

Kapitel 1

Einführung

Mit der Bereitstellung eines drahtlosen, breitbandigen Internetzugangs erreicht die rasante Entwicklung der Kommunikationstechnik, durch welche das letzte Jahrzehnt gekennzeichnet ist, einen vorläufigen Höhepunkt. Dieser ist charakterisiert durch das Zusammenwachsen von zwei sich bis zu diesem Zeitpunkt getrennt entwickelnden Teilbereichen: der paketvermittelten Datenübertragung des Internet und der Mobilfunktechnik. Obwohl beide Techniken während des letzten Jahrzehnts einen zunehmenden Einfluss auf das tägliche Leben gewonnen haben, ist doch jede dieser Technologien bisher einem bestimmten Anwendungsfeld vorbehalten geblieben. Während das Internet durch eine Vielzahl verschiedener Dienste vom Versand von E-Mails über den Zugriff auf Webseiten bis zu einer echtzeitigen Video- und Audioübertragung gekennzeichnet ist, beschränkt sich die Anwendung mobiler Kommunikationsverfahren derzeit primär auf die Nutzung zur Sprachkommunikation.

1.1 Motivation

Für ein Zusammenwachsen beider Felder in einem zukünftigen Mobilfunksystem der vierten Generation (4G) wird ein Übertragungssystem benötigt, das sowohl die erforderlichen Datenraten für Daten-basierte Anwendungen bereitstellt als auch die Flexibilität besitzt, eine große Anzahl zunehmend mobiler Teilnehmer gleichzeitig verarbeiten zu können. Eine wesentliche Herausforderung für ein mobiles Übertragungssystem stellen dabei die Frequenzselektivität aufgrund von Mehrwegeausbreitung und die durch die Bewegung der Teilnehmer verursachte Zeitvarianz des Mobilfunkkanals dar.

Die Anforderungen an ein zukünftiges Mobilfunksystem liegen in Bezug auf diese Eigenschaften, wie in Abbildung 1.1 dargestellt, damit deutlich über denen heutiger Systeme. Zum einen sollen durch zukünftige Systeme ähnlich hohe Datenraten wie in lokalen Mobilfunknetzen (WLAN: Wireless Local Area Network) oder drahtgebundenen Zugangnetzen (DSL: Digital Subscriber Line) realisiert werden, die über denen in bestehenden Mobilfunksystemen wie GSM (Global System for Mobile Communications) oder UMTS (Universal Mobile Transmission Standard) liegen. Zum anderen sollen weiterhin ähnlich hohe Geschwindigkeiten der Teil-

nehmer wie bereits in Mobilfunksystemen der zweiten und dritten Generation und darüber hinaus unterstützt werden.

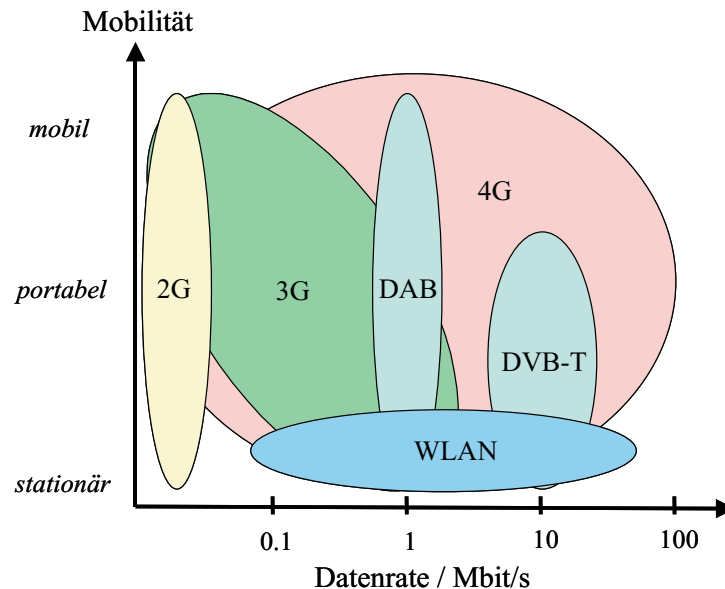


Abbildung 1.1: Zukünftige Mobilfunksysteme sollen die Datenraten von WLAN Systemen mit den Reichweiten und Geschwindigkeiten bestehender Systeme kombinieren.

In Tabelle 1.1 sind typische Anforderungen an ein Mobilfunksystem der nächsten Generation zusammengefasst, welches in dieser Arbeit betrachtet werden soll. Wesentliches Ziel ist die Bereitstellung hoher Datenraten für alle Teilnehmer unter den Randbedingungen

- Unterstützung hoher Geschwindigkeiten mobiler Teilnehmer,
- hinreichende Zellgrößen für eine flächendeckende Funkversorgung und
- eine große Anzahl gleichzeitig aktiver Teilnehmer.

Durch diese Forderung unterscheiden sich Systeme der vierten Generation insbesondere von den bestehenden Systemen der dritten Generation (UMTS). Diese Systeme bieten bereits hohe Datenraten, doch lassen sich diese nur unter gewissen Einschränkungen erreichen. Zudem ist dort eine hohen Nutzdatenrate eines Teilnehmers stets mit einer Verringerung der Anzahl aktiver Teilnehmer und zum Teil mit einer Reduktion der Reichweite verbunden.

Die Forderungen nach hohen Datenraten, hoher Mobilität der Teilnehmer und großer Teilnehmerzahlen stellen zum Teil gegensätzliche Anforderungen an ein Übertragungssystem. Die Auswahl eines geeigneten Übertragungsverfahrens und dessen Auslegung hat daher wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines solchen Systems. Dies gilt insbesondere für die Aufwärtsstrecke eines Mobilfunksystems, also die Übertragung von der Mobilstation zur zentralen Basisstation. Die Teilnehmersignale überlagern sich in der Aufwärtsstrecke erst nach der

Tabelle 1.1: Anforderungen an ein Mobilfunksystem der vierten Generation

| Parameter | Wert |
|--------------------------------|-------------------|
| Nutzdatenrate | ≥ 40 MBit/s |
| Datenrate pro Teilnehmer | ≤ 2.5 MBit/s |
| Geschwindigkeit der Teilnehmer | ≤ 120 km/h |
| Reichweite | ≥ 1 km |

Übertragung über den Mobilfunkkanal. Das Empfangssignal wird daher durch die voneinander unabhängigen Eigenschaften des Mobilfunkkanals und Synchronisationsfehler der Signale aller Teilnehmer beeinflusst. Hierdurch wird die Trennung der Signale der verschiedenen Teilnehmer durch den Empfänger deutlich erschwert. Die Übertragung zwischen Basisstation und Mobilstation in der Abwärtsstrecke stellt den im Vergleich zur Aufwärtsstrecke deutlich einfacheren Fall dar. Dort sind die Sendesignale synchron zueinander und die Übertragung aller Signale erfolgt über nur einen Kanal. In dieser Arbeit wird daher insbesondere die Aufwärtsstrecke eines Mehrteilnehmer-Systems betrachtet. Hieraus lässt sich jeweils der Spezialfall der Abwärtsstrecke ableiten.

Die orthogonale Mehrträger-Übertragungstechnik (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplex) hat aufgrund ihrer hohen Bandbreiteeffizienz und Dank der Tatsache, dass mit diesem Übertragungsverfahren die Auswirkungen der Mehrwegeausbreitung bei langen Umweglaufzeiten mit im Vergleich zu Einträger-Übertragungsverfahren geringerer Komplexität kompensiert werden können, eine herausragende Bedeutung für breitbandige Mobilfunksysteme erlangt. Bereits heute basiert eine Vielzahl von breitbandigen Mobilfunksystemen auf dieser Übertragungstechnik. Ihre Anwendung erstreckt sich dabei sowohl auf Rundfunksysteme wie den digitalen Hörfunk (DAB: Digital Audio Broadcasting) [ETS01b] und das digitale, terrestrische Fernsehen (DVB-T: Digital Video Broadcasting Terrestrial) [ETS01a] als auch auf digitale WLAN Kommunikationssysteme im Inhouse-Bereich wie IEEE 802.11a [IEE99] und IEEE 802.16a [IEE03] im Zugangsnetz. Die OFDM-Übertragungstechnik wird aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften im Mehrwegekanal als mögliches Übertragungsverfahren für ein Mobilfunksystem der nächsten Generation diskutiert [RGG01, BM02, DoC01].

Die OFDM-Übertragungstechnik bietet aufgrund der Orthogonalität ihrer Subträger eine hohe Flexibilität für den Vielfachzugriff in einem Mehrteilnehmer-Übertragungssystem. Durch die Kombination der OFDM-Übertragungstechnik mit den klassischen Vielfachzugriffsverfahren Zeitmultiplex (TDMA: Time Division Multiple Access), Frequenzmultiplex (FDMA: Frequency Division Multiple Access) oder Codemultiplex (CDMA: Code Division Multiple Access) kann eine effiziente Realisierung des Vielfachzugriffs in einem Mobilfunksystem erreicht werden. Während bestehende OFDM-Systeme insbesondere im WLAN Bereich vorwiegend auf einem TDMA-Vielfachzugriff basieren, der sich durch eine einfache Realisierung auszeichnet, zeigt die Analyse anderer Verfahren die Leistungsfähigkeit eines OFDM-Systems mit flexiblem Vielfachzugriff [RMBG98, Kai98].

1.2 Ziele der Arbeit

Während sich bisherige Arbeiten auf den Vielfachzugriff in der Abwärtsstrecke eines OFDM-Übertragungssystems konzentrieren, soll in dieser Arbeit ein Systemkonzept für die Aufwärtsstrecke eines OFDM-Übertragungssystems entwickelt und im Detail auf seine Leistungsfähigkeit hin untersucht werden.

Im Mittelpunkt der Arbeit steht hierbei sowohl die Auswahl eines geeigneten Vielfachzugriffsverfahrens als auch die Auslegung der mit dem Vielfachzugriff verbundenen Anforderungen an Synchronisation und Kanalschätzung. Auf Basis der für die verschiedenen Vielfachzugriffsverfahren einheitlich festgelegten System- und Kanalparameter erfolgt ein Vergleich der Konzepte anhand der codierten Bitfehlerrate. Dazu werden sowohl senderseitige (z.B. Zuteilung der Subträger) als auch empfängerseitige (z.B. Mehrteilnehmer-Detektion) Verfahren zur Optimierung der Übertragung betrachtet und in Hinblick auf ihre Leistungsfähigkeit, aber auch die Komplexität der Realisierung analysiert. Es werden der Einfluss der unzureichenden Synchronisation der Teilnehmer auf die Basisstation untersucht und mögliche Kompensationsverfahren betrachtet sowie ein Verfahren zur Schätzung von Synchronisationsfehlern vorgeschlagen. Schließlich wird ein Systemkonzept zur effizienten Realisierung der Kanalschätzung in der Aufwärtsstrecke diskutiert.

1.3 Gliederung

Die Eigenschaften des Mobilfunkkanals haben für den Entwurf eines OFDM-Übertragungssystems eine herausragende Bedeutung. In Kapitel 2 erfolgt daher zunächst die Darstellung des dieser Arbeit zugrunde liegenden Modells zur stochastischen Beschreibung des Mobilfunkkanals. Die grundlegenden Eigenschaften der OFDM-Übertragungstechnik werden in Kapitel 3 vorgestellt. In Kapitel 4 wird aufbauend auf den OFDM-Systemeigenschaften dargestellt, wie diese zur Realisierung des Vielfachzugriffs in einem Mehrteilnehmersystem genutzt werden können. Die Auslegung des OFDM-Systems gemäß den Anforderungen und unter Berücksichtigung des Kanals wird in Kapitel 5 diskutiert. In den Kapiteln 6, 7 und 8 werden dann die drei Vielfachzugriffsverfahren Zeitmultiplex, Codemultiplex und Frequenzmultiplex in Hinblick auf ihre Eignung für die Aufwärtsstrecke eines Mobilfunksystems detailliert analysiert. In Kapitel 9 werden der Einfluss von Synchronisationsfehlern untersucht und ein mögliches Synchronisationsverfahren vorgeschlagen. Kapitel 10 stellt schließlich ein Konzept für eine auf Pilotsymbolen basierende Kanalschätzung in der Aufwärtsstrecke vor.

Kapitel 2

Kanalmodell

Die Leistungsfähigkeit eines Kommunikationssystems wird im Wesentlichen durch die Eigenschaften des Übertragungskanals bestimmt. Dementsprechend ist eine Berücksichtigung dieser Kanaleigenschaften beim Entwurf eines Übertragungssystems unabdingbar. In diesem Kapitel wird daher ein solches Modell zur Charakterisierung eines breitbandigen, terrestrischen Mobilfunkkanals in einer zellularen Umgebung dargestellt. Dieses bildet die Grundlage des folgenden Systementwurfs und der darauf basierenden Untersuchungen.

Die Eigenschaften eines Mobilfunkkanals stellen höchste Anforderungen an ein Übertragungssystem. Die Übertragung über einen solchen Kanal ist gekennzeichnet durch Reflexion, Streuung und Beugung des Sendesignals. Diese physikalischen Phänomene stellen die Ursache für die folgenden, die Übertragung unabhängig voneinander beeinträchtigenden Effekte dar, die in diesem Kapitel betrachtet werden:

- Die *Pfaddämpfung* aufgrund der Distanz von Basisstation und Mobilstation.
- Die *Abschattung* durch Hindernisse in der räumlichen Umgebung der Stationen.
- Die *Mehrwegeausbreitung* durch Beugung und Reflexionen sowie die additive Überlagerung der Signalpfade.

Durch die Pfaddämpfung und Abschattung wird die mittlere Leistung des Empfangssignals in Abhängigkeit von der Position der Stationen bestimmt. Die Mehrwegeausbreitung hingegen beschreibt die durch die additiven Überlagerung von Signalpfaden unterschiedlicher Signallaufzeiten verursachte Veränderung der Kanalübertragungsfunktion.

2.1 Kanalrauschen

Jede Übertragung über einen Mobilfunkkanal wird durch Rauschen beeinflusst. Das Rauschen wird dabei durch eine Vielzahl von Störquellen verursacht. Hierzu zählen sowohl natürliche

Quellen wie das thermische Rauschen, aber auch zunehmend künstliche Ursachen wie Interferenzen durch andere technische Systeme (Man-made noise). Zusätzlich werden durch den Aufbau des Empfängers selbst weitere Störungen verursacht.

Aufgrund der Überlagerung einer Vielzahl unterschiedlicher Störprozesse kann das Kanalrauschen als additive, weiße und komplex Gauß-verteilte Störung modelliert werden (AWGN: Additive white Gaussian Noise). Ein Kanal, der die Übertragung ausschließlich durch AWGN-Störungen beeinflusst, wird als AWGN-Kanal bezeichnet.

Die Rauschleistung, die an der Antenne des Empfängers beobachtet wird, wird im Wesentlichen durch das thermische Rauschen bestimmt und kann durch dessen Rauschleistungsdichte

$$N_0 = k_B T_K = -174 \text{ dBm/Hz} \quad (2.1)$$

beschrieben werden [Pro95]. Hierbei ist T die absolute Umgebungstemperatur in Kelvin und $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ die Boltzmann-Konstante. Der angegebene Wert gilt für eine Temperatur von $T_K = 290 \text{ K}$. Die Rauschleistung innerhalb der Systembandbreite B ist dann durch das Produkt aus Rauschleistungsdichte und Bandbreite

$$\sigma_n^2 = N_0 \cdot B \quad (2.2)$$

gegeben.

2.2 Pfaddämpfung

Die Pfaddämpfung beschreibt die Dämpfung, die ein Signal aufgrund seiner Ausbreitung durch den Raum erfährt. Sie hängt neben ihrer Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger von zahlreichen anderen Systemparametern wie der Frequenz, der Antennencharakteristik und den Geländeeigenschaften ab.

2.2.1 Pfaddämpfung bei Freiraumausbreitung

Bei einer Freiraumausbreitung über eine hinreichend große Entfernung ist das Verhältnis zwischen der Sendeleistung σ_s^2 einer Antenne mit dem Antennengewinn G_{TX} und der Empfangsleistung σ_r^2 einer Antenne mit dem Antennengewinn G_{RX} ausschließlich durch den Fernfelddefekt der elektromagnetischen Welle bestimmt. Aufgrund der isotropen Ausbreitung des Signals nimmt die Strahlungsdichte P_d mit der Entfernung d vom Sender entsprechend

$$P_d = \frac{\sigma_s^2 G_{\text{TX}}}{4\pi d^2} \quad (2.3)$$

ab. An einem Empfänger mit einer Apertur der Empfangsantenne von

$$A_r = \frac{G_{\text{RX}} \lambda^2}{4\pi}, \quad (2.4)$$

wobei $\lambda = c/f_C$ die Wellenlänge, f_C die Trägerfrequenz und c die Lichtgeschwindigkeit beschreiben, beträgt die Empfangsleistung [DB96]

$$\sigma_r^2 = P_d A_r = \frac{\sigma_s^2 G_{TX} G_{RX} \lambda^2}{(4\pi d)^2}. \quad (2.5)$$

Die Darstellung der *Freiraumdämpfung* L_F erfolgt üblicherweise logarithmisch als

$$\begin{aligned} \frac{L_F}{dB} &= 10 \log \left(\frac{\sigma_s^2}{\sigma_r^2} \right) \\ &= 10 \log \left(\frac{(4\pi d)^2}{G_{TX} G_{RX} \lambda^2} \right) \\ &= 20 \log(d) + 20 \log(f) + L_0^F, \end{aligned} \quad (2.6)$$

wobei die Konstante L_0^F vom Gewinn der Sende- und Empfangsantenne abhängig ist.

2.2.2 Pfaddämpfung unter realen Bedingungen

Die Empfangsleistung nimmt im freien Raum mit dem Abstand d entsprechend d^2 ab. Das Modell der Freiraumausbreitung beschreibt eine Situation, bei der die Übertragung weder durch das Auftreten einer überlagerten Bodenreflektion, noch durch störende Objekte innerhalb der ersten Fresnelzone¹ beeinträchtigt ist. In einem terrestrischen Funkübertragungssystem sind diese idealen Ausbreitungsbedingungen nahezu nie anzutreffen. Die Übertragung ist vielmehr durch die Topographie der Umgebung, die Höhe der Sende- und der Empfangsantennen über Grund sowie die Sendeleistung bestimmt.

Im Allgemeinen ist es nicht möglich, den exakten Beitrag der verschiedenen Effekte auf die Pfaddämpfung des Signals analytisch zu bestimmen. Deshalb sind verschiedene vereinfachte Ausbreitungsmodelle entwickelt worden, die auf der Auswertung von Messwerten in verschiedenen Übertragungsumgebungen beruhen. Insbesondere sind hierbei die grundlegenden Arbeiten von Okumura [OOKF68], Hata [Hat80], Walfish [WB88] und Ikegami [IYTU84] zu nennen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind in die im Rahmen von COST 231 [COS99] entwickelten und zur Computersimulation geeigneten Ausbreitungsmodelle für verschiedene Geländeklassen eingeflossen.

Allen Ausbreitungsmodellen liegt dabei die Annahme einer entfernungsabhängigen Dämpfung zugrunde. Diese kann durch einen Dämpfungskoeffizienten α beschrieben werden, während die Abhängigkeit der Dämpfung von der Frequenz durch einen zweiten Koeffizienten β modelliert werden kann.

Ein vereinfachtes Modell für die Pfaddämpfung kann damit als

$$\frac{L}{dB} = \alpha \cdot 10 \log \left(\frac{d}{km} \right) + \beta \cdot 10 \log \left(\frac{f}{MHz} \right) + L_0, \quad (2.7)$$

¹Die erste Fresnelzone ist beschrieben durch einen Rotationsellipsoid, welcher die Sende- und Empfangsantennen in ihren beiden Brennpunkten enthält. Für alle Punkte des Ellipsoids ist der Abstand zu den beiden Antennen jeweils um $\lambda/2$ größer als der direkte Abstand zwischen den Antennen.

angegeben werden. Die Konstante L_0 wird dabei durch den Einfluss der betrachteten Umgebung, die Höhe der Sende- und Empfangsantennen sowie deren Charakteristik bestimmt. Sie bestimmt die Dämpfung, die ein Signal über eine Entfernung d_0 erfährt.

Der Wert des entfernungsabhängigen Dämpfungskoeffizienten α liegt für typische Übertragungsumgebungen im Bereich zwischen $\alpha = 2, \dots, 6$. In ländlichen Gebieten mit quasi-optischer Ausbreitung weist dieser in der Regel kleinere Werte auf als in städtischer Umgebung oder innerhalb von Gebäuden. Während die Frequenzabhängigkeit, beschrieben durch den frequenzabhängigen Dämpfungskoeffizienten β , für die Freiraumausbreitung einen Wert von $\beta = 2$ annimmt, liegt sie unter realen Übertragungsbedingungen im Bereich von $\beta = 2, \dots, 3$.

2.3 Abschattung

Neben der Pfaddämpfung treten unter realen Ausbreitungsbedingungen Abschattung auf, die von der Position einer Mobilstation abhängig sind. Die Abschattung führt zu einer stochastischen Schwankung der tatsächlich beobachteten Dämpfung um den durch die Pfaddämpfung beschriebenen Wert.

Es existiert kein exaktes physikalisches Modell für die Abschattung des Empfangssignals. Aus diesem Grund erfolgt die Modellierung der Beeinflussung der Übertragung durch Hindernisse und damit Abschattung durch eine Zufallsvariable, die der Pfaddämpfung aufgrund des Abstandes überlagert ist. Diese Zufallsgröße beschreibt die Ungenauigkeit der Modellierung der Pfaddämpfung aufgrund der Unkenntnis der tatsächlichen topographischen Gegebenheiten.

Während seiner Ausbreitung erfährt das Funksignal durch die sich im Ausbreitungspfad befindlichen Objekte eine Vielzahl von Einzeldämpfungen, die sich multiplikativ überlagern. Die Einzeldämpfungen können im Allgemeinen als unabhängige, identisch verteilte Zufallsvariable modelliert werden. Die multiplikative Überlagerung der Einzeldämpfungen entspricht ihrer Addition im logarithmischen Maßstab.

Die Abschattung kann daher als Lognormal-verteilte Zufallsvariable² modelliert werden [Gud91]. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF) der Empfangsleistung σ_r^2 kann unter der Bedingung der durch die momentane Pfaddämpfung verursachten mittleren Pfaddämpfung L als

$$p(\sigma_r^2 | L) = \frac{1}{\sigma_{\ln} \sigma_r^2 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln(\sigma_r^2) - \ln(L))^2}{2\sigma_{\ln}^2}} \quad (2.8)$$

beschrieben werden, wobei σ_{\ln} die Standardabweichung der Zufallsvariablen σ_r^2 in dB angibt.

Bei Modellierung der Abschattung als multiplikative Überlagerung wird die mittlere Empfangsleistung im linearen Maßstab durch die Lognormal-Verteilung um einen Faktor

$$E\{\sigma_r^2 | L\} = e^{\frac{\sigma_{\ln}^2}{2}} \cdot L \quad (2.9)$$

²Eine Lognormal-verteilte Zufallsvariable ist im logarithmischen Maßstab Gauß-verteilt.

gegenüber der konstanten, entfernungsabhängigen Pfaddämpfung verändert, was gegebenenfalls durch einen entsprechenden Korrekturterm zu berücksichtigen ist [Lin93]. $E\{x\}$ bezeichnet dabei den Erwartungswert. Der Median der Lognormal-Verteilung ist gleich der Pfaddämpfung

$$\text{Median}\{\sigma_r^2|L\} = L. \quad (2.10)$$

Wie im Falle der Pfaddämpfung wird die Standardabweichung der Abschätzung von der Übertragungsumgebung beeinflusst und nimmt typische Werte von $\sigma_{\ln} = 4, \dots, 12$ dB an. Eine dichte Bebauung sowie eine Übertragung innerhalb von Gebäuden hat aufgrund der Vielzahl von Hindernissen im Allgemeinen eine stärkere Streuung der Pfaddämpfungen um die konstante Pfaddämpfung L zur Folge als eine Übertragung in ländlichen Gebieten.

2.4 Mehrwegeausbreitung

Bei der Übertragung in einem Mobilfunksystem besteht häufig keine direkte Sichtverbindung (LOS: Line Of Sight) zwischen Sender und Empfänger. Vielmehr erreicht das Sendesignal den Empfänger als Reflexion auf einer Vielzahl indirekter Ausbreitungspfade (NLOS: Non Line Of Sight), wie es in Abbildung 2.1 dargestellt ist.

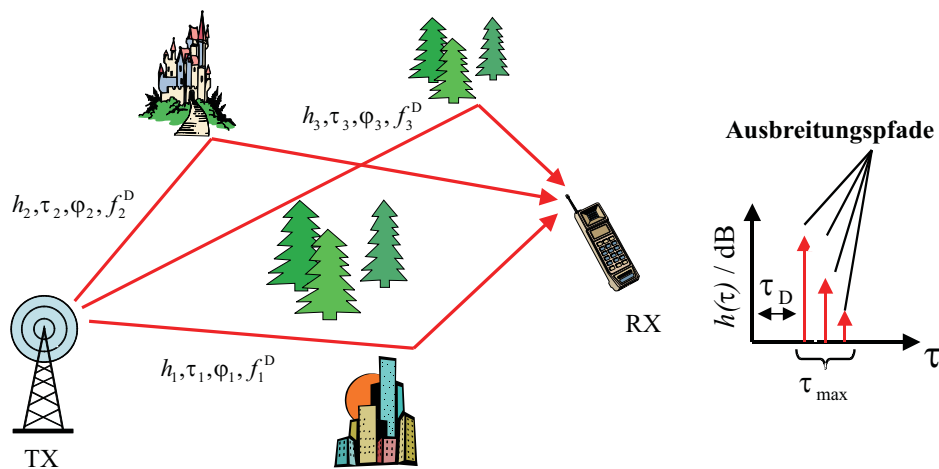


Abbildung 2.1: Im Falle einer Mehrwegeausbreitung erfolgt am Empfänger die additive Überlagerung der auf verschiedenen Pfaden empfangenen Sendesignals.

Das Sendesignal erfährt bei der Ausbreitung über verschiedene Pfade eine unterschiedliche Beugung, Streuung und Reflexion, so dass die verschiedenen Empfangssignale zeitlich gegeneinander verzögert und in ihrem Betrag sowie ihrer Phase veränderte Kopien des selben Sendesignals sind. Diese sind im Fall eines sich bewegenden Senders oder Empfängers zudem um eine von der relativen Bewegungsrichtung der Terminals und der Relativgeschwindigkeit abhängigen Doppler-Frequenz verschoben. Die additive Überlagerung der über verschiedene