

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die individuelle Mobilität gilt heute als ein fundamentales Charakteristikum einer modernen Gesellschaft und als Antrieb für die wirtschaftliche Entwicklung. Jährlich ist ein signifikantes Wachstum im Personenverkehr festzustellen. Dieses Wachstum wird größtenteils durch die Zunahme im motorisierten Individualverkehr getragen. Eine positive Entwicklung ist, dass trotz des Wachstums im Kraftfahrzeugbestand die jährliche Zahl der Verkehrstoten nach den Daten des Statistischen Bundesamtes seit drei Dekaden sinkt (siehe Abbildung 1-1) [Sta09]. Die Erhöhung der Verkehrssicherheit war und ist von hohem gesellschaftlichem Stellenwert.



Abbildung 1-1: Entwicklung der Zahl der Verkehrstoten [Sta09]

Diese Entwicklung ist auf verkehrspolitische Maßnahmen, Verbesserungen im Rettungswesen und auf technische Maßnahmen zurückzuführen. Zu den technischen Maßnahmen gehört die Einführung von Systemen der passiven Sicherheit, z.B. die optimierten Fahrgastzellen und Airbags, und der aktiven Sicherheit, z.B. das Antiblockiersystem (ABS) und das Elektronische-Stabilitäts-Programm (ESP). Während die Systeme der passiven Sicherheit dazu dienen, die Unfallfolgen zu reduzieren, dienen die Systeme der aktiven Sicherheit in erster Linie der Vermeidung von Unfällen. Durch Systeme wie PRE-SAFE von Mercedes-Benz wachsen aktive und passive Sicherheit zusammen. Die Sensoren aktiver Sicherheitssysteme werden dabei genutzt, das Fahrzeug und die Insassen durch die Aktivierung passiver Sicherheitselemente auf einen nicht mehr vermeidbaren Unfall vorzubereiten –

beispielsweise durch das Schließen von Fenstern und Schiebedach, das Aufrichten der Sitzlehnen oder die Aktivierung der reversiblen Gurtstraffer.

In modernen Fahrzeugen (PKW und LKW) unterstützen so genannte Fahrerassistenzsysteme (FAS) den Fahrer<sup>1</sup> beim Führen des Fahrzeugs zum Einen aus Sicherheitsgründen, zum Anderen zur Erhöhung des Fahrkomforts. Letztlich beeinflusst ein höherer Fahrkomfort das physische und psychische Leistungsvermögen des Fahrers. Damit trägt der erhöhte Fahrkomfort ebenfalls zur Erhöhung der Verkehrssicherheit bei. Durch den Fortschritt in der Rechenleistung von eingebetteten Systemen sowie einer beständigen Verkleinerung von elektronischen Komponenten wurden in den vergangenen Jahren eine Vielzahl von FAS im Fahrzeug darstellbar. Um weitere Potenziale zur Minderung der Unfallzahlen zu erschließen, werden die FAS permanent und unter Berücksichtigung von Erkenntnissen aus der Unfallforschung weiterentwickelt.

Die Unfallstatistiken zeigen beim Zusammentreffen von LKW mit einem Radfahrer oder Fußgänger ein besonderes hohes Gefahrenpotenzial. Bei derartigen Situationen begegnen sich die größten und schwersten Verkehrsteilnehmer mit den kleinsten ungeschützten Verkehrsteilnehmern (UVT). Allein innerhalb der Europäischen Union führen Unfälle zwischen LKW und UVT zu tödlichen Verletzungen bei 400 Menschen jährlich [EU06]. Oft handelt es sich dabei um LKW, die innerorts rechts abbiegen<sup>2</sup>. Dies bestätigt auch die Untersuchung der DEKRA-Unfallforschung, die im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) rund um die Problematik der rechts abbiegenden LKW durchgeführt wurde [NB05]. Dieser Untersuchung nach erfolgt der Erstkontakt in der Mehrzahl dieser Unfälle (57%) im Bereich der rechten vorderen LKW-Ecke. Der LKW-Seitenschutz gilt gerade einmal bei 7% dieser Unfälle von UVT als Bereich für den Erstkontakt. Eine zentrale Ursache für diese Unfälle liegt im eingeschränkten direkten und indirekten Sichtfeld der LKW-Fahrer auf die unmittelbare Umgebung des Fahrzeugs. Direkt vor und hinter dem Fahrzeug gibt es von der Sitzposition des Fahrers betrachtet einen Sichtschatten. Dieser Sichtschatten hat im Bereich der rechten vorderen LKW-Ecke eine signifikante Ausprägung, was auch eine Ursache für die häufigen Erstkontakte bei Unfällen mit UVT ist. Des Weiteren ist das Manövrieren unter diesen Bedingungen anstrengend. Die so genannte Spiegelrichtlinie der Europäischen Union [EU04], die in nationalen Beschlussprozessen [DB07] berücksichtigt ist, sieht eine Verbesserung dieser

---

<sup>1</sup> Im weiteren Verlauf des Textes wird immer die männliche Form der Anrede verwendet. Es werden damit selbstverständlich auch die Leserinnen angesprochen.

<sup>2</sup> Dies gilt für Fahrzeuge mit Linkslenker. Die Aussagen gelten analog auch für Rechtslenker.

Sichtfelder vor. Für die bereits vorgeschriebenen Haupt-, Weitwinkel- und Anfahrspiegel ist ein zusätzliches Sichtfeld für den Bereich vor dem LKW vorgesehen. Diese Richtlinie ermöglicht explizit die Darstellung des vorgeschriebenen zusätzlichen Sichtfeldes auch durch Kamera-Monitor-Systeme. Bereits heute sind in Japan Rückfahrkameras für neue Fahrzeuge Pflicht, in den USA sollen sie zwischen 2012 und 2015 schrittweise über einen Flottenanteil vorgeschrieben werden [DOT10].

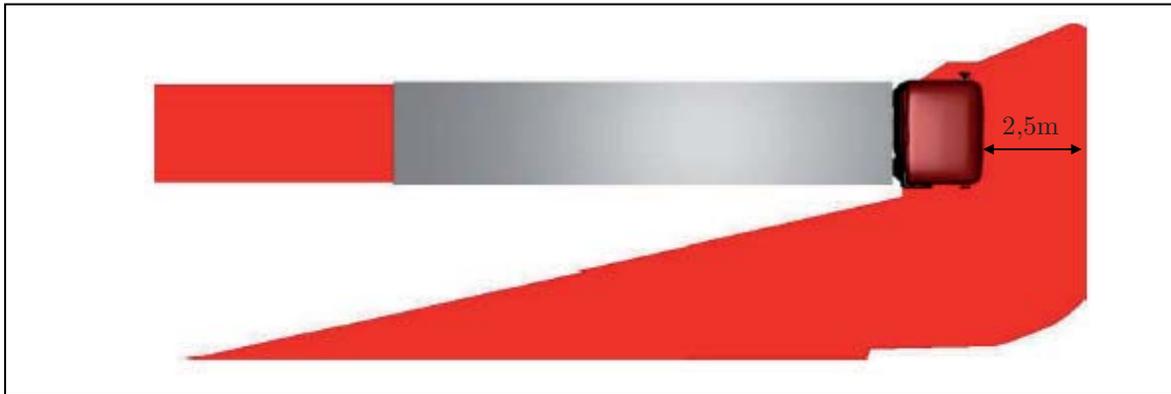


Abbildung 1-2: Sichtschatten (rote Fläche) am Beispiel eines LKW (Actros 1846) mit Sattelanhänger und Standardspiegelsystemen [Ehl08]

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Übertragungstechnik für ein kamerabasiertes System, das dem Fahrer das komplette Fahrzeugumfeld auf einem einzigen Display darstellen kann. Damit sind auch die Bereiche des Sichtschattens aus Abbildung 1-2 sichtbar. Um das zu ermöglichen, werden vier Kameras eingesetzt, zwei an den vorderen Ecken des LKW und zwei an den hinteren Ecken des Anhängers. Die vier Videoströme der Kameras werden zu einem einzigen Bild aus der Vogelperspektive zusammengerechnet. Abbildung 1-3 zeigt eine derartige Darstellung für einen LKW mit Sattelanhänger und für einen PKW mit zusätzlicher Objektdetektion für die Ermöglichung einer Fußgängererkennung.

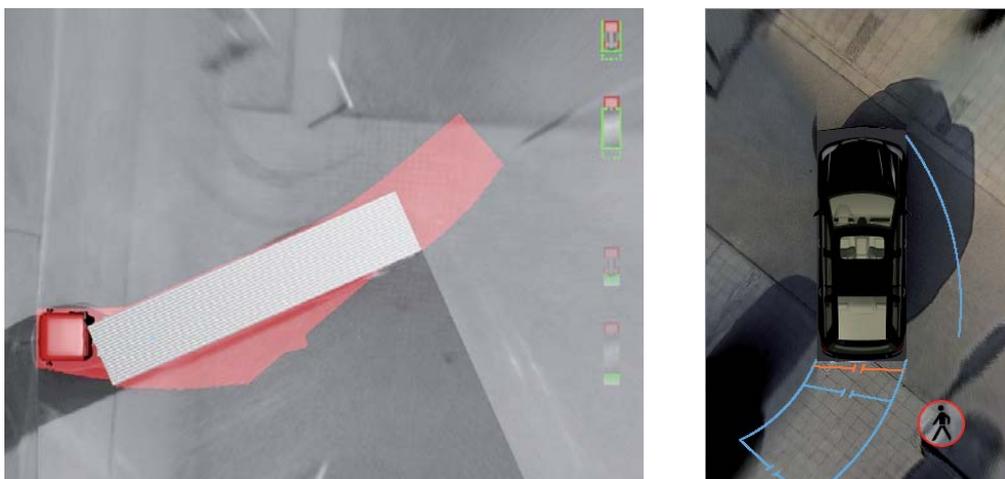


Abbildung 1-3: Vogelperspektivische Darstellung LKW (links) und PKW (rechts)

Um den Verkabelungsaufwand zu reduzieren und um zwischen dem LKW und dem Anhänger komplett steckerfrei zu bleiben, sind die Kamerasignale funkbasiert zu

übertragen. Das ist eine zentrale Anforderung, um den Aufwand für den häufigen Wechsel der Anhänger zu minimieren und den wirtschaftlichen Interessen der Speditionen zu entsprechen. Die folgende Abbildung zeigt die Kamera-Positionen und mögliche Antennen-Positionen für die Funkübertragung.



Abbildung 1-4: Kamera-Positionen und mögliche Antennen-Positionen an einem LKW

### Motivation für eine generische Basisband-UWB-Architektur

Zur Verbesserung der Darstellungseigenschaften und der Objekt-Erkennung (z.B. Fußgänger-Erkennung) werden bei den Fahrerassistenzsystemen Kameras mit immer höheren Auflösungen und Dynamikumfangen eingesetzt. Dies führt zu einer höheren Datenrate der Kameraschnittstelle. Aktuelle Entwicklungen bei den FAS-Kameras haben einen Datenraten-Bedarf in der Größenordnung von 1Gbit/s.

In den letzten Jahren wurden verschiedene Frequenzbänder, welche durch ihre hohe Bandbreite auch einen hohen Datendurchsatz im Kurzstrecken-Bereich ermöglichen, zur Nutzung freigegeben. Zu diesen Frequenzbändern gehören u.a. die Ultra-Wideband-Bänder (kurz UWB) von 6-8,5GHz. Kurzstrecken-Datenübertragungen in diesen UWB-Bändern konnten bereits in früheren Forschungsarbeiten für Datenraten im Bereich von Gbit/s nachgewiesen werden [Ben05], [OHI04], [Ree05].

Systeme, die in der Lage sind in diesen Bändern mit hohen Datendurchsätzen zu arbeiten, benötigen alle eine anspruchsvolle digitale Basisband-Signalverarbeitung. Diese muss die Verarbeitung von Signalen im Bereich von Gbit/s ermöglichen. Daraus resultiert für alle diese Systeme der Bedarf an einer sehr hohen Rechenleistung und einer sehr hohen Datenrate der Schnittstellen. FPGA-basierte Architekturen ermöglichen in einem sehr hohen und flexiblen Maße, die Parallelisierung der digitalen Basisband-Signalverarbeitung in Kombination mit sehr hohen Datenraten der Schnittstellen. Heutige Fahrzeug-Steuergeräte besitzen meist eine heterogene Architektur [KL<sup>+</sup>10]\* bei der beispielsweise die Algorithmen in einem

DSP und das Videosignal-Routing in einem FPGA realisiert sind. Die Reduktion der Heterogenität durch eine generische Basisband-Architektur ist anzustreben, um kleinere, günstigere und leistungsoptimiertere Steuergeräte zu ermöglichen. Diese generische Architektur kann die digitale Basisband-Signalverarbeitung der Funkübertragung und die FAS-Signalverarbeitung (Algorithmik für die Bildverarbeitung und Objekt-Erkennung) in einer nächsten Steuergerätegeneration in einem FPGA vereinen. Durch eine derart effiziente gemeinsame Architektur sind Optimierungen bei den Stück-Kosten und beim Entwicklungsaufwand in der Automobilindustrie möglich.

## 1.2 Zielstellung der Arbeit

Die Ergebnisse der in dieser Dissertation erarbeiteten Methoden und Architekturen müssen in die Forschungs- und Entwicklungsprozesse der Automobilindustrie integrierbar sein. Daher wird in dieser Arbeit dieser Anforderung durch eine darauf ausgelegte Vorgehensweise Rechnung getragen.

Eine Charakterisierung der Funkkanäle auf Basis der heutigen Werkstoff-Geometrie-Kombinationen und die Ableitung eines Kanalmodells, welches für alle zukünftigen Fahrzeug-Varianten aussagekräftig bleibt, ist nur eingeschränkt machbar. Beispielsweise werden in der Hybridisierung und Elektrifizierung der Fahrzeuge der nächsten Generation weiterentwickelte Werkstoffe und neue designbedingte Geometrien Einzug erhalten. Diese Faktoren beeinflussen den Fahrzeug-Funkkanal sowohl im Innenraum als auch im Außenbereich, da sich u.a. die Reflexions- und Transmissionswerte ändern.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methodik zur Erfassung der Funkausbreitungs-Phänomene direkt an der Fahrzeug-Anhänger-Kombination und an speziellen Fahrzeug-Kamera-Positionen zu erarbeiten. Ausgehend davon wird ein UWB-Sende-Empfängersystem ausgelegt, welches für die Übertragung von Signalen in diesen hochreflektiven Funkkanälen ausgelegt ist. Hierfür wird eine Systemsimulation eingeführt. Die UWB-Architektur erlaubt einen generischen Einsatz auch für unterschiedliche Szenarien und Frequenzbereiche. Durch die adaptive PN-Code-Wahl sind unterschiedliche Spreizfaktoren nutzbar. Dabei erlaubt die neuartige Architektur die dynamische Parameterauswahl bei unterschiedlichen Szenarien wie z.B. bei unterschiedlichen Knickwinkeln oder Vorhandensein anderer Fahrzeuge bzw. Objekte. Eine der anspruchsvollsten Datenübertragungsaufgaben im Fahrzeugumfeld ist die Übertragung von Kamerasignalen für Fahrerassistenzsysteme. In den zukünftigen Ausbaustufen werden diese Kamerasysteme von rein darstellenden Systemen für die menschliche Perzeption, erweitert zu Bildverarbeitungssystemen, welche Objektdetektions-Algorithmen für die maschinelle Perzeption beinhalten. Dadurch

müssen für die Auslegung der Übertragungsstrecke Qualitäts-Metriken für die maschinelle Perzeption eingeführt werden.

Eine Absicherung der kompletten Funktion erfolgt in der Automobilindustrie für jede Fahrzeug-Baureihe gesondert, da es sich jeweils um ein neues Produkt handelt. Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik kann für jede neue Baureihe verwendet werden und ist somit für die Forschungs- und Entwicklungs-Prozesse der Automobilindustrie nutzbar.

#### **Die Zielstellung im Einzelnen:**

- Untersuchung und Charakterisierung von Funkkanälen bei 6-8,5GHz für Positionen die abhängig vom Winkel zwischen dem Fahrzeug und dem Anhänger das eigene Reflexions-Szenario ändern (z.B. LKW mit Anhänger).
- Untersuchung, Modellierung und Implementierung einer generischen Basisband-UWB-Architektur für Signalraten im Bereich von Gbit/s.
- Modellierung und Simulation der Übertragungsstrecken auf Basis der entsprechenden Funkkanal-Charakterisierungen.
- Berücksichtigung spezieller Anforderungen von Kameras für zukünftige Fahrerassistenzsysteme, welche Objektdetektions-Algorithmen für die maschinelle Perzeption beinhalten.
- Methoden und Architekturen aus dieser Arbeit müssen in die Forschungs- und Entwicklungs-Prozesse der Automobilindustrie und in heutige FPGAs integrierbar sein.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

In **Kapitel 1** wird die technisch-wissenschaftliche Problemstellung eingeführt. Nach einer Motivation der Arbeit wird die Zielstellung formuliert und die Gliederung der Arbeit vorgestellt. In **Kapitel 2** folgt der Stand der Technik zu den Fachgebieten *UWB-Signalverarbeitungs-Architekturen* und *Charakterisierung von UWB-Fahrzeug-Funkkanälen*.

**Kapitel 3** enthält die mathematische Beschreibung der Basisband-Architektur für das DS-UWB-System. Nach einer konzeptionellen Betrachtung wird die generische UWB-Architektur dargestellt, mit der Signalraten im Bereich von Gbit/s verarbeitet werden können. Der Zusammenhang zwischen FAS-Kamera-Modus, Kompressions-Rate und PN-Code-Länge wird hergeleitet. Das Prinzip der konfigurierbaren PN-Code-Generierung mit hoher Chiprate wird eingeführt.

Die komplette UWB-Systemauslegung erfolgt auf Basis von Funkkanal-Untersuchungen. Die Grundlagen dafür werden in **Kapitel 4** behandelt. Die komplexe

Kanalimpulsantwort bestimmt das zeitvariante und frequenzselektive Verhalten des Funkkanals vollständig. Durch eine Fourier-Transformation kann daraus die komplexe Übertragungsfunktion berechnet werden. Zur Charakterisierung der frequenzselektiven Eigenschaften des Funkkanals wird eine Autokorrelation über die Frequenz verwendet. Als Maß für die statistische Übereinstimmung der Übertragungsfunktion für zwei um  $\Delta f$  unterschiedliche Frequenzen wird ein Korrelationskoeffizient verwendet und daraus die Kohärenzbandbreite bestimmt. Die Zeitdispersion des Kanals, welche zu Intersymbolinterferenzen führen kann, wird durch den *rms-Delay-Spread* charakterisiert. Er kennzeichnet die Breite der Leistungsverzögerungsfunktion (PDP), welche aus der Kanalimpulsantwort abgeleitet wird. Das Verhältnis der Leistung der dominanten Komponente zur Summe der Leistungen aller gestreuten Signalpfade wird durch den Rice-Faktor angegeben. Die gestreuten Signalpfade beeinflussen den Signalstörabstand und werden durch eine Berechnung der mittleren Bitfehlerrate in Abhängigkeit vom Rice-Faktor vollständig mitberücksichtigt. Abbildung 1-6 zeigt zusammenfassend die verwendete Methodik zur Bestimmung der für diese Arbeit relevanten Funkkanal-Kenngrößen und Kennfunktionen.

In **Kapitel 5** wird eine Methodik zur Charakterisierung der Fahrzeug-Funkkanäle beschrieben und auf vorgegebene Antennen-Positionen angewandt. Bei den vorgegebenen Positionen handelt es sich um mögliche Antennen-Positionen für FAS-Kameras. Es werden für verschiedene Positionen an einem LKW-Gespann und an einem PKW die charakteristischen Funkkanal-Kenngrößen und Kennfunktionen ermittelt. Erstmals werden auch Fahrzeug-Funkkanäle untersucht, die abhängig vom Winkel zwischen dem Fahrzeug und dem Anhänger das eigene Reflexions-Szenario ändern.

Mit den Ergebnissen aus diesen Untersuchungen werden für zukünftige Arbeiten die charakteristischen Kenngrößen und Kennfunktionen für die Spezifikation von neuen Übertragungssystemen vorliegen. Das in dieser Arbeit entworfene UWB-System wird auf Basis dieser Funkkanal-Ergebnisse ausgelegt. Die Methodik für den Entwurf von Fahrzeug-Funksystemen ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Zu den einzelnen Schritten werden die in dieser Arbeit assoziierten Kapitel angegeben.

In **Kapitel 6** wird eine Systemsimulation eingeführt mit der die UWB-Architektur evaluiert wird. Ausgehend von der Modellierung des Senders und des Empfängers wird das Simulationsmodell erweitert um den Funkkanal. Auf Basis der messtechnisch ermittelten Funkkanal-Kenngrößen wird der Funkkanal modelliert. Für die in dieser Arbeit untersuchten Funkkanäle werden Bitfehlerraten ermittelt und in Abhängigkeit vom Signalstörabstand dargestellt. Für charakteristische Szenarien werden die erreichbaren Korrelations-Funktionen für verschiedene PN-Codes evaluiert.

Eine neuartige Methode und Metrik zur Untersuchung der Kompressions-Einflüsse auf Objekt-Erkennungsalgorithmen wird zur Parametrisierung der DS-UWB-Übertragung eingeführt. Diese dient als Metrik für die Qualitäts-Abschätzung der Fahrzeug-Funktion.

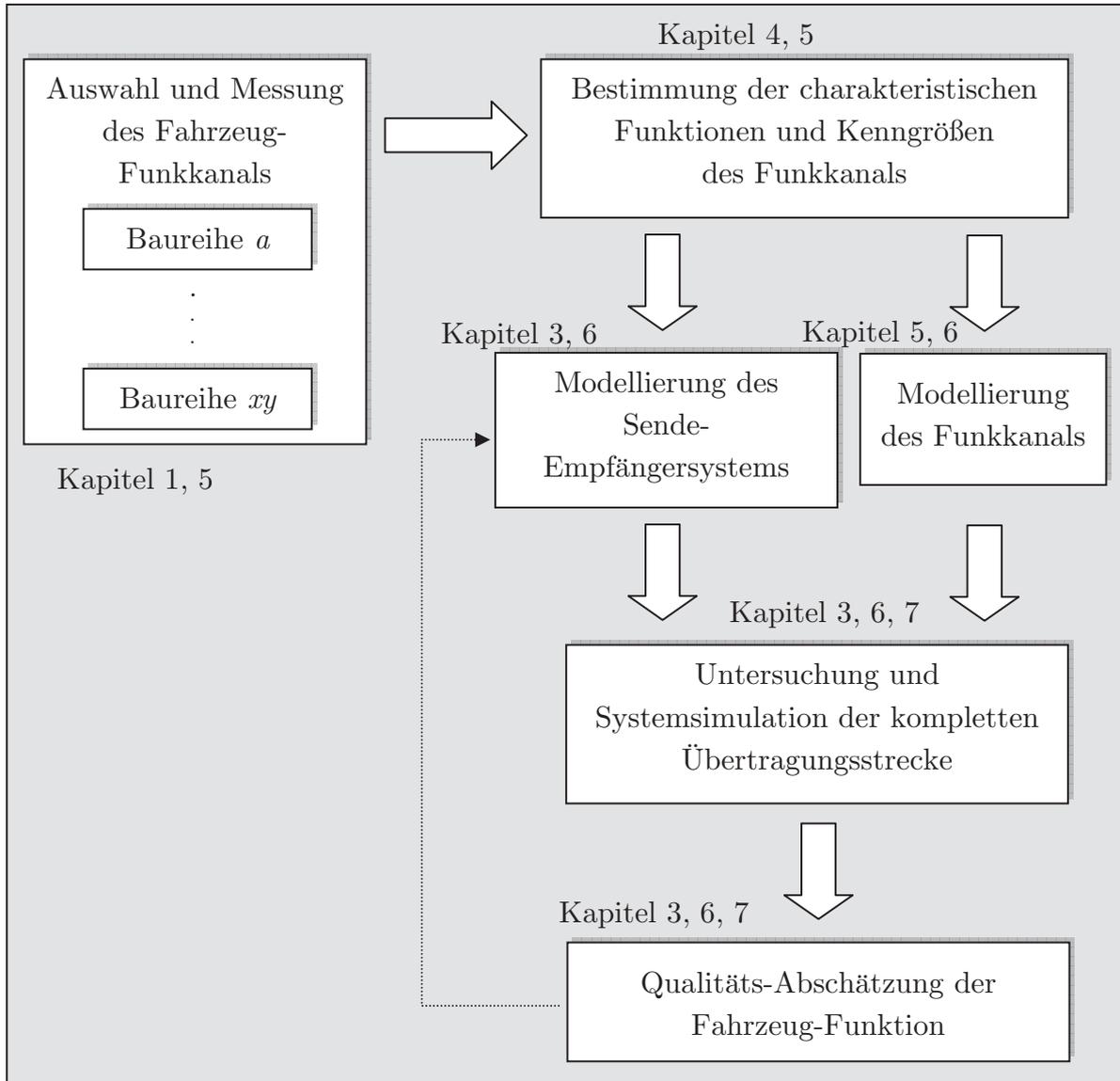


Abbildung 1-5: Methodik zum Entwurf von Fahrzeug-Funksystemen

In **Kapitel 7** wird der Entwurf der Basisband-Schaltung für das in dieser Arbeit entworfene DS-UWB-System dargestellt. Die Funktion der Schaltung wird durch die Realisierung eines System-Demonstrators evaluiert. Mit dem experimentellen Aufbau werden Video-Daten in Echtzeit für ein LKW-Szenario übertragen. Das DS-UWB-System nutzt eine Chiprate von 1,25GChip/s für die Übertragung über das UWB-Band. Die entworfene Schaltung ist in heutige Automobil-FPGAs implementierbar, was für das System als zentrale Anforderung formuliert wurde. Der Schaltungs-Entwurf erfolgt aus diesem Grund besonders ressourcenoptimiert.

Die Arbeit wird in **Kapitel 8** zusammengefasst und es folgt ein Ausblick auf weitere Entwicklungen dieses Themas. Im Anhang werden weitere Funkkanal-Kennfunktionen und Bitfehlerraten für weitere Antennen-Positionen sowie detaillierte Angaben zum Ressourcenbedarf der digitalen Schaltung dargestellt.

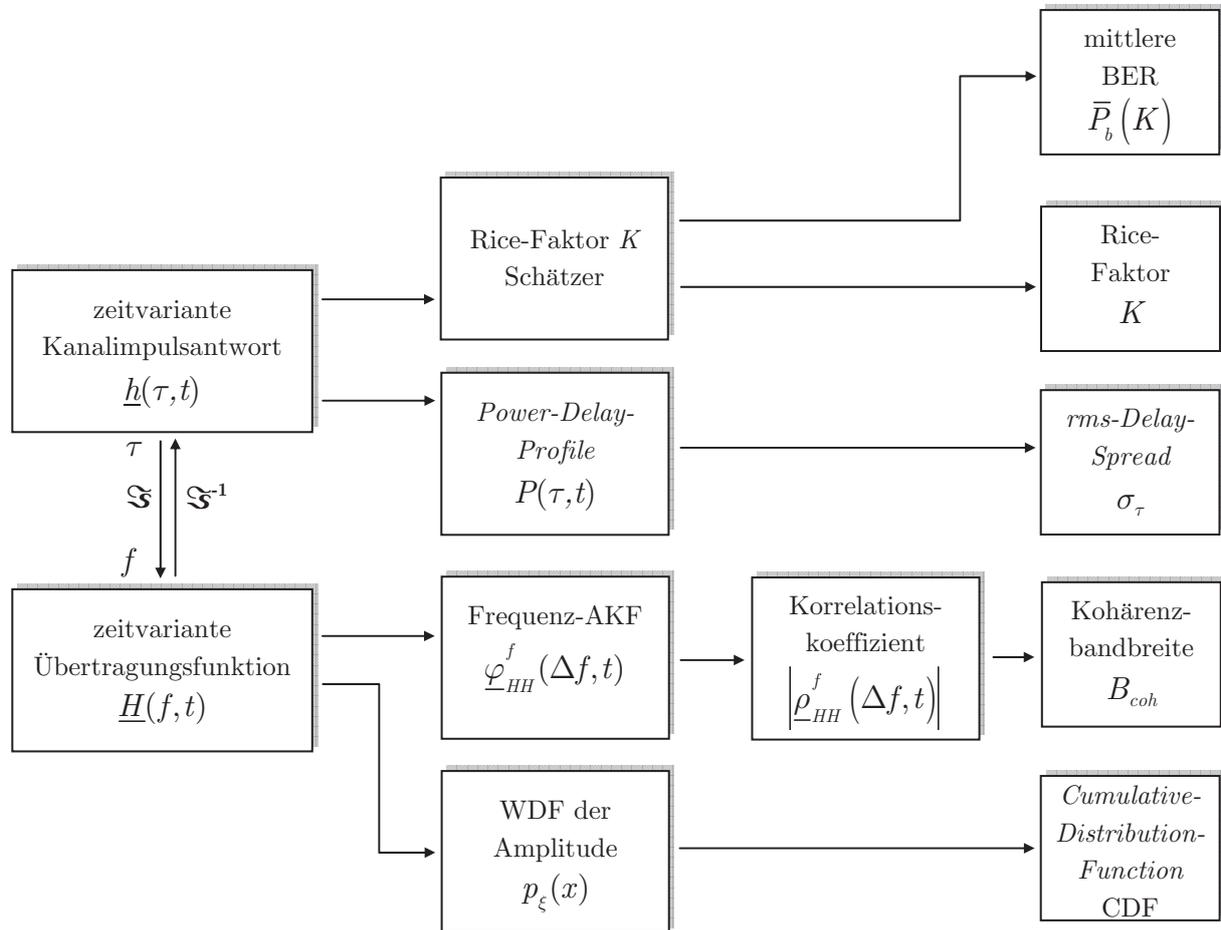


Abbildung 1-6: Zusammenfassung der für diese Arbeit relevanten Funkkanal-Kenngrößen und Kennfunktionen