

1 Einleitung

Die Ausbreitungsmechanismen von elektromagnetischen Wellen innerhalb von Gebäuden und Fahrzeugen gewinnen ständig an Bedeutung. In den Arbeits- und zunehmend auch in den Freizeitbereichen haben elektronische Hilfsmittel Einzug gehalten. Zum Beispiel ist die mobile Kommunikation über das Telefon bereits seit Jahren bewährt und wird ständig verbessert und erweitert. Es werden kontinuierlich neue, nützliche Anwendungen entwickelt, die von den Kunden rege angenommen werden [1]. Zurzeit fällt das Augenmerk verstärkt auf die Vernetzung von Geräten untereinander. Hierbei erweisen sich drahtlose Standards als besonders flexibel und werden darum besser vom Kunden akzeptiert als drahtgebundene Lösungen, die oft eine umständliche Kabelführung und eine Vielzahl von Adaptern erfordern. Die Vernetzung schließt immer mehr Geräte ein. Nicht allein das Mobiltelefon, sondern auch mobile Datenbanken, Laptops und PCs sollen Daten austauschen können. Es werden sogar Szenarien entworfen, in denen Kühlschränke, Mixer oder Garagentore mit Sende- und Empfangsmodulen ausgestattet miteinander vernetzt werden [2–5].

Diese Fülle an Möglichkeiten führt zur Notwendigkeit, in immer mehr Umgebungen genaue Kenntnisse über die Ausbreitungseigenschaften für elektromagnetische Wellen, dem Medium für die Übertragung der Informationen, zu erlangen. Denn nur mit Kenntnis der Eigenschaften einer Umgebung kann bei der Systementwicklung eine optimale Nutzung der begrenzten Ressourcen erfolgen.

Diese Kenntnis der Eigenschaften kann nur schwer mit Rechenmodellen gewonnen werden, da es sich oft um sehr komplexe Umgebungen handelt [6–8]. So sind zum Beispiel Wohnräume oder Kraftfahrzeuge mit einer Fülle von

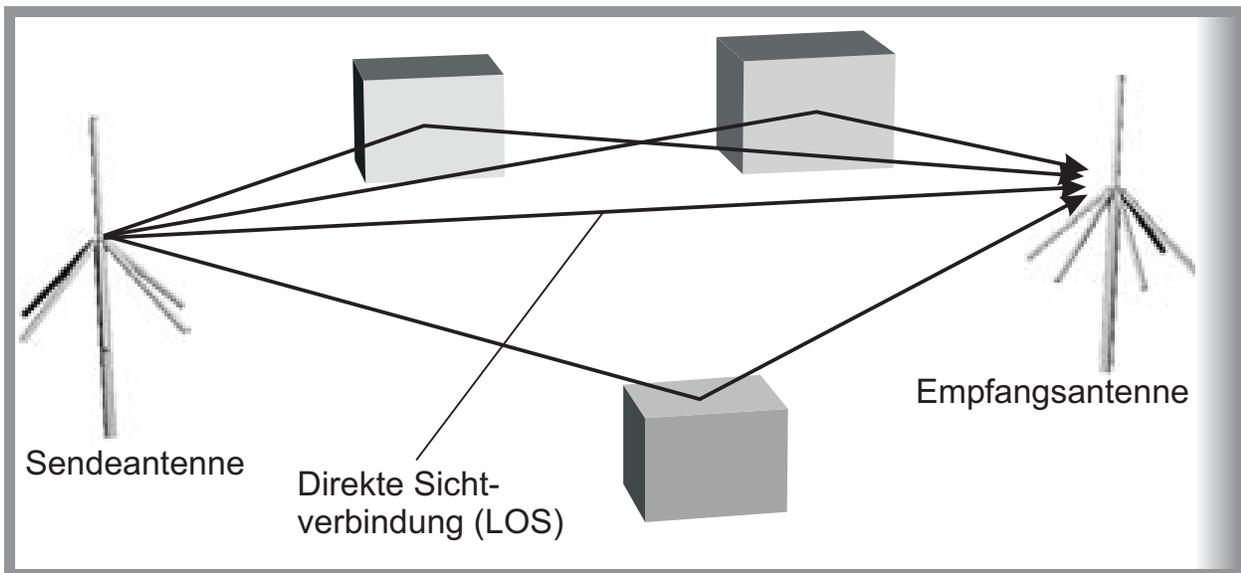


Bild 1.1: Skizze einer Umgebung mit Mehrwegeausbreitung. Das Signal der Sendeantenne gelangt über mehrere Wege zur Empfangsantenne, an der sich alle Signale überlagern.

Gegenständen gefüllt, die die Ausbreitung beeinflussen. Eine Lösung bietet die Messung in der zu untersuchenden Umgebung, die eine Beschreibung der Übertragungsstrecke liefert.

Bild 1.1 zeigt die Ausbreitung eines Signals in einer Umgebung, die Mehrwegeausbreitung zulässt. Wenn sich keine Objekte zwischen Sende- und Empfangsantenne befinden, gelangt das Sendesignal direkt zur Empfangsantenne, dieser Pfad wird mit LOS¹ bezeichnet. Das von der Sendeantenne abgestrahlte Signal kann zusätzlich von Objekten reflektiert oder gestreut werden, wodurch sich alternative Pfade ausbilden, deren Signale überlagert mit dem direkten Pfad am Empfänger detektiert werden, also interferieren. Die Reflexionen und Streuungen verlängern den Weg für das Signal, erzeugen damit eine größere Dämpfung der Amplitude und verzögern das Signal zeitlich gegenüber dem LOS-Signal. Zusätzlich verzerren die Reflexionen und Streuungen das Signal und drehen möglicherweise die Polarisation.

Das Signal am Empfänger setzt sich aus der Summe vieler einzelner Signa-

¹Engl.: *Line of Sight*

le zusammen, die eine individuelle Polarisierung, Amplitudendämpfung und Zeitverschiebung aufweisen. Einschränkend soll für diese Arbeit angenommen werden, dass die Objekte keine signifikante Verzerrung der Impulsform verursachen. Für einen Dirac-Impuls $\delta(t)$ als Sendesignal würde sich das Empfangssignal als Summe über alle k Pfade ergeben und die folgende Funktion aufweisen:

$$h(t) = \sum_k (a_k \delta(t - \tau_k)). \quad (1.1)$$

Die Amplituden a_k und Zeitverzögerungen τ_k sind in der Regel für jeden Pfad unterschiedlich und können sich durch die Bewegung von Objekten in der Umgebung zeitlich verändern [9, 10]. Die Zeit ist mit t bezeichnet.

Es hat sich gezeigt, dass es in der Praxis nicht nötig ist, alle oben genannten Parameter a_k und τ_k zu bestimmen, deren Anzahl je nach Umgebung, in der das System betrieben wird, leicht einige hundert oder tausend betragen kann. Vielmehr werden verschiedene Kanalmodelle an die Messungen angepasst. Diese Modelle erlauben eine Simulation von Übertragungsvorgängen und gestatten so eine angepasste Gestaltung und Dimensionierung der Systeme für die untersuchten Umgebungen [11].

Durch die stetige Steigerung des Bedarfs an Übertragungskapazität gelangt man schließlich an die Grenzen der physikalisch zur Verfügung stehenden Kapazität des Kanals [12] auch bei weiterer Optimierung und Verbesserung der Kodier- und Modulationsverfahren. Steigt der Bedarf weiter, wie es sich in den letzten Jahren immer wieder gezeigt hat, müssen die Eigenschaften des Kanals verbessert werden, um die physikalische Kapazität zu steigern. Da jedoch auf die Objekte in der Umgebung, die die Störungen verursachen und damit die physikalische Kapazität verringern, kaum Einfluss genommen werden kann, sind nur Änderungen an den Sende- und Empfangskomponenten möglich. Deren Optimierung erfordert jedoch ein Verständnis der Vorgänge in der Umgebung, so z.B. darüber, welche Objekte stark streuen oder reflektieren.

Sind feste Aussagen über die Umgebung möglich, wie z.B. Wände in Gebäuden, installierte Maschinen in Werkshallen oder immer gleiche Bestandteile

eines Fahrzeugs, können etwa Frequenzbereiche ausgewählt oder auch Antennen für Sender und Empfänger optimiert werden.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung ist ein Verständnis über die Entstehung der bandbegrenzten Impulsantwort von Übertragungskanälen, die von drahtlosen Kommunikationssystemen genutzt werden. Speziell Systeme, die in einer sehr komplexen Umgebung operieren müssen, sollen betrachtet werden. Die Datengrundlage für die Untersuchung wird auf Grund der komplexen Umgebung messtechnisch gelegt. Zu diesem Zweck sind im Rahmen dieser Untersuchung verschiedene Mess- und Auswertungsverfahren entstanden, die es erlauben, Messungen der Parameter einer Freiraumübertragungsstrecke vorzunehmen. Das hierbei verwendete Messsystem arbeitet im Frequenzbereich und stellt die Übertragungsfunktion für die anschließende Datenverarbeitung zur Verfügung. Die entwickelten Algorithmen erlauben statistische sowie winkeldifferenzierende Auswertungen. Als Untersuchungsobjekt dient der Innenraum eines Serienfahrzeuges (PKW), an dem allgemein für drahtlose Übertragungssysteme Fragestellungen wie optimale Senderposition und Antennencharakteristik von Interesse sind. Die im Bereich der Nachrichtentechnik häufig für die Charakterisierung der Übertragungskanäle herangezogenen Kanalmodelle sollen nicht im Mittelpunkt der Diskussion stehen. An ihnen lässt sich jedoch der Einfluss von Objekten in der Umgebung oder der Sende- und Empfangsposition in der Umgebung gut zusammenfassen, daher wird in dieser Arbeit stellenweise ein weit verbreitetes Modell genutzt.

In Kapitel 2 werden drei gängige Messverfahren vorgestellt und für die vorliegende Zielsetzung bewertet.

Daran anschließend wird in Kapitel 3 das Messsystem erläutert, das die speziellen Anforderungen der Untersuchung erfüllen kann. Das System muss in räumlich begrenzten Messumgebungen (im Bereich einiger Kubikmeter) arbeiten und für den anvisierten Frequenzbereich von 5 GHz bis 6 GHz geeignet sein. Es arbeitet vollständig dreidimensional, was eine effektive Untersuchung von kleinen und mittleren Räumen ermöglicht. Mit zweidimensionalen Mitteln wie in [13, 14] oder gar nur eindimensionalen wie in [15–17] können die komplexen Vorgänge nur unzureichend analysiert werden, da die Objekte, die

Einfluss auf die Impulsantwort haben, nicht identifiziert werden können. Nur sehr vereinzelt findet man Ansätze zu dreidimensionalen Untersuchungen [18].

Die Erläuterung des Messsystems in Kapitel 3 umfasst neben dem Versuchsaufbau die ausführliche Diskussion der Antennen und deren Verwendung. Darauf aufbauend wird die Datenverarbeitung erläutert. Die Messungen zur Verifikation des Systems sind in Kapitel 4 dargestellt.

Schließlich werden in Kapitel 5 kurz die durchgeführte Messung beschrieben und die daraus ermittelten Messergebnisse ausführlich diskutiert. Dafür werden unterschiedliche Analysen durchgeführt, deren Ergebnisse Aussagen über verschiedene drahtlose Kommunikationssysteme zulassen.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einigen Anhängen, die verschiedene Gleichungen und Tabellen mit Messergebnissen enthalten.

2 Messverfahren

Im Bereich der Mobilkommunikation – dazu sollen hier nicht nur überregionale Netze zählen, sondern auch Anlagen innerhalb von Gebäuden – wurde die Frage nach der Qualität einer drahtlosen Verbindung schon oft gestellt (vgl. z.B. [14, 17, 19–21]). Um eine sichere Versorgung der Teilnehmer zu gewährleisten, ist es in der Regel unumgänglich, die Ausbreitung nicht nur zu simulieren, sondern auch gründlich zu vermessen. Das liegt an der in der Realität meist sehr komplexen Umgebung, die trotz sehr hohen Aufwandes für die Simulation kaum befriedigend in einem elektromagnetischen Modell nachgebildet werden kann.

Für die Bewertung der Übertragungseigenschaften eines Kanals in der Kommunikationstechnik wird die Impulsantwort oder die Übertragungsfunktion des Kanals herangezogen. Beide Größen sind äquivalent und hängen über die Fouriertransformation zusammen [22]. Eine der beiden Größen ist ausreichend, um ein System zu bewerten.

Bei Messungen der Eigenschaften von Übertragungsstrecken dieser Art haben sich unterschiedliche Messverfahren etabliert [23]. Im Folgenden werden drei gängige Verfahren genauer vorgestellt.

2.1 Impulsmessverfahren

Die direkte Vorgehensweise bei der Messung einer Impulsantwort ist die Verwendung eines Impulsgenerators und eines schnellen (Speicher-) Oszilloskops. Die Messung findet damit direkt im Zeitbereich statt. Im Bild 2.1 ist eine mögliche Konfiguration skizziert.

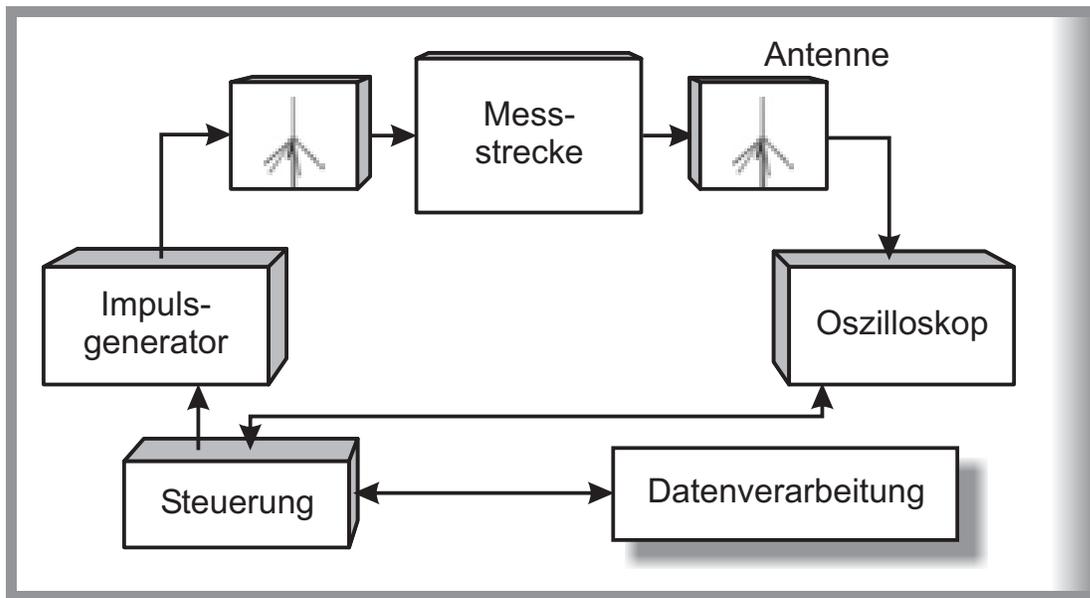


Bild 2.1: Blockschaltbild eines Messsystems nach dem Impulsverfahren.

Der Generator erzeugt die Impulse, die auf die Messstrecke gegeben werden. Am Eingang des Oszilloskops wird die Impulsform abgetastet. Aus der Verformung der Impulse kann schließlich auf die Eigenschaften der Messstrecke geschlossen werden. Da häufig kein komplettes Gerät mit Sender und Empfänger sowie gemeinsamer Steuerung zur Verfügung steht, ist in diesen Fällen eine externe Synchronisation und Steuerung der Einzelgeräte notwendig.

Der verwendete Generator muss die Möglichkeit besitzen, die gewünschte Impulsform zu liefern. Eine nachträgliche Veränderung der Form ist zwar häufig möglich, erfordert jedoch einen recht hohen Aufwand bei der Datenverarbeitung.

Um Impulse mit großen Bandbreiten zu übertragen, sind Antennen mit guten Eigenschaften über die entsprechende Frequenzbandbreite notwendig. Die Dynamik ist meist nicht so groß, da die zur Verfügung stehende Sendeleistung stark vom Spektrum der verwendeten Impulsform abhängt. Müssen Impulse mit ungünstigen spektralen Eigenschaften verwendet werden, besteht die Möglichkeit, dass bei interessanten Frequenzbereichen nur sehr wenig Sendeleistung und eine entsprechend geringe Dynamik des Messsystems zur Verfügung

steht. Die Dynamik kann durch Mittelung mehrerer Messungen verbessert werden, erfordert dann jedoch einen höheren Aufwand in der Datenverarbeitung und die Messzeit verlängert sich.

2.2 Korrelationsmessverfahren

Um eine bessere Dynamik als beim Impulsmessverfahren zu erreichen, kann das Korrelationsmessverfahren eingesetzt werden. Es arbeitet ebenfalls im Zeitbereich, verwendet jedoch eine aufwändigere Auswertung. Der Geräteaufwand ist vergleichbar mit dem Impulsmessverfahren, jedoch muss die Impulsfolge des Generators steuerbar sein, da nicht kontinuierlich Impulse gesendet werden.

Das Verfahren beruht auf der Tatsache, dass die Autokorrelationsfunktion von weißem Rauschen einen Dirac-Impuls ergibt. In der Praxis wird das Sendesignal mit einem *pseudo-noise-code* moduliert¹ und am Empfänger mit dem selben *Code* überlagert. Durch die Modulation wird der Impuls gespreizt übertragen und im Empfänger wieder komprimiert. In Bild 2.2 ist schematisch ein Beispiel mit 7 Bit *pseudo-noise-code* gezeigt.

Durch die Spreizung wird eine Steigerung der für die Messung zur Verfügung stehenden Leistung erreicht. Diese Steigerung macht sich in der Höhe des komprimierten Impulses im Empfänger bemerkbar und wird auch als Prozessierungsgewinn bezeichnet [23].

2.3 Frequenzmessverfahren

Die Messung der Übertragungseigenschaften kann auch im Frequenzbereich stattfinden. Zur Messung werden ein Sinusgenerator und eine Amplituden- und Phasenmessung des Empfangssignals benötigt. Ein vektorieller Netzwerkanalysator (VNWA) vereint beides mit einer umfangreichen Steuerungs- und

¹In der Regel wird für eine 1 im *Code* ein Impuls gesendet, während bei einer 0 kein Impuls gesendet wird. Das stellt die einfachste Form der Puls-Amplituden-Modulation dar [24].