Oberfläche erfolgt durch die Anwendung der fraktalen Brownschen Bewegung $B_H(t)$ über eine Fläche, wobei jeder vertikale Schnitt selbst eine fraktale Brownsche Bewegung $B_H(t)$ im Eindimensionalen darstellen muß. Die fraktale Dimension einer fraktalen Brownschen Oberfläche beträgt $D=3-H$. Auch hier gelten oben genannte Zusammenhänge zwischen aufeinanderfolgenden Zuwächsen, wie dies in Abbildung 2 dargestellt ist.

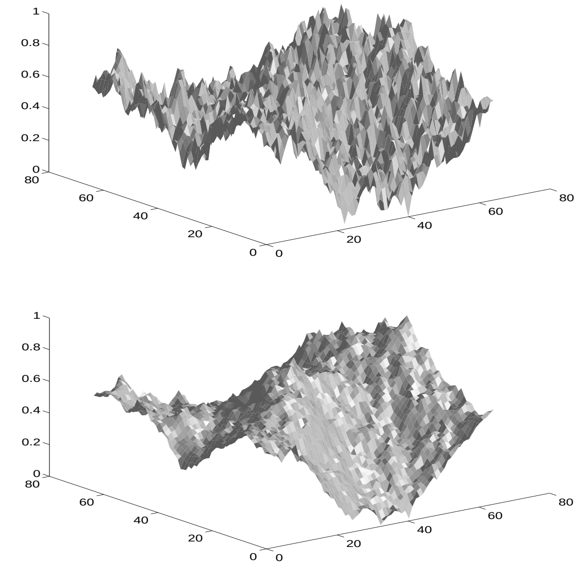


Abbildung 2: Fraktale Brownsche Oberflächen: a) H=0.5, b) H=0.999

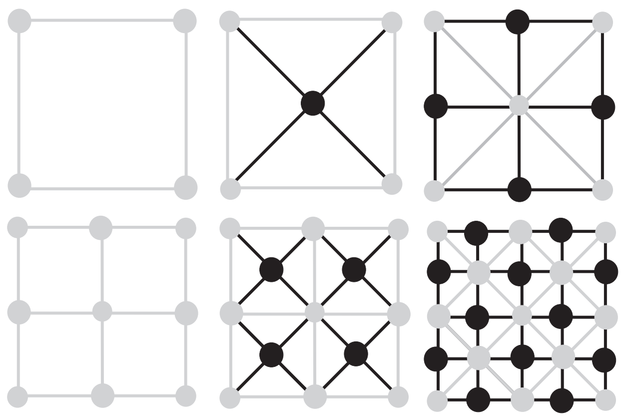


Abbildung 3: Schritte der Mittelpunktverschiebung in einem Quadrat

Die verwendete Methode zum Generieren von fraktalen Brownschen Oberflächen beruht ebenfalls auf der Gaußschen Mittelpunktverschiebung. Diese wird jedoch auf ein sogenanntes Initialquadrat angewendet, wie dies in Abbildung 3 dargestellt ist. Durch die Aneinanderreihung von mehreren Initialquadraten, lassen sich Terrains mit verschiedenen Grundformen erzeugen. Während in Abbildung 2 dargestellte fraktale Brownsche Oberflächen auf der Basis eines einzelnen Initialquadrates generiert wurden, wurden für die fraktalen Brownschen Oberflächen in Abbildung 4 6x4 Initialquadrate benutzt.

Aus Abbildung 4a) ist erkennbar, daß eine fraktale Brownsche Oberfläche für die Simulation nur nach einer Nachbearbeitung nutzbar ist. Zum einen muß die entstandene Oberfläche geglättet und zum anderen die statistische Identität zwischen Bergen und Tälern gebrochen werden, da diese in der Realität nicht existiert.

Die Glättung einer fraktalen Oberfläche kann durch zweidimensionale Faltung mit Hilfe eines sogenannten Faltungs-Kernels erfolgen, eine in der Bildverarbeitung weit verbreitete Methode [18]. Die zweidimensionale Faltung stellt einen zweidimensionalen digitalen nichtrekursiven Tiefpaßfilter dar, für den der gefilterte Ausgangswert nach der Vorschrift

$$\tilde{z}(k,l) = \sum_{i=-n}^{+n} \sum_{j=-n}^{+n} \mathrm{b}_{ij} z(k-i, l-j) \cdot \tag{4}$$

mit

$$b_{ij} \geq 0 \text{ und } \sum_{i=-n}^{+n} \sum_{j=-n}^{+n} b_{ij} = 1$$

$$b_{ij} = \frac{1}{(2n+1)^2} \tag{5}$$

direkt gewonnen wird, wobei n die Ordnung des Filters und b_{ij} die Faltungskoeffizienten sind. Für die Glättung von fraktalen Oberflächen können, wie Abbildung 4 zeigt, alle b_{ij} gleich gewichtet gewählt werden, was einer sogenannten gleitenden Mittelwertbildung entspricht. Die Beseitigung der statistischen Identität zwischen Bergen und Tälern kann durch die Anwendung nichtlinearer Skalierungsfunktionen erfolgen, wie z.B.

$$\tilde{z}_{kl} = f_S(z_{kl}) z_{kl} + f_O(z_{kl}), \quad f_S(z_{kl}) = \begin{cases} 0 & \text{für } z_{kl} < 0.4 \\ 1 & \text{sonst} \end{cases}$$
$$f_O(z_{kl}) = \begin{cases} 0.4 & \text{für } z_{kl} < 0.4 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{6}$$

2.2 Halbautomatische Generierung von Terrains

Die halbautomatische Generierung von Terrains eignet sich für Modellierungen, bei denen die Charakteristik einer real existierenden Region erhalten bleiben soll. Sie stellt eine Kombination aus Interpolation und fraktaler Brownscher Oberfläche *fBs* dar. Dabei werden zunächst die Geometrie bestimmende Stützpunkte definiert und anschließend eine Interpolation der nicht definierten Werte basierend auf den Stützpunkten durchgeführt. In den vorgestellten Modellen wurde dazu die inverse entfernungsgewichtete Interpolation benutzt, da diese zu den intuitivsten und einfach implementierbaren Methoden bei gleichzeitig zufriedenstellenden Ergebnissen gehört. Dabei wird für einen Satz von gegebenen Stützpunkten ($\boldsymbol{p}_i$, z_i) mit $z_i = f(\boldsymbol{p}_i)$ der interpolierte Wert $z = f(\boldsymbol{p})$ berechnet durch

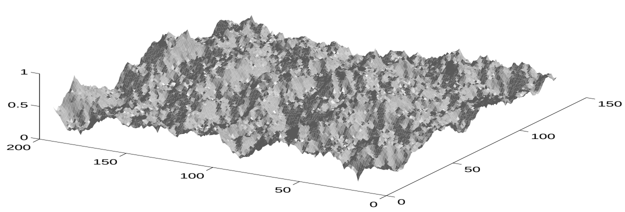
$$f(\boldsymbol{p}) = \sum_i w_i(\boldsymbol{p}) f(\boldsymbol{p}_i) \tag{7}$$

$$w_i(\boldsymbol{p}) = \frac{\sigma_i(\boldsymbol{p})}{\sum_j \sigma_j(\boldsymbol{p})} \tag{8}$$

$$\sigma_i(\boldsymbol{p}) = \frac{1}{\left\| \boldsymbol{p} - \boldsymbol{p}_i \right\|_2^{\mu}} \tag{9}$$

mit

$$\sum_i w_i(\boldsymbol{p}) = 1 \quad \text{und} \quad w_i(\boldsymbol{p}) \geq 0 \cdot \tag{10}$$



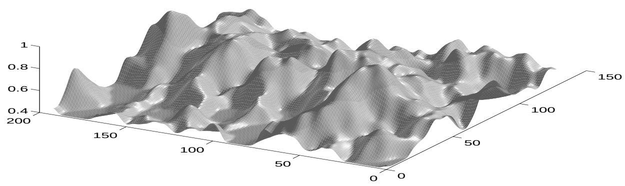


Abbildung 4: Fraktale Brownsche mit 6x4 Quadr.
a) ohne Nachbearbeitung,
b) gefiltert mit n=2 und normiert

Dabei bestimmt der Wert von μ die Wichtung der Stützwerte in Abhängigkeit von der Entfernung zum interpolierten Wert. In Abbildung 5 ist das Ergebnis einer Interpolation mit μ=2,5 eines Modells des Gasteiner Tales auf der Basis von 130 Stützwerten im Vergleich zum Original mit 1755 Werten abgebildet.

Nach erfolgter Interpolation kann durch die Aufmodulierung einer fraktalen Brownschen Oberfläche fBs die interpolierte Oberfläche in ihrer Beschaffenheit verändert werden. Um die Grundgeometrie des Terrains während der Generierung zu bewahren, darf diese jedoch nur mit sehr kleinen Mittelpunktverschiebungen realisiert werden. Dies kann erreicht werden, wenn das, für die automatische Generierung vorgestellte Verfeinerungsverfahren, mit einem Verfeinerungsschritt $k \geq 3$ begonnen wird.

2.3 Die Nutzung von topographischen Daten

Soll für die Untersuchung eines speziellen Terrains absolute Naturtreue erreicht werden, so ist die Nutzung von topographischen Daten sinnvoll. Diese werden von einem Gitter mit konstanten Rasterabständen aus dem Original auf ein skaliertes Höhenfeld übertragen und erlauben damit ebenso die Anwendung in Simulationen. In Abbildung 5a) ist das Gasteiner Tal als ein typisches

Tal der Hochalpen dargestellt. Die Daten können aus topographischen Karten oder GIS-Datenbanken (GIS - Geographic Information System) gewonnen werden. In Abbildung 6 ist ein Modell eines Teils des Rocky Mountains National Park, Colorado USA, dargestellt, wie es als DEM (Digital Elevation Model) durch die US Geographic Survey bereitgestellt wird.

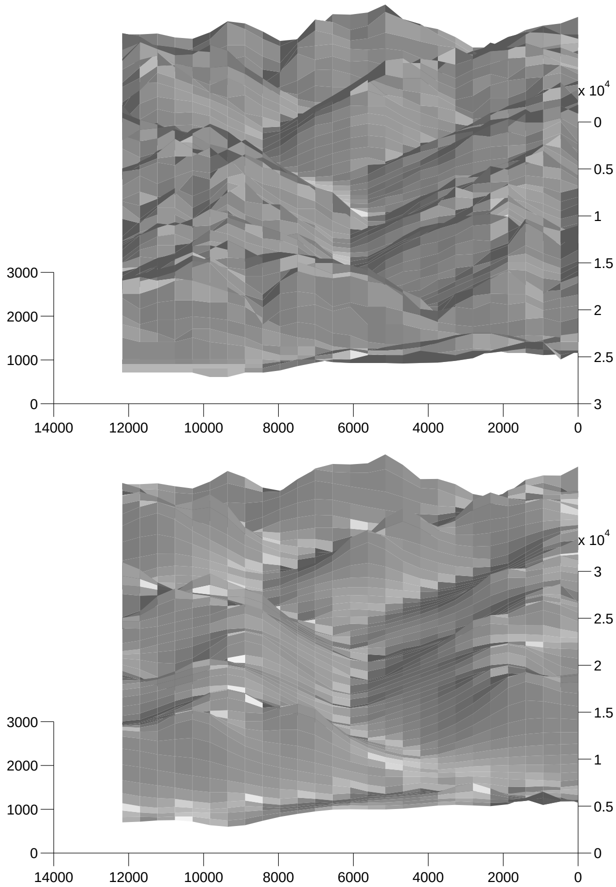


Abbildung 5: Modelle des Gasteiner Tales
a) Original 1755 Werte
b) interpoliert 130 Werte

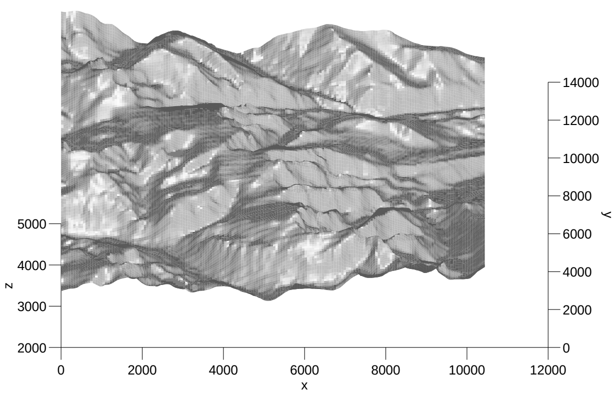


Abbildung 6: Mc Henrys Peak, Rocky Mountains

3 Methoden zur Sichtbarkeitsanalyse in Satellitensystemen.

Eine Anwendung von generierten Terrains, ist die simulative Untersuchung von Versorgungs-, Blockierungs- und Terminierungswahrscheinlichkeiten in mobilen Kommunikationssystemen für Regionen, in denen die Anwendung von analytischen bzw. statistischen Methoden aufgrund von dynamischen Umgebungsbedingungen nicht möglich ist. Da die Leistungsfähigkeit eines mobilen Kommunikationssystems durch eben diese Parameter maßgeblich charakterisiert ist, kann eine Simulation basierend auf generierten Terrains von Bedeutung sein, da somit bereits während der Designphase wesentliche Rückschlüsse auf eine Netzstruktur und entsprechende Parameter möglich sind.

Die Versorgung durch Satelliten in nicht-geostationären Umlaufbahnen ist aufgrund der Bewegung der Satelliten durch eine starke Dynamik geprägt und wird maßgeblich durch die Sichtbarkeit der Satelliten bestimmt. Diese wiederum ist stark abhängig vom, die Mobilstation umgebenden, Terrain. Zur Versorgung eines mobilen Teilnehmers ist die Sichtbarkeit von mindestens einem Satelliten für das Zustandekommen einer Verbindung und die Sichtbarkeit von mindestens zwei Satelliten für das Aufrechterhalten einer Verbindung durch Handover notwendig. Deshalb stellt die Sichtbarkeit von Satelliten ein bestimmendes Moment während der Designphase dar.

3.1 Sichtbarkeitsanalysen mittels Grid-Tracing

Zur Untersuchung der Sichtbarkeit von Satelliten stellt das Grid-Tracing [9] für modellierte Terrains in Form von Höhenfeldern die geeignet Methode dar. Dabei wird vom einem Punkt in einem Höhenfeld, ein Strahl in einer durch Azimut und Höhenwinkel bestimmten Richtung ausgesendet. Für alle durch den Strahl überstrichenen Zellen des Höhenfeldes wird ein Test auf Schnitt mit dem Strahl durchgeführt. Die durch den Strahl überstrichenen Zellen werden durch einen modifizierten DDA (Digital Differential Analyzer) ermittelt.

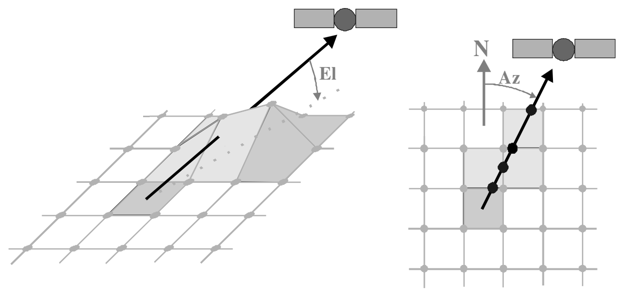


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Grid-Tracing

Um den Vorgang zu beschleunigen kann folgende Bedingung als hinreichend formuliert werden.
Wenn

$$\min(z_{R1}, z_{R2}) > \max(z_{i,j}, z_{i,j+1}, z_{i+1,j}, z_{i+1,j+1}) \qquad (11)$$

ist, wobei $z_{i,j}$, $z_{i,j+1}$, $z_{i+1,j}$, $z_{i+1,j+1}$ die Höhenwerte der Punkte, welche die Zelle *i,j* begrenzen und z_{R1}, z_{R2} die Höhenwerte des Strahles im Eintrittspunkt in bzw. Austrittspunkt aus der Zelle sind, so liegt kein Schnitt vor. Ist die Bedingung für alle überstrichenen Zellen erfüllt, so kann die Sichtbarkeit des Satelliten ohne

weitere Analysen entschieden werden. Diese Bedingung kann zu einer Leistungsverbesserung bei der Berechnung genutzt werden, indem die Maximalwerte aller Zellen bereits während der Generierung eines Höhenfeldes ermittelt und in einer Matrix abgelegt werden.
Ist genannte Bedingung für eine überstrichene Zelle nicht erfüllt, so ist ein aufwendigerer Test auf Schnitt zwischen Zelle und Strahl notwendig. Eine Methode dafür ist die Aufstellung der Schnittgleichung zwischen dem Strahl und der Ebene, in welcher die Zelle liegt und die Berechnung der Lage des Schnittpunktes. Da diese Methode sehr rechenzeitaufwendig ist, wurde eine effizientere Methode entwickelt. Dabei erfolgt zunächst eine Projektion des Strahls in die xy-Ebene, in der die Schnittpunkte des Strahles mit den Zellrändern ermittelt werden. Für die Schnittpunkte werden die Höhenwerte durch lineare Interpolation berechnet und mit dem Maximalwert verglichen. Ist die Bedingung $z_{R2} \leq z_{C2}$ erfüllt, wobei z_{C2} der Höhenwert der Zelle im Austrittspunkt ist, so liegt ein Schnitt des Strahls mit der Zelle vor, woraus die Nichtsichtbarkeit des Satelliten folgt und die Analyse beendet werden kann. Das beschriebene Verfahren ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt.

3.2 Erzeugung von Höhenwinkelpanoramen

Für ein gegebenes Terrain ist es häufig wünschenswert für einen beliebigen Punkt den minimalen Höhenwinkel in verschiedenen vorgegebenen Richtungen zu bestimmen. Zu diesem Zweck kann ein Höhenwinkelpanorama erstellt werden, welches den minimalen durch Terrainabschattungen bedingten Höhenwinkel über dem Azimut darstellt. Für die Ermittlung des minimalen Höhenwinkels bei vorgegebenen Azimut wurde das Grid-Tracing aus Kapitel 3.1 modifiziert. Dabei wird ein Strahl mit einem anfänglichen Höhenwinkel von 0° in Richtung des gegebenen Azimutes ausgesandt. Im Falle eines Schnittes zwischen dem Strahl und einer überstrichenen Zelle wird die Steigung des Strahles derart verändert, daß der Höhenwert des Strahles im Austrittspunkt aus der Zelle dem Höhenwert der Zelle entspricht. Es ist lediglich die Betrachtung des Austrittspunktes notwendig, da der Eintrittspunkt dem Austrittspunkt der zuvor behandelten Zelle entspricht. Wird diese Methode auf alle überstrichenen Zellen angewandt, so erhält man nach dem Überstreichen aller Zellen den minimalen Höhenwinkels in Richtung eines vorgegebenen Azimutes. Durch die Ermittlung des minimalen Höhenwinkel für einen Wertebereich von Azimutwinkeln erhält man ein Höhenwinkelpanorama, wie es in Abbildung 8 dargestellt ist.

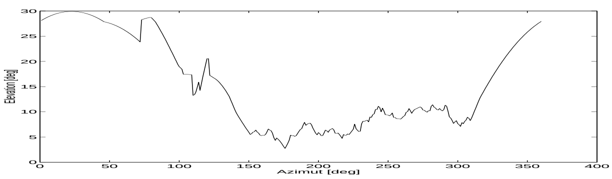


Abbildung 8: Höhenwinkelpanorama im Gasteiner Tal (x=16380m, y=6552m)

4 Sichtbarkeitsanalysen für verschiedene Satellitensysteme

Die in Kapitel 2 vorgestellten Methoden zur Modellierung von Gebirgsregionen sowie die Methoden zur Sichtbarkeitsanalyse, Kapitel 3, wurden in verschiedenen Simulationen genutzt, um Versorgungswahrscheinlichkeiten für vorgeschlagene Satellitensysteme [2,12,13,16,20], Tabelle 1, im Gasteiner Tal als Beispielterrain durchzuführen. Dabei wurden die topographischen Daten des Gasteiner Tales für die Modellierung des Terrains benutzt. Im folgenden sollen einige Simulationsergebnisse vorgestellt werden.

System	Anzahl Satelliten	Höhe [km]	Neigung [deg]	Simulierte Zeit[s]
Aries	48	1020	90	13600
Globalstar	48	1406	52	10800
Iridium	66	780	86	10000
Jocus	7	13900	75	86164
LEONET	15	6390	54	4800
MAGSS-14	14	10355	56	82800
Odyssey	12	10354	55	86400
Teledesic	840	700	98.2	2160

Tabelle 1: Systemdaten

Es wurde für jedes System die mittlere und minimale Wahrscheinlichkeit der Sichtbarkeit von einem, zwei, drei und vier Satelliten über alle Zellen der Beispielregion ermittelt. Die Simulationszeiten für das jeweilige System wurde so gewählt, daß der gesamte Zeitraum bis zur Wiederholung einer Startkonstellation in die Simulation einbezogen wurde. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 9 dargestellt.
Bei der Analyse der mittleren Wahrscheinlichkeiten entsteht zunächst der Eindruck, daß alle Systeme ausreichende Versorgungswahrscheinlichkeiten bieten, da die mittlere Wahrscheinlichkeit für die Sichtbarkeit eines Satelliten über 0,99 liegt. Aus der Analyse der minimalen Wahrscheinlichkeiten geht jedoch hervor, daß es trotz guter mittlerer Wahrscheinlichkeiten, Gebiete geben muß, in denen die Wahrscheinlichkeiten für die Sichtbarkeit eines Satelliten für einige Systeme weit unterhalb der Akzeptanzgrenze von 0,95 liegen. Deshalb wurde die Wahrscheinlichkeitsverteilung im Terrain exemplarisch für das Iridium-System näher untersucht, Abbildung 10. In dieser Grafik ist deutlich zu erkennen, daß Regionen innerhalb des Terrains existieren, in denen die Wahrscheinlichkeit der Sichtbarkeit eines Satelliten weit unter der Akzeptanzgrenze liegt. Vergleicht man die Höhenstruktur des Terrains mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung im Beispielterrain für das Iridium-System, Abbildung 11, so ist deutlich eine Korrelation zwischen den Talsenken und den Einbrüchen in der Wahrscheinlichkeitsverteilung zu erkennen. Dies ist in den erhöhten Anforderungen an den Höhenwinkel in den Talsenken zu erklären. Für die Sichtbarkeit von zwei Satelliten wird dieser Zusammenhang noch deutlicher.

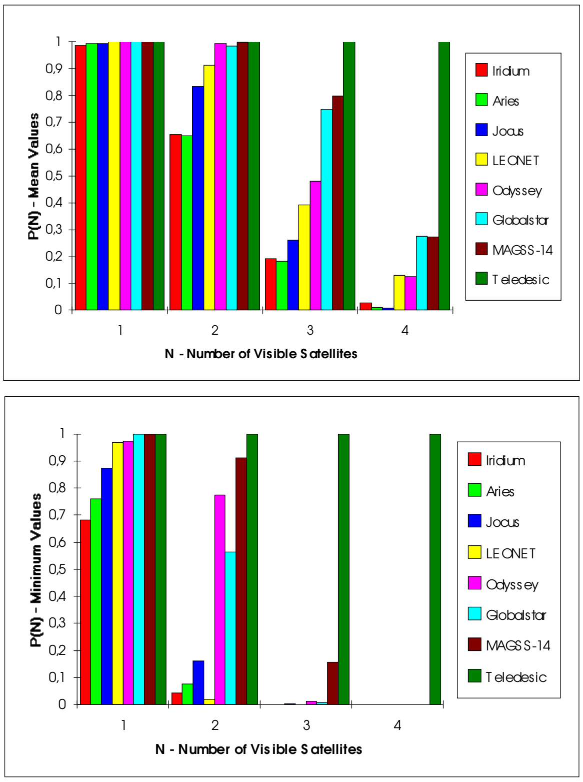


Abbildung 9: Wahrscheinlichkeiten für Sichtbarkeit von N Satelliten

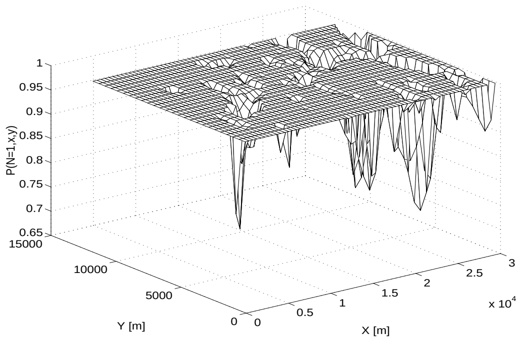


Abbildung 10: P(N=1) für Iridium im Beispielterrain

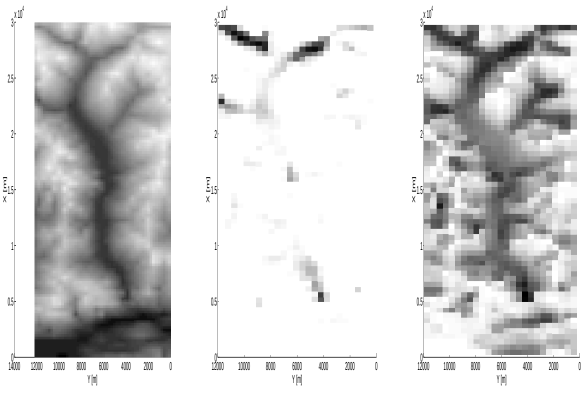


Abbildung 11: a) Höhenstruktur des Terrains,
b) P(N=1) Iridium
c) P(N=2) Iridium

Eine weitere wesentliche Information, die aus der simulativen Untersuchung von Sichtbarkeiten gewonnen werden kann, ist die Häufigkeit des Auftretens von Sichtbarkeitslücken mit einer bestimmten zeitlichen Länge. Eine solche Häufigkeitsverteilung ist für das Iridium-System für einen Punkt im Gasteiner Tal in Abbildung 12 dargestellt. Mit der Annahme, daß eine Verbindung bis zu 10 Sekunden ohne Sichtbarkeit des Satelliten aufrechterhalten werden kann, so würde dies bedeuten, daß mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,88 existierende Verbindungen im analysierten Punkt bei Auftreten einer Sichtbarkeitslücke terminiert werden würden. Derartige Analysen lassen bei der Simulation mit bewegten Teilnehmern Aussagen über Terminierungswahrscheinlichkeiten zu.

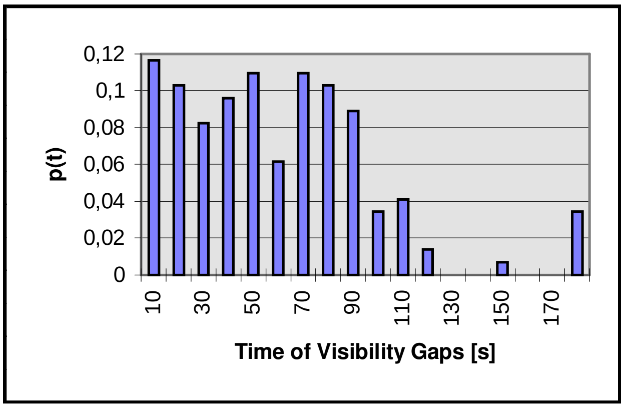


Abbildung 12: Empirische Häufigkeitsverteilung der Dauer von Sichtbarkeitslücken

Da sich Satelliten in nicht-geostationären Umlaufbahnen relativ zur Erdoberfläche mit Geschwindigkeiten von bis zu 25000 km/h bewegen, ist die Realisierung von Handover-Mechanismen in solchen System unumgänglich. Für die Durchführung eines Handover zwischen Satelliten ist die Sichtbarkeit von mindestens zwei Satelliten notwendige Voraussetzung. Bei der Analyse der mittleren Wahrscheinlichkeiten für die Sichtbarkeit von zwei Satelliten für das Beispielterrain in verschiedenen Systemen muß jedoch festgestellt werden, daß diese nur durch wenige Systeme mit einem ausreichend hohem Wert realisiert werden kann. Gerade in einem System wie Iridium, in dem aufgrund der extrem schnell wechselnden Konstellation der Satelliten im Mittel nach 10 min Gesprächsdauer ein Handover durchgeführt werden muß, kann eine ausreichende Sichtbarkeit von zwei Satelliten nicht erreicht werden. Daraus kann geschlossen werden, daß das Iridium-System als Ersatz für ein terrestrisches System in Gebirgsregionen der Art des Beispielterrains weniger geeignet ist als Systeme wie Globalstar oder Teledesic. Eine Eignung läßt sich nur durch eine sorgfältige Integration von terrestrischen, sofern diese realisierbar sind, und Satellitensystem erreichen. Bei der Intergation treten jedoch zusätzliche Probleme wie Intersystem-Handover auf, die Gegenstand weiterer Untersuchungen sind.

In einer weiteren Untersuchung wurden die Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalyse für das topographischen Modell des Gasteiner Tales mit den Ergebnissen einer

Sichtbarkeitsanalyse für das interpolierte Modell des Gasteiner Tales verglichen. Der Vergleich wurde für das Iridium-System durchgeführt.

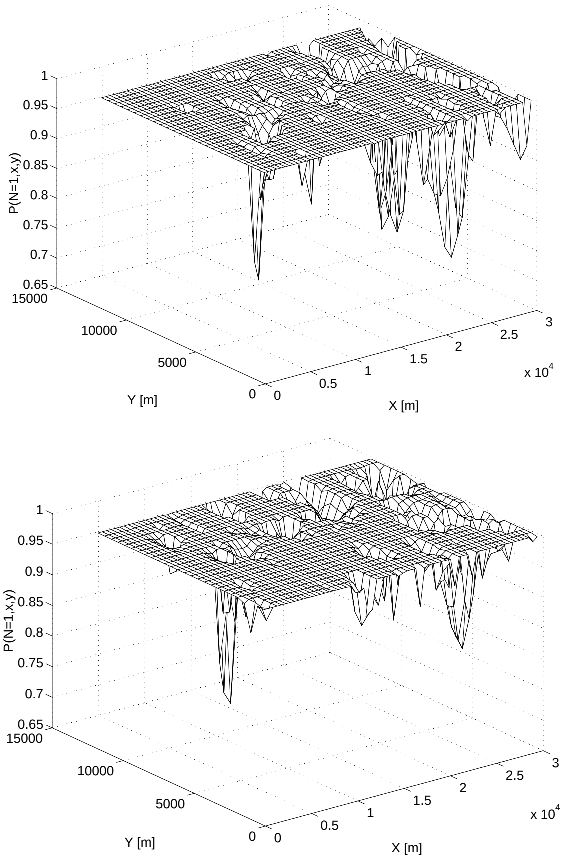


Abbildung 13: Sichtbarkeit für Iridium P(N=1)
a) im topographischen Modell
b) im interpolierten Modell

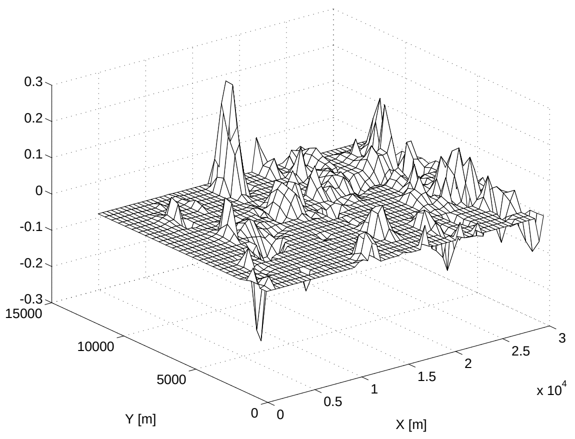


Abbildung 14: Fehler der Sichtbarkeiten für P(N=1)

Die Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalyse für das Iridium-System für die Sichtbarkeit von einem Satelliten sind in Abbildung 13 dargestellt. Dabei kann eine grundlegende Ähnlichkeit der Wahrscheinlichkeitsverteilung festgestellt werden. In Abbildung 14 ist der Fehler der Sichtbarkeiten dargestellt. Es ist zu erkennen, daß dieser in großen Teilen des Beispielterrains kleiner als 5% ist. Dennoch sind Regionen erkennbar in denen der Fehler größer 10% ist, woraus geschlußfolgert werden kann, daß verbesserte Interpolationsverfahren zur Anwendung kommen müssen.

5 Schlußfolgerungen

Im Beitrag wurden Methoden vorgestellt, die eine Generierung von Terrains für die Simulation von Mobilkommunikationssystemen mit dynamischen Umgebungsbedingungen erlaubt. Mit Hilfe der vorgestellten Methoden zur Suchtbarkeitsanalyse in Satellitensystemen auf der Basis von modellierten Terrains können Systemparameter wie Versorgungs-, Blockierungs- und Terminierungswahrscheinlichkeiten simulativ ermittelt werden. Die Ergebnisse solcher Simulationen können während der Designphase von integrierten terrestrischen und Satellitenkommunikationssystemen für Parameterstudien genutzt werden, um auch in Gebirgsregionen eine optimale Versorgung zu erreichen. Wie die vorgestellten Simulationen zeigen, können verschiedene vorgeschlagene Satellitensysteme, wie z.B. Iridium, nur durch eine gezielte Ergänzung mit terrestrischen Komponenten eine optimale Versorgung erreichen. Da die Leistungsfähigkeit eines mobilen Kommunikationssystems an der Versorgungswahrscheinlichkeit gemessen wird, können Simulationen als Ersatz für nicht anwendbare analytische und statistische Methoden eine große Bedeutung für die Planung integrierter Systeme haben.

Literatur

[1] Ananasso, F.; Delli Priscoli, F.: *The Role of Satellites in Personal Communication Services.* IEEE J. Select. Areas Commun. Vol. 13, No. 2, S. 291-302, Feb. 1995

[2] Benedicto, J.; Fortuny, J.; Rastrilla, P.: *MAGSS-14: A Medium-Altitude Global Mobile Satellite System for Personal Communications at L-Band.* ESA Journal, Vol. 16, Feb. 1992

[3 Caile, J. P.: *MOTOROLAs Comment's on Developments in Cellular Technology.* Proc. 5th Annual Bear Stearns Media & Entertainment Conference, Carlsbad CA 1991

[4] Corazza, G. E.; Vatalaro, F.*: A Statistical Model for Land Mobile Satellite Channels and Its Application to Nongeostationary Orbit Systems.* IEEE Trans. Veh. Technol.,Vol. 43, No. 3, S. 738-741, Aug. 1994

[5] Jeruchim, M. C.; Balaban, P.; Shanmugan, K. S.*: Simulation of Communication Systems.* Plenum-Press, New York NY 1992

[6] Lee, W. C. Y.: *Mobile Communications Design Fundamentals.* Wiley & Sons Inc., New York NY 1993

[7] Mandelbrot, B. B.: *The Fractal Geometry of Nature.* W. H. Freeman, New York NY 1983

[8] Musgrave, F. K.; Kolb, C. E.; Mace, R. S.: *The Synthesis and Rendering of Eroded Fractal Terrains.*

[9] Musgrave, F. K.: *Grid Tracing: Fast Ray Tracing for Height Fields.* Yale Dept. of Computer Science, Research Report RR-639, July 1988

[10] Peitgen, H.-O.; Jürgens, H.; Saupe, D.: *Chaos and Fractals: New Frontiers of Science.* Springer-Verlag, New York 1992

[11] Peitgen, H.-O.; Jürgens, H.; Saupe, D.: *Fractals for the Classroom, Part One.* Springer-Verlag, New York 1992

[12] Pennoni, G.: *JOCOS: 6+1 Satellites for Global Mobile Communications.* Proc. GLOBCOMM, San Francisco CA 1994

[13] Rusch, R. J.: *Odyssey, an optimized personal communications satellite system*. IOS Press space communications, Vol. 11(1993), S. 275-286

[14] Schorcht, G.; Freund, U.; Salzwedel, H.: *Modelling and Simulation of Scenarios in Integrated Mobile Terrestrial and Satellite Communications System*s. Proc. of the 40th IWK, Ilmenau 1995

[15] Schorcht, G.; Freund, U.; Salzwedel, H.: *Visibility Analysis of Mobile Satellite Communications Systems by Means of Mountains Models*. 11th MCM COST 228, Lisbon 1995

[16] Tuck, E. F.; et al: *The Calling Network: a global teleohone network*. IOS Press space communications, Vol. 11(1993), S.141-161

[17] Vatalaro, F.; et al: *Analysis of LEO, MEO, and GEO Global Mobile Satellite Systems in Presence of Interference and Fading.* IEEE J. Select. Areas Commun. Vol. 13, No. 2, S. 291-302, Feb. 1995

[18] Watkins, C.; Sadun, A.; Marenka, S.*: Moderen Image Processing: Warping, Morphing, and Classical Techniques.* Academic Press Professional, Cambridge MA 1993

[19] Werner, M; et al: *Analysis of System Parameters for LEO/ICO-Satellite Communication Networks*. IEEE J. Select. Areas Commun. Vol. 13, No. 2, S. 371-383, Feb. 1995

[20] ----: *ETSI Technical Report: Possible European Standardisation of Certain Apects of Satellite Personal Communications Networks (S-PCN).* ETSI PT 37V, Apr. 1993

[21] ----: *RACE Final Document Part B*, RACE 1994

Autoren

Dipl.-Ing. Gunar Schorcht
Dipl.-Inf. Ulrich Freund
Technische Universität Ilmenau, PSF 327
Fäkultät für Informatik und Automatisierung
Fachgebiet System- und Steuerungstheorie
98684 ILMENAU
Tel.: +49 (0)3677-69-1201,
Fax.:+49 (0)3677-69-1303
E-mail: {Schorcht, Freund}@TheoInf.TU-Ilmenau.De