

# Kapitel 1

## Einleitung

Das Zeitalter der drahtlosen Telekommunikation begann vor über 100 Jahren. Im Dezember 1894 gelang dem italienischen Erfinder und späteren Nobelpreisträger Guglielmo Marconi im heimischen Bologna die erste drahtlose Datenübertragung.

In der Zwischenzeit ist die drahtlose Telekommunikation nicht mehr aus der modernen Gesellschaft wegzudenken. Der weltweite Erfolg des GSM-Mobilfunks (Groupe Spécial Mobile) dokumentiert das Bedürfnis des Menschen, Informationen jederzeit flexibel und mobil austauschen zu können. So setzte in den letzten Jahren der Trend ein, neben der Sprache auch andere Daten drahtlos zu übertragen. Mobile Multimedia-Anwendungen und vor allem das mobile Internet sind die zentralen Themen der modernen Nachrichtentechnik.

Die technischen Herausforderungen der modernen Telekommunikation liegen einerseits in den großen Datenvolumina und andererseits in der hohen Dynamik in den Charakteristiken der Datenquellen begründet, die aktuelle und zukünftige Anwendungen auszeichnen. Um diese Herausforderungen meistern zu können, werden Systeme eingesetzt, die eine große Systembandbreite und gleichzeitig eine große Flexibilität in der physikalischen Schicht aufweisen. Ein Beispiel dafür bilden die Wireless LAN Standards HIPERLAN/2 und IEEE802.11a/g. In diesen Standards wird erstmalig die OFDM-Übertragungstechnik (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) im Rahmen eines bidirektionalen drahtlosen Telekommunikationssystems eingesetzt.

Die OFDM-Übertragungstechnik zeichnet sich durch eine besondere Robustheit in frequenzselektiven Kanälen bei geringem Realisierungsaufwand und hoher Flexibilität aus. Sie wurde bereits in den siebziger Jahren diskutiert [Sal67] [Wei71], konnte aber erst zwanzig Jahre später durch die einsetzende rasante Entwicklung der digitalen Signalprozessoren kommerzialisiert werden.

## 1.1 Link Adaption

Im Focus dieser Arbeit stehen OFDM-Systeme, die sich an den Wireless-LAN-Standards orientieren. Es werden Verfahren zur Adaption der Systemparameter an die Übertragungsbedingungen des Mobilfunkkanals untersucht. Das Ziel dieser sogenannten Link Adaption ist es, die Leistungsfähigkeit des Übertragungssystems zu steigern. Dabei ist der Zusammenhang der Systemparameter und der Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von den momentanen Kanaleigenschaften von zentraler Bedeutung.

In modernen Telekommunikationssystemen ist der Einfluss der Systemparameter und des Kanalzustands auf die Leistungsfähigkeit jedoch äußerst komplex. Eine exakte mathematische Formulierung dieses Zusammenhangs ist deshalb derart aufwendig, dass sie sich nicht für eine Ableitung von Algorithmen eignet.

Aus diesem Grund werden in der Literatur verschiedene Heuristiken aufgegriffen, die auf Expertenwissen basieren und auf gute ingenieurmäßige Lösungen führen. Diese ersten Ergebnisse zeigen das große Potential der Link Adaption auf. Um dieses Potential voll ausschöpfen zu können, ist jedoch eine systematische Betrachtungsweise erforderlich.

Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb eine Systematik entwickelt, in der die Link Adaption als Optimierungsaufgabe beschrieben wird. Dabei wird das ursprüngliche Bewertungskriterium, die Leistungsfähigkeit des Systems, durch sogenannte Ersatz-Kriterien ersetzt. Diese Ersatz-Kriterien sind im Gegensatz zum Bewertungskriterium dadurch charakterisiert, dass sich ihr Zusammenhang mit den Systemparametern und dem Kanalzustand in einer kompakten Form analytisch beschreiben lässt. Aus diesen Ersatz-Kriterien werden im Verlauf der Arbeit Algorithmen zur Link Adaption entworfen.

Die in der Literatur bekannten Heuristiken können dabei als Ersatz-Kriterien aufgefasst und damit in die Systematik eingeordnet werden. Der eigentliche Vorteil der Systematik besteht jedoch nicht in der Einordnung oder der Klassifizierung der in der Literatur bekannten Ansätze, er liegt vielmehr darin begründet, dass diese systematische Betrachtungsweise über der eindeutigen Definition des Bewertungskriteriums neue Möglichkeiten eröffnet, weitere Ersatz-Kriterien zu entwickeln und zu bewerten.

Der Vorteil dieser Systematik lässt sich durch das in dieser Arbeit neu abgeleitete Ersatz-Kriterium demonstrieren. Es wird analytisch aus dem Bewertungskriterium Paketfehlerrate abgeleitet und zeichnet sich durch eine Gesamtsystemsicht aus. Dadurch bietet dieses neue Ersatz-Kriterium großes Potential für die Adaption der Systemparameter, das sich in den guten Ergebnissen der abgeleiteten Algorithmen widerspiegelt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Potenzial verschiedener Ersatz-Kriterien untersucht, die sich in Form der Berücksichtigung der Kanal- bzw. Systemeigenschaften unterscheiden. Dazu werden klassische Adaptionaufgaben exemplarisch aufgegriffen. Für jede Aufgabe werden

aus den Ersatz-Kriterien entsprechende Algorithmen abgeleitet und ihre Leistungsfähigkeit mit numerischen Untersuchungen ermittelt und anhand des Bewertungskriteriums verglichen.

## 1.2 Gliederung

Die Arbeit gliedert sich in 7 Kapitel. Im folgenden Kapitel wird der Mobilfunkkanal detailliert analysiert. Dabei werden für die physikalischen Phänomene, die den Kanal charakterisieren, deterministische Modelle vorgestellt. Diese Modelle werden in eine stochastische Beschreibung überführt und zu einem stochastischen Kanalmodell zusammengefasst. In diesem Kanalmodell ist neben der Frequenzselektivität auch das Ausbreitungsverhalten innerhalb der Mobilfunkzelle berücksichtigt.

Im Kapitel 3 wird das OFDM-System vorgestellt. Es wird gezeigt, dass die OFDM-Übertragungstechnik nicht nur den Realisierungsaufwand einer Datenübertragung über frequenzselektive Kanäle begrenzt, sondern zusätzlich bei geeigneter Parameterwahl ein informationstheoretisches Optimum erreicht. Darüber hinaus werden die charakteristischen Verarbeitungsböcke des OFDM-Systems analysiert. Diese Analyse wird im folgenden Kapitel aufgegriffen, um daraus Ersatz-Kriterien herzuleiten.

Im Anschluss an diese Grundlagen-Untersuchungen werden verschiedene Link-Adaptionsaufgaben aufgegriffen und mit Hilfe unterschiedlicher Ersatz-Kriterien gelöst. So wird in Kapitel 4 die Adaption der OFDM-Systemparameter an die subträgerspezifischen Kanalbedingungen untersucht. Bei dieser sogenannten Adaptiven Modulation wird die Verbindung der Basisstation mit einem einzelnen mobilen Nutzer betrachtet. Darauf aufbauend werden in Kapitel 5 die Untersuchungen auf mehrere Nutzer ausgedehnt. Dabei steht die Adaptivität des Vielfachzugriffs im Mittelpunkt.

Bei diesen Analysen wird davon ausgegangen, dass vorab festgelegt wurde, mit welcher Datenrate jeder mobile Nutzer versorgt wird. Im Kapitel 6 werden Strategien untersucht, die die Auswahl dieser Datenrate unterstützen sollen. Dazu werden die Ersatz-Kriterien erneut aufgegriffen und auf ihre Eignung zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit des OFDM-Übertragungssystems untersucht. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse.



# Kapitel 2

## Der Mobilfunkkanal

Eine besondere Herausforderung der Nachrichtentechnik ist die Übertragung von Daten über einen Mobilfunkkanal. In diesem Kapitel werden die Eigenschaften dieses Kanals ausführlich vorgestellt und analysiert.

Die Charakteristiken dieses Übertragungskanals beeinflussen maßgeblich das Design des Datenübertragungssystems bis hin zur Auswahl einer geeigneten Übertragungstechnik. Bei der Optimierung der Systemparameter im Rahmen der Link Adaption ist es daher notwendig, die alternativen Parametersätze unter dem Einfluss des Mobilfunkkanals zu vergleichen. Um dabei allgemein gültige Aussagen treffen zu können, ist es wichtig, die Systemuntersuchungen ohne spezifische Annahmen der geometrischen Anordnung (specific terrain data) durchzuführen. Mit dieser Zielsetzung wird in diesem Kapitel eine stochastische Modellierung des Mobilfunkkanals vorgestellt, die im Verlauf dieser Arbeit zur Analyse der vorgestellten Übertragungstechniken dienen wird.

Die Nomenklatur in dieser Arbeit orientiert sich aus historischen Gründen am Downlink, der Datenübertragung von einer fest installierten Basisstation zu einem mobilen Nutzer. Durch die Symmetrieeigenschaften des Mobilfunkkanals haben die abgeleiteten Formalismen und Ergebnisse aber auch für den Uplink uneingeschränkt ihre Gültigkeit.

Basis der Modellierung ist die Beschreibung des Mobilfunkkanals als lineares System laut [Bel63]. Durch die Bewegungen der Hindernisse, Reflektoren und nicht zuletzt der mobilen Nutzer, zeigt der Mobilfunkkanal ein zeitvariantes Verhalten.

Die charakteristischen Eigenschaften des zeitvarianten Kanals lassen sich auf unterschiedliche physikalische Phänomene zurückführen. Sie werden in drei Gruppen eingeteilt, die als Large-Scale, Medium-Scale und Small-Scale-Effekte bezeichnet werden. Sie unterscheiden sich in der Größenordnung der zugrunde liegenden Distanzen bzw. Zeiten. [Lin93]

Die Large-Scale und Medium-Scale-Effekte beschreiben das Verhalten der mittleren Signalleistung bei Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen. Durch die Bewegung des mobilen Nutzers innerhalb einer Zelle verändert sich kontinuierlich die geometrische Anordnung des Empfängers zum Sender. Gleichermaßen verändern sich die entsprechenden Kanalparameter. Es resultiert eine Variation der mittleren Empfangsleistung mit dem Ort. Da dieses Phänomen durch die geometrische Anordnung dominiert wird, ändert sich das Verhalten des Mobilfunkkanals aufgrund dieser Effekte in den zeitlichen Abschnitten, in denen sich die Geometrie maßgeblich verändert. Da es sich dabei um relativ große zeitliche Dimensionen handelt, werden diese Effekte mit dem Begriff Slow-Fading bezeichnet. Im Rahmen dieser Arbeit werden Zeitabschnitte betrachtet, in denen sich die Geometrie nicht maßgeblich verändert. Trotzdem muss Slow-Fading bei verschiedenen Untersuchungen berücksichtigt werden, um die Ortsabhängigkeit des Übertragungskanals darzustellen.

Im Gegensatz zu den Large-Scale und Medium-Scale-Effekten geht aus den Small-Scale-Effekten die momentane Empfangsleistung hervor. Diese Effekte sind maßgeblich auf die Mehrwegeausbreitung zurückzuführen. Da sich die Phasenbeziehungen der Ausbreitungspfade bereits bei einer Bewegung in der Größenordnung der Wellenlänge verändern, wird der Einfluss dieses physikalischen Effekts in relativ kleinen zeitlichen Abschnitten wirksam. Darum wird in diesem Zusammenhang der Begriff des Fast-Fading verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit wird durch das Fast-Fading die Zeitabhängigkeit des Übertragungskanals modelliert.

Diese Klassifizierung des Kanalverhaltens in Slow-Fading und Fast-Fading lässt sich besonders deutlich für den Sonderfall eines Schmalbandkanals demonstrieren. In diesem Fall ist die Verzögerung des Sendesignals über die verschiedenen Ausbreitungspfade  $l$  annähernd gleich groß  $\tau_l \approx \tau$ . Der Unterschied der Verzögerungen ist klein im Vergleich zum Kehrwert der Systembandbreite  $\tau - \tau_l \ll W_{\text{System}}^{-1}$  und kann damit vernachlässigt werden. In diesem Fall kann die momentane Empfangsleistung  $P_{\text{Rx}}(t)$  als Produkt aus der Sendeleistung  $P_{\text{Tx}}(t)$  und einem Leistungsübertragungsfaktor  $L_{\text{PL}}$  im sogenannten Pfad-Dämpfungs-Modell (Path-Loss-Modell) beschrieben werden.

$$P_{\text{Rx}}(t, \xi_{\text{Tx}}, \xi_{\text{Rx}}) = P_{\text{Tx}}(t - \tau) \cdot L_{\text{PL}}(t, \xi_{\text{Tx}}, \xi_{\text{Rx}}) \quad (2.0.1)$$

Dabei hängt der Leistungsübertragungsfaktor  $L_{\text{PL}}(t, \xi_{\text{Tx}}, \xi_{\text{Rx}})$  von dem Beobachtungszeitpunkt  $t$  und der geometrischen Anordnung des Senders und des Empfängers ab. Die aktuelle Position des Senders ist durch den Wert  $\xi_{\text{Tx}}$  und die des Empfängers durch  $\xi_{\text{Rx}}$  beschrieben, siehe Abbildung 2.1. Der Kehrwert  $L_{\text{PL}}^{-1}$  wird als Pfad-Dämpfung (Path-Loss) bezeichnet.

Der Schmalbandkanal kann demnach durch einen Leistungsübertragungsfaktor beschrieben werden, der sowohl die Zeitabhängigkeit (Fast-Fading) als auch die Abhängigkeit von der Geometrie (Slow-Fading) modelliert. Da diese Phänomene auf unabhängigen physikalischen Vorgängen basieren, können sie unabhängig voneinander beschrieben werden. Dazu wird die Pfad-Dämpfung in zwei Faktoren aufgespalten:

$$L_{\text{PL}}(t, \xi_{\text{Tx}}, \xi_{\text{Rx}}) = \bar{L}_{\text{SF}}(\xi_{\text{Tx}}, \xi_{\text{Rx}}) \cdot L_{\text{FF}}(t) \quad (2.0.2)$$

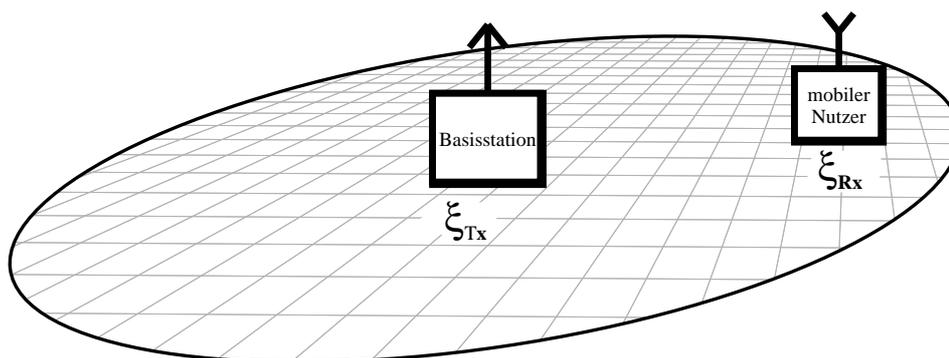


Abbildung 2.1: Position des Senders und des Empfängers in der betrachteten Mobilfunkzelle

Der zeitvariante Fast-Fading-Faktor  $L_{\text{FF}}(t)$  beschreibt die Abhängigkeit der Pfad-Dämpfung von der momentanen Superposition der Ausbreitungspfade. Der Kehrwert des Fast-Fading-Faktors wird als Small-Scale-Pfad-Dämpfung bezeichnet. Im Gegensatz dazu modelliert der ortsabhängige Slow-Fading-Faktor  $\bar{L}_{\text{SF}}(\xi_{\text{Tx}}, \xi_{\text{Rx}})$  den Einfluss der Pfad-Dämpfung von der geometrischen Anordnung des Senders und des Empfängers.

Fasst man das Sendesignal und die Leistungsfaktoren als stochastische Prozesse auf, kann man aufgrund der unterschiedlichen zugrundeliegenden physikalischen Effekte von einer statistischen Unabhängigkeit der Leistungsfaktoren ausgehen. Zusätzlich kann angenommen werden, dass das erste Moment des Fast-Fading-Faktors unabhängig vom betrachteten Zeitpunkt  $t$  ist [Bel63]. Normiert man zusätzlich seinen Erwartungswert zu Eins:  $\mathcal{E}\{L_{\text{FF}}(t)\} = 1$ , repräsentiert der Slow-Fading-Faktor den Erwartungswert des Leistungsübertragungsfaktors  $L_{\text{PL}}$  für eine spezielle geometrischen Anordnung  $(\xi_{\text{Tx}}, \xi_{\text{Rx}})$ .

$$\bar{L}_{\text{SF}}(\xi_{\text{Tx}}, \xi_{\text{Rx}}) = \mathcal{E}\{L_{\text{PL}}(t, \xi_{\text{Tx}}, \xi_{\text{Rx}}) | \xi_{\text{Tx}}, \xi_{\text{Rx}}\} \quad (2.0.3)$$

Durch diese Normierung kann die mittlere Empfangsleistung  $\bar{P}_{\text{Rx}}(\xi_{\text{Tx}}, \xi_{\text{Rx}})$  aus dem Produkt aus mittlerer Sendeleistung  $\bar{P}_{\text{Tx}}$  und dem Slow-Fading-Faktor  $\bar{L}_{\text{SF}}(\xi_{\text{Tx}}, \xi_{\text{Rx}})$  errechnet werden.

$$\bar{P}_{\text{Rx}}(\xi_{\text{Tx}}, \xi_{\text{Rx}}) = \bar{P}_{\text{Tx}} \cdot \bar{L}_{\text{SF}}(\xi_{\text{Tx}}, \xi_{\text{Rx}}) \quad (2.0.4)$$

Die mittlere Empfangsleistung unter Annahme einer bestimmten geometrischen Anordnung wird als Local-Mean-Power bezeichnet.

Wie bereits deutlich wurde, basiert das beschriebene Pfad-Dämpfungs-Modell (2.0.1) auf der Annahme eines Schmalbandkanals. Daher kann dieses Modell nicht für die Kanalmodell-

lierung von breitbandigen Kommunikationsanwendungen eingesetzt werden. Mit der Aufspaltung (2.0.2) ist es jedoch gelungen, die Phänomene des Slow-Fading und das Fast-Fading zu entkoppeln. Aus diesem Grund kann Gleichung (2.0.4) trotzdem als Ausgangspunkt für die Modellierung von Breitbandkanälen dienen. Sie bildet die Grundlage für die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Kanalmodelle.

Im folgenden Abschnitt werden die Ansätze vorgestellt, die bei der Modellierung des Slow-Fading Anwendung finden. Anschließend wird die Mehrwegeausbreitung für breitbandige Kommunikationsanwendungen analytisch beschrieben. Die Kombination aus den Modellen des Slow-Fading und der Mehrwegeausbreitung bilden die Basis für die numerischen Untersuchungen dieser Arbeit.

In dem betrachteten System ist die Trägerfrequenz um ein Vielfaches höher als die Systembandbreite. Daher wird aus Gründen der Übersichtlichkeit in dieser Arbeit die Modellierung des Mobilfunkkanals im äquivalenten Tiefpassbereich (complex baseband) vorgenommen [Pro89].

## 2.1 Slow-Fading

In diesem Abschnitt werden Modelle vorgestellt, die den Slow-Fading-Charakter eines Mobilfunkkanals nachbilden. Wie bereits erwähnt, beschreibt das Slow-Fading die Abhängigkeit des Kanals von der geometrischen Anordnung. Dabei wird zwischen Large-Scale und Medium-Scale-Effekten unterschieden. [Lin93]

Der Large-Scale-Effekt beschreibt die Abhängigkeit des Kanals von der Distanz zwischen Sender und Empfänger. Er dominiert beispielsweise die Wellen-Ausbreitung im freien Raum (free space). Dort hängt die mittlere Empfangsleistung nicht von der tatsächlichen Position des Senders  $\xi_{Tx}$  und des Empfängers  $\xi_{Rx}$  ab, sondern lediglich von der Distanz  $r \stackrel{\text{def}}{=} |\xi_{Tx} - \xi_{Rx}|$ .

In der Praxis wird die Wellenausbreitung jedoch zusätzlich durch die Medium-Scale-Effekte beeinträchtigt. Sie repräsentieren vor allem die Abschattung durch Hindernisse.

Da diese Phänomene auf unterschiedlichen physikalischen Vorgängen basieren, können sie unabhängig voneinander modelliert werden. Zu diesem Zweck wird der Erwartungswert der mittleren Empfangsleistung (Local-Mean-Power) in einem Abstand  $r$  definiert. Er wird Area-Mean-Power  $\bar{\bar{P}}_{Rx}(r)$  genannt.

$$\bar{\bar{P}}_{Rx}(r) \stackrel{\text{def}}{=} \mathcal{E} \left\{ \bar{P}_{Rx}(\xi_{Tx}, \xi_{Rx}) \Big|_{|\xi_{Tx} - \xi_{Rx}|=r} \right\} \quad (2.1.1)$$

$$= \bar{P}_{Tx} \cdot \bar{\bar{L}}_{LS}(r) \quad (2.1.2)$$

$$\text{mit } \bar{\bar{L}}_{LS}(r) \stackrel{\text{def}}{=} \mathcal{E} \left\{ \bar{L}_{SF}(\xi_{Tx}, \xi_{Rx}) \Big|_{|\xi_{Tx} - \xi_{Rx}|=r} \right\} \quad (2.1.3)$$