

# UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES VARIABLER RAUMGRÖSSEN AUF DIE FUNKAUSBREITUNG IN GEBÄUDEN

**Dipl.-Ing. Michael Kreger**

Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen  
Technische Universität Darmstadt

*Abstract: Die Qualität standortbezogener Dienste (Location Based Services, LBS) ist in erster Linie abhängig von der Lokalisierungsgenauigkeit der verwendeten Ortungstechnik und des Systems das die Lokalisierungsergebnisse validiert und korrigiert. Insbesondere in Gebäuden, wo GPS nicht oder nur sehr schwach empfangen werden kann, muss man auf stationäre Technologien ausweichen. Bisher ist es allerdings nicht gelungen ein Ortungssystem zu entwickeln, das exakte Positionierungsergebnisse liefert. Dies liegt vor allem an den Einflüssen, die die Gebäudestruktur auf die Ausbreitung von Funkwellen ausübt. Hierbei werden Funksignale durch mehrfache Reflexion und in Folge von unterschiedlichsten Dämpfungen dermaßen verfälscht, dass eine ausreichend genaue Berechnung einer Position nicht mehr möglich ist. Für bestimmte LBS Einsatzgebiete, wie der Indoor Navigation, ist eine möglichst genaue Positionierung von Personen und anderen beweglichen Objekten allerdings wünschenswert. Das vorliegende Paper beschreibt einen Ansatz, wie der Einfluss der Raumgröße auf die Genauigkeit von Ortungssystemen, die im Frequenzbereich von etwa 2,4 GHz (wie bspw. WLAN und RFID) arbeiten, bewertet werden kann.*

*Schlüsselwörter: Funkausbreitung, Indoor Navigation, Location Based Services, Building Information Modeling*

## 1. Einleitung

Location Based Services (LBS) sind Dienste, die im Kontext zum aktuellen Standort eines Benutzers weiterführende und interessante Informationen liefern. Dies können Informationen zur Umgebung, aber auch Navigationsanweisungen sein, um ein zuvor bestimmtes Ziel zu finden. Durch die zivile Nutzbarkeit von satellitengestützten globalen Ortungssystemen (z.B. NAVSTAR GPS) und die immer preisgünstiger werdende GPS-Empfängertechnik, haben standortbezogene Dienste bereits in unseren Alltag Einzug erhalten. Die Informationsflut nimmt allerdings mit dem Betreten eines Gebäudes ein jähes Ende. Obwohl gerade in komplexen Gebäuden standortbezogene Informationen oft viel wertvoller sind als im Außenbereich. Ein

Beispiel hierfür ist zum Beispiel ein großer Flughafen, der zum Verlaufen einlädt. Der Einsatz von LBS in Gebäuden kann aber auch Leben retten oder Kosten senken. Wenn beispielsweise Einsatzkräften bei einem Brand oder Handwerkern bei Wartungsarbeiten, mit zusätzlichen Informationen, z.B. zu Gefahrenquellen wie Gasleitungen u.a., unterrichtet werden.

Gerade für letzteres Beispiel muss die Genauigkeit eines Ortungssystems unter einem Meter liegen. Zudem sollte ein solches System geeignete Plausibilitätskontrollen implementiert haben um unrealistische Ortungsergebnisse ausschließen zu können. Innerhalb von Gebäuden kann mit einer Grundrisskarte (z.B. Gebäudemodell) und der Kenntnis über den bisher zurückgelegten Weg ein Kartenabgleich (Map Matching) durchgeführt werden, so dass viele Bereiche für die Positionsermittlung ausgeschlossen werden können.

Um eine höhere Genauigkeit bei der Lokalisierung zu erreichen, muss man über Kenntnisse zur verwendeten Ortungstechnik verfügen.

## 2. Funkwellenausbreitung in Gebäuden

Um die Einflüsse, die ein Gebäude bzw. die Gebäudegeometrie und die im Gebäude verwendeten Materialien, erkennen und untersuchen zu können, muss man wissen wie Ortungssysteme Positionswerte ermitteln. Für die Lokalisierung können die unterschiedlichsten Techniken zum Einsatz kommen. Neben akustischen und optischen Verfahren, wie Bildauswertung und Infrarotsensoren, haben sich vor allem Funktechnologien im Bereich der Ortung etabliert. Dies liegt vor allem daran, dass Funkwellen bereits früh zur Ortung im militärischen Bereich (Radar, 1904) Verwendung gefunden haben. Auch das Global Positioning System (GPS) basiert auf der Auswertung von elektromagnetischen Wellen.

### 2.1. Die elektromagnetische Welle

Eine elektromagnetische Welle entsteht in einem Schwingkreis, der aus einer Spule  $L$  und einem Kondensator  $C$  besteht und bei dem der Kondensator periodisch aufgeladen und entladen wird. In Abbildung 1 ist ein solcher Schwingkreis in Analogie zu einem mechanischen Modell dargestellt. Hierbei entspricht die potentielle Energie der Masse  $m$  der elektrischen Energie des geladenen Kondensators. Der Kondensator entlädt sich über die Spule wobei der fließende Strom in der Spule ein Magnetfeld erzeugt, dessen magnetische Energie der kinematischen Energie im mechanischen Modell entspricht. Wegen ihrer Trägheit schwingt die Masse über ihre Ruhelage hinaus und wandelt dabei ihre kinetische Energie wieder in potentielle

Energie um. Im elektrischen Schwingkreis entsteht in der Spule eine Induktionsspannung, die den Strom durch die Spule weiterreibt bis der Kondensator umgekehrt aufgeladen ist. Durch ohmsche Widerstände im Schwingkreis wiederholt sich der Vorgang bis die gesamte induzierte Energie durch die Widerstände in Wärme umgewandelt wurde. Die Reibung ist im mechanischen Modell das Analogon zum ohmschen Widerstand, welche die Schwingung dämpft. Um eine kontinuierlich ungedämpfte Schwingung produzieren muss dem Kondensator zur richtigen Zeit die verlorene Energie hinzugefügt werden.

Der geschlossene Schwingkreis, wie er in Abbildung 1 dargestellt ist, lässt sich in einen offenen Schwingkreis überführen. Bei dem in Abbildung 2 dargestellten offenen Schwingkreis spricht man auch von Hertzschem Dipol, bei dem die Kapazität  $C$  des Kondensators und die Induktivität  $L$  der Spule auf zwei in Reihe stehenden Stäbe gleichmäßig verteilt sind. Die beiden Stäbe kann man sich als die um  $90^\circ$  aufgebogenen Elektroden des Kondensators vorstellen, zwischen denen sich über die Luft das elektrische Feld  $E$  aufspannt. Das magnetische Feld  $B$  bildet sich von der Mitte des Stabes kugelförmig aus.

Wegen der Wechselwirkung von magnetischem und elektrischem Feld entsteht eine Welle (Abbildung 3) bei der beide Felder senkrecht zueinander in Phase schwingen und die sich ringförmig um die Dipol-Achse im Raum ausbreitet. Beide Felder speichern die durch die Welle transportierte Energie. Die Energie bzw. Strahlungsleistung findet sich in der Fläche, die durch die beiden Vektoren des magnetischen  $\vec{B}$  und elektrischen  $\vec{E}$  Feldes aufgespannt wird, wieder. Die zur Ausbreitungsrichtung senkrecht stehende Wellenfront ist das Vektorprodukt von  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$ . Der Vektor  $\vec{S}$  (Poyntingscher Strahlungsvektor) zeigt somit in Ausbreitungsrichtung und gibt die Strahlungsdichte wieder.

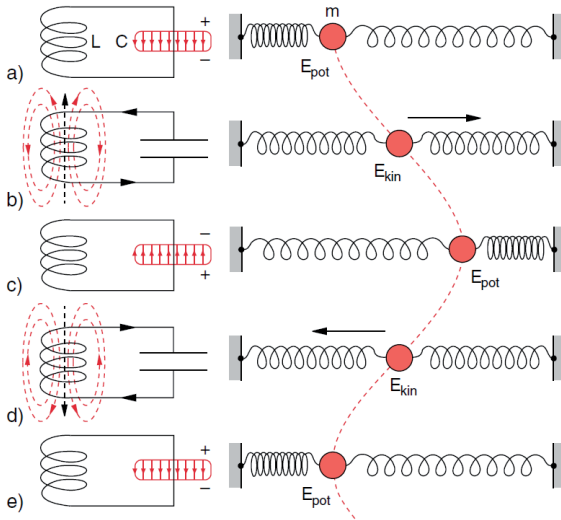


Abbildung 1a-e: Vergleich zwischen elektromagnetischem Schwingkreis und dem mechanischen Modell eines Oszillators, realisiert durch die schwingende Masse  $m$ , die zwischen zwei Federn aufgehängt ist. (Demtröder, 2009)

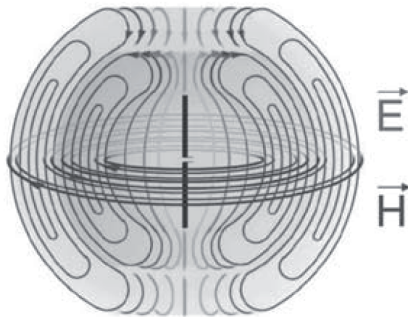


Abbildung 2: Elektromagnetische Felder an einem Dipol (Helmus et al., 2009)

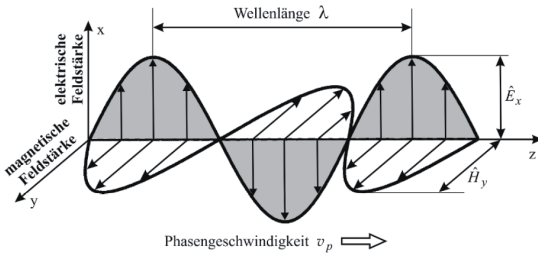


Abbildung 3: Felder einer transversalen elektromagnetischen Welle (Kark, 2011)

Die Wellenlänge  $\lambda$  in Abbildung 3 ist der Abstand zwischen zwei Feldwirbeln mit dem gleichen Richtungssinn. Die Wellenlänge ergibt sich aus dem Quotienten der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Frequenz.

$$\lambda = \frac{c}{f}; \text{ mit } c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \text{ (in Vakuum)} \quad (1)$$

Die Frequenz  $f$  ist die Anzahl der kompletten Schwingungen einer Welle pro Sekunde und wird in Hertz [Hz] angegeben.

## 2.2. Ortsbestimmung mit Funkwellen

Um mittels Funkwellen eine Ortsbestimmung durchführen zu können werden verschiedene Methoden angewandt. Die wohl am meisten verwendete Ortungsmethode ist die der Laufzeitmessung, bei der die Zeit gemessen wird wie lange ein Signal nach der Aussendung benötigt um bei einem Empfänger anzukommen. Mit der Kenntnis, das sich ein Funksignal in der Luft und im freien, ungestörten Feld mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, kann man mit der Signallaufzeit die Distanz  $D$  zwischen Sender und Empfänger berechnen.

$$D=c \cdot t; \text{ mit } c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \quad (2)$$

Mit den Entfernungsmessungen von mindestens drei bekannten Punkten aus, kann dann mittels Trilateration bzw. Multilateration die genaue Position im Raum ermittelt werden. Alternativ zur Entfernungsmessung kann auch die Berechnung über die Winkel zu bekannten Punkten mittels Triangulation eine Position im Raum ermittelt werden. Dies setzt allerdings gerichtete Antennen voraus.

Neben den aus der Geodäsie bekannten Ortungsmethoden ist die Positionsermittlung auch durch Auswertung von Signalstärken bzw. Leistungsdichten (Received Signal Strength Indicator, RSSI) möglich. Hierbei muss die zur Zeit der Messung vorhandene Sendeleistung bekannt sein. Bei konstanten Signalstärken können diese auch im Vorfeld aufgezeichnet werden. Diese aufgezeichneten Signalstärken können bei einer späteren Lokalisierung mit aktuellen Werten verglichen werden, um daraus eine Position abzuleiten.

Alternativ zur Signalstärkeaufzeichnung können Signalstärkekarten, sogenannte Heatmaps, auch mittels Simulation erstellt werden. Hierfür wurden verschiedene Tools entwickelt, die abhängig vom verwendeten Simulationsalgorithmus für einige Begebenheiten zur Ortung brauchbare Werte liefern. Diese Simulationstools haben ihren Ursprung in der Infrastrukturplanung drahtloser Netzwerke und betrachten fast ausschließlich den Dämpfungsverlauf gesendeter Signale. Aber auch andere Faktoren, wie z.B. Polarisation, Signalrauschabstand des Signals und Frequenzüberlappungen, spielen eine entscheidende Rolle beim Ausbreitungs- und Empfangsverhalten von elektromagnetischen Wellen (Luntovskyy et al., 2012).

### 2.3. Störeinflüsse auf die Funkwellenausbreitung

Auf dem Weg von einem Sender zum Empfänger verändern sich einige Welleneigenschaften auf Grund von sogenannten Ausbreitungseffekten. Zum einen nimmt mit zunehmender Entfernung zur Sendeantenne die Strahlungsdichte ab, da die Wellenfront sich ausdehnt. Das heißt bezogen auf eine angenommene Fläche wird die Strahlungsdichte mit dem Quadrat des Abstands kleiner (Detlefsen, 2006). Die Freiraumdämpfung legt somit die maximale Reichweite von Funkwellen in ungestörter Umgebung und in Abhängigkeit der Empfindlichkeit der Empfangsantenne fest.

Für eine Entfernungsberechnung über die Signallaufzeit innerhalb von Gebäuden kann der Effekt zunächst allerdings vernachlässigt werden. Dafür sind innerhalb von Gebäuden Wände und Einrichtungsgegenstände verantwortlich für weitere Effekte, die sich auf die Signalausbreitung deutlich auswirken. Eine Übersicht über vorkommende Ausbreitungseffekte ist in Abbildung 4 dargestellt.

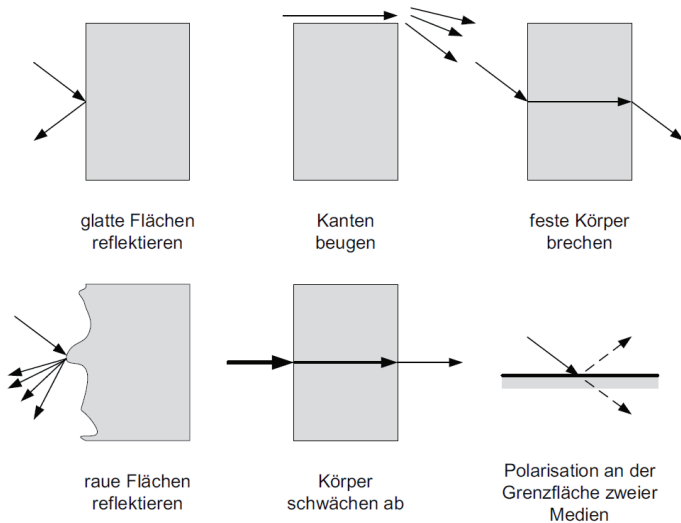


Abbildung 4: Effekte der Funksignalausbreitung (Luntovskyy, 2012)

Je nach Frequenz haben Wellen unterschiedliche Eigenschaften bei der Wellenausbreitung. Die wichtigsten Eigenschaften der Wellenausbreitung können nach Luntovskyy et al., 2012, folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Je höher die Frequenz eines Signals, desto mehr verhält sich dieses wie Licht.
- Durchdringung von Objekten wird mit zunehmender Frequenz schlechter.
- Hindernisse kleiner als Wellenlänge spielen nur eine untergeordnete Rolle.

### 3. Raumgröße als Ausbreitungseffekt

Durch die Vielzahl an Veränderungen, die ein Funksignal in Gebäuden erfährt, wird eine exakte Berechnung einer Position zur Laufzeit unmöglich. Zwar werden Computersysteme immer performanter, doch wenn man berücksichtigt dass jede Reflexion neue Wellen hervorruft, die durch weitere Reflexionen und Beugungen wieder neue Wellen entstehen lassen können, wird man schnell die Grenzen jeden Computers erreichen. Zudem interagieren die Wellen noch untereinander. Durch Bündelung und Überlagerung von elektromagnetischen Wellen können Signalverstärkungen oder auch Signalauslöschungen (Interferenzen) entstehen.

Um Ausbreitungseffekte in Gebäuden abschätzen zu können wurden verschiedene Modell (Ausleuchtungsmodelle) entwickelt, die sich in Empirische Modelle und Deterministische Modelle einteilen lassen. Letztere können wiederum in strahlenoptische Modelle, wie beispielsweise Ray Tracing, und in feldtheoretische Modelle, wie Finite Element Methoden (FEM). Die Berechnung mit solchen Modellen liefern zwar sehr gute Ergebnisse, sind aber wegen des enormen Rechenaufwands unakzeptabel. Empirische Modelle dagegen reduzieren, wie in 2.2 beschrieben auf Dämpfungserscheinungen (Freiraumdämpfung und Dämpfung von Wänden). Diese Modelle genügen oft zur Einschätzung von Signalreichweiten in Gebäuden, wofür sie auch entwickelt wurden, sind aber für eine Signalwegberechnung nur bedingt geeignet. Der größte Einfluss auf die Entfernungsberechnung über die Signallaufzeit haben Reflexionen, da ein mehrfach reflektiertes Signal einen deutlich längeren Weg zurücklegt als der tatsächliche Abstand beträgt.

Die Idee, die im vorliegenden Paper präsentiert wird, ist eine Modellbildung auf Basis eines Gebäudemodells (BIM). Im Folgenden sollen als erster Ansatz exemplarisch die Ausbreitungseffekte in Räumen näher untersucht werden. Unter der Annahme, dass die Reflexionen in Räumen mit ähnlicher Wandbeschaffenheit nahezu identisch sein müssen, muss folglich die Raumgröße einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität von Laufzeitmessungen innerhalb des Raumes und in den Nachbarräumen haben. Wenn man nun noch berücksichtigt, dass Funksignale durch die Freiraumdämpfung nur eine endliche Strecke zurücklegen können, kommt man zu folgender Behauptung:

*„Je größer ein Raum ist, desto weniger wird ein Funksignal innerhalb dieses Raumes reflektiert und umso genauer sollten die Ergebnisse einer Distanzberechnung über die Signallaufzeit sein.“*

Des Weiteren sollte es möglich sein, sofern die Behauptung zutreffend ist, einen Koeffizienten zu ermitteln, der die Qualität einer Laufzeitmessung in Abhängigkeit der Raumgröße darstellt.

Um die Behauptung zu untermauern und der Ermittlung eines Raumgröße-Koeffizienten näher zu kommen, ist es zunächst notwendig Signalmessungen in unterschiedlich großen Räumen durchzuführen und aufzuzeichnen. Hierbei musste darauf geachtet werden, dass alle untersuchten Räume im Hinblick auf die Beschaffenheit der Wände, Böden und Decke möglichst ähnlich sind. Um Störungen durch Einrichtungsgegenstände zu vermeiden sollten die Räume zudem leer sein. Die so gewonnenen Ergebnisse sollten dann mit den Ergebnissen geeigneter Ausleuchtungsmodelle verglichen werden um eventuelle Analogien feststellen zu können, die auf die Existenz eines Koeffizienten hindeuten.



## 4. Versuchsreihe zur Bestimmung des Einflusses der Raumgröße auf die Funkwellenausbreitung

Um die Messergebnisse mit gängigen Simulationsmodellen vergleichen zu können, wurden die Messungen in der beschriebenen Versuchsreihe auf die Messung der Signalstärke und nicht, wie eigentlich gewünscht, auf die Signallaufzeit beschränkt. Wie bereits erwähnt ist der Rechenaufwand bei strahlenoptischen Modellen sehr hoch, so dass für eine erste Analyse des Einflusses der Raumgröße auf die Signalausbreitung die Untersuchung der Signalstärke ausreichend sein sollte. Die Messungen wurden im Zuge einer interdisziplinären Bachelorarbeit zu diesem Thema von Haitham Afffi (Afffi, 2013) in Kooperation mit dem Fachgebiet Multimedia und Kommunikation (KOM) an der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt.

### 4.1. Versuchsaufbau

Die Messreihe wurde über mehrere Wochen in zwei angrenzenden Seminarräumen unterschiedlicher Größe auf dem Gelände der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt. In Abbildung 5 sind die vier Versuchsszenarien dargestellt, in denen der Einfluss der Raumgröße auf Signale in Sichtverbindung (Line-of-Sight, LOS) und Nicht-Sichtverbindung (Non-Line-of-Sight, NLOS) untersucht wurden. In den ersten beiden Fällen wurden sowohl Sender als auch Empfänger jeweils im gleichen Raum platziert (LOS). Bei den beiden anderen Aufbauten wurden Sender und Empfänger jeweils getrennt in den angrenzenden Räumen aufgestellt (NLOS). In Abbildung 5 sind der größere der beiden Räume (5,40m x 5,50m) mit A und der kleinere Raum (4,23m x 5,50m) mit B bezeichnet. Diese Bezeichnungen werden im Folgenden weitergeführt.

Die Messpunkte, an denen die Signalstärke aufgezeichnet wurden, waren auf der Grundfläche gleichmäßig verteilt. Dies ergab für Raum A 20 Messpunkte und für Raum B 15 Messpunkte. Um die Genauigkeit der Messungen zu erhöhen und temporäre Fehler auszuschließen wurden je Messpunkt 100 Messungen durchgeführt und die Ausreißer ausgefiltert.

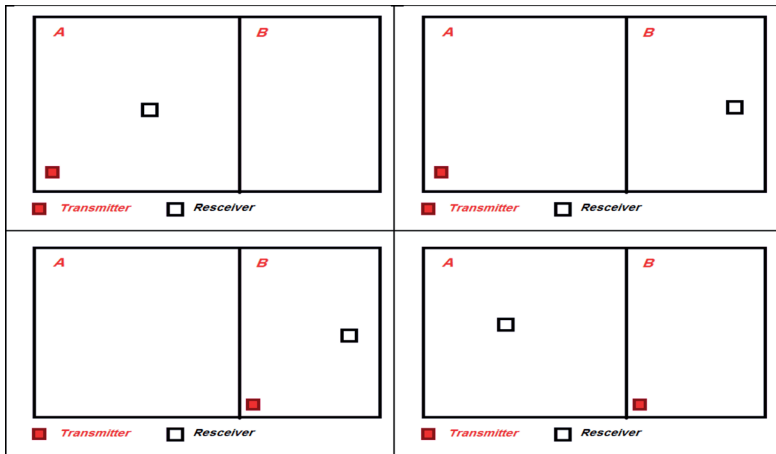


Abbildung 5: Versuchsaufbau zur Ermittlung des Einflusses der Raumgröße auf die Funkwellenausbreitung

## 4.2. Auswertung der Messergebnisse

Die Analyse der Messergebnisse ergaben, dass es eindeutig einen Zusammenhang zwischen der Raumgeometrie und der Signalstärkeverteilung im Raum vorhanden ist. In der Tabelle 1 sind die durchschnittlichen Signalverlust-Faktoren der vier Szenarien dargestellt.

Tabelle 1: Faktor der ermittelten Signalverluste abhängig von der Platzierung von Sender (Tx) und Empfänger (Rx) (Affi, 2013)

	Tx in A	Tx in B
Rx in A	1,97	1,60
Rx in B	2,00	1,40

Die oben aufgestellte Behauptung, dass es bei größeren Räumen zu weniger Reflexionen kommen muss, scheint durch die Ergebnisse der Signalverluste bestätigt worden zu sein. Denn, wenn ein Signal in einem Raum weniger oft reflektiert wird, erreichen weniger Signale den Empfänger, so dass die Signalstärke am Empfänger sinkt, bzw. der Signalverlust größer wird. Bei den beiden NLOS-Szenarios, d.h. wo Sender und Empfänger in Nachbarräumen platziert wurden, kann aus Tabelle 1 eine weitere Erkenntnis gewonnen werden. Nämlich, dass für den Signalverlust die Größe des Raumes verantwortlich ist, in dem der Empfänger installiert ist.

## 5. Fazit und Ausblick

Die Versuchsergebnisse der Untersuchung der Einflussgröße variabler Raumgrößen auf die Signalausbreitung ergaben, dass es durchaus eine Abhängigkeit zwischen Raumgeometrie und der Signalausbreitung von elektromagnetischen Wellen im 2,4 GHz Bereich gibt. Diese Abhängigkeit ließ sich für den untersuchten Fall auch generalisiert in Zahlen ausdrücken, so dass durch weitere Versuche ein Koeffizient für die Raumgeometrie gefunden werden kann. Bei der Analyse der Messergebnisse ist allerdings auch aufgefallen, dass aus Plausibilitätsgründen nicht allein die Raumgröße Auswirkungen auf die Signalausbreitung haben, sondern auch die Dimension des Raumes (Affifi, 2013). Das heißt je schmaler ein Raum bei gleicher Raumgröße ist, z.B. ein Flur, desto mehr Reflexionen treten in Richtung der größten Raumausdehnung auf. Dieser Effekt konnte bereits bei Messversuchen mit einem RFID-Ortungssystem (ebenfalls 2,4 GHz) am Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen an der TU-Darmstadt beobachtet werden (Kreger, 2011). Dieser „Tunnel-“ oder „Korridor-Effekt“ muss bei weiteren Untersuchungen zur Findung eines Raumgeometriekoeffizienten Berücksichtigung finden.

Sollte durch weitere Untersuchungen eine generelle Abhängigkeit von Raumgröße und Raumdimension auf die Signalausbreitung bestätigt werden, so ist es möglich mit den Informationen, die ein Gebäudemodell (BIM) liefert, die zu erwartenden Signalverluste zu prognostizieren.

## Quellenangaben

Affifi H. (2013) Evaluation of Link Quality in Indoor Environment for Wifi Signal, Darmstadt Juli 2013 , Bachelor Thesis KOM-B-0486

Demtröder W. (2009) Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik. Heidelberg: Springer-Verlag

Detlefsen J., Siart U. (2006) Grundlagen der Hochfrequenztechnik. München, Wien: Oldenbourg Verlag

Helmus M., Meins-Becker A., Laußat L. und Kelm L. (2009) RFID in der Baulogistik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag

Kark K. W. (2011) Antennen und Strahlungsfelder. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag

Kreger M. (2011) Laufzeitbasierte Indoor-Navigation für die Wartung von Brandschutzeinrichtungen, Darmstadt März 2011, Diplomarbeit

Luntovskyy A., Gütter D. und Melnyk I. (2012) Planung und Optimierung von Rechnernetzwerken. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag

